

## ■ Gefilterter Transport

In Nanostrukturen kann das Wiedemann-Franz-Gesetz verletzt sein, wie Experimente an einer kleinen metallischen Insel gezeigt haben.

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  gehört zu den Standardexperimenten der Festkörperphysik. Hierbei geht es darum, die elektrische Stromdichte  $j_e$  als Funktion eines angelegten elektrischen Feldes  $E$  zu bestimmen, d. h.  $j_e = \sigma E$ . Das elektrische Feld entsteht dabei üblicherweise durch Anlegen einer Spannung an die Probe. Analog lässt sich auch der Wärmestrom  $j_q$  als Antwort auf einen Temperaturgradienten  $\nabla T$  messen, um daraus die thermische Leitfähigkeit  $\kappa$  mittels  $j_q = -\kappa \nabla T$  abzuleiten.

Ein bedeutendes Ergebnis dieser Experimente ist das Wiedemann-Franz-Gesetz [1]. Dieses 1853 zuerst beobachtete Resultat besagt, dass der Quotient aus thermischer und elektrischer Leitfähigkeit linear mit der Temperatur  $T$  ansteigt, d. h.  $\kappa/\sigma = LT$ . Die Proportionalitätskonstante  $L$  ist als Lorenz-Zahl bekannt und nimmt empirisch für verschiedene Metalle und Legierungen nahezu denselben Wert an.

Eine theoretische Erklärung dieses Gesetzes liefert die Sommerfeld-Transporttheorie. Sie geht davon aus, dass sich die Elektronen im Material als freie, quantenmechanische Teilchen beschreiben lassen, die sich unter dem Einfluss der Lorentz-Kraft bewegen. Weitere Eigenschaften des Materials wie das Kristallgitter der Atomrümpfe bleiben in der Theorie unberücksichtigt. Die Sommerfeld-Theorie liefert die lineare Temperaturabhängigkeit des Quotienten  $\kappa/\sigma = L_0 T$  mit der Lorenz-Zahl  $L_0 = \pi^2 k_B^2 / (3e)^2 \approx 2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ , in guter Übereinstimmung mit den experimentell beobachteten Werten.

Der physikalische Grund für die Proportionalität von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit liegt darin, dass in Metallen hauptsächlich die Elektronen für den Wärmestrom verantwortlich sind. Daher ist eine rein elektronische Theorie wie die von Sommerfeld in der Lage, sowohl den elektrischen

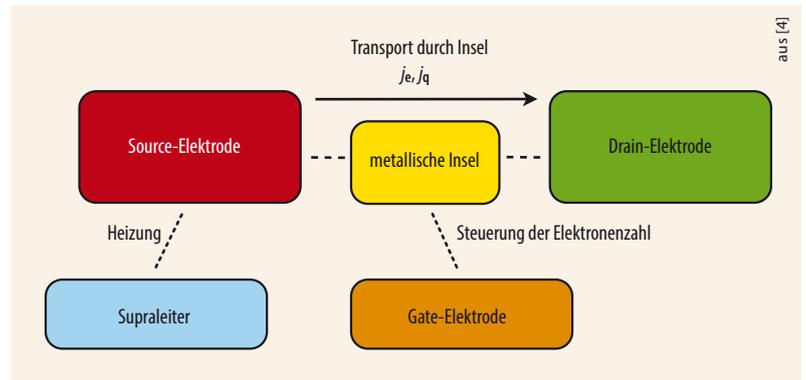


Abb. 1 Im Experiment wurde der Transport durch eine nur 200 nm große metallische Insel untersucht. Hierbei tunnelt ein Elektron von der Source-Elektrode

auf die Insel und anschließend weiter zur Drain-Elektrode. Bei diesem Vorgang werden sowohl Ladung als auch Wärme transportiert.

Strom als auch den Wärmestrom zu beschreiben und liefert natürlicherweise deren Proportionalität.

Die offensichtlichste (und somit langweiligste) Verletzung des Wiedemann-Franz-Gesetzes liegt in Isolatoren vor: Hier gibt es keinen Ladungstransport durch Elektronen. Der Wärmetransport erfolgt jedoch durch Phononen, die Quanten der Schwingungen des Kristallgitters, was zu  $\sigma/\kappa = 0$  führt.

Deutlich interessanter sind Situationen, in denen der Wärmetransport durch Phononen weiter zu vernachlässigen ist. Beispielsweise beruht die Verletzung des Wiedemann-Franz-Gesetzes in quasi-eindimensionalen Materialien [2] oder Graphen [3] auf der Existenz von kollektiven Anregungen, die sich nicht als elektronenähnliche Quasiteilchen in einer Sommerfeld-Theorie beschreiben lassen.

Kürzlich hat ein internationales Wissenschaftlerteam um Hervé Courtois von der Université Grenoble Alpes und Jukka Pekola von der Aalto University experimentell gezeigt, dass das Wiedemann-Franz-Gesetz auch in elektronischen Nanostrukturen verletzt sein kann [4]. In ihrer Arbeit haben sie den Transport durch eine kleine metallische Insel untersucht, die an drei Elektroden angekoppelt ist (Abb. 1). Da die Insel nur etwa 200 nm groß ist, spielt die

Coulomb-Abstoßung zwischen den Elektronen dort eine dominierende Rolle.

Die theoretische Beschreibung des Transports geht von einer kapazitiven Modellierung der Coulomb-Abstoßung aus [5]. Das bedeutet, dass die Ladungsenergie der metallischen Insel durch  $E_C(N - n_g)^2$  beschrieben wird, wobei  $E_C = e^2/(2C)$  die Energie einer Elektronenladung  $e$  auf der Insel mit elektrischer Kapazität  $C$  ist. Weiterhin ist  $N$  die Zahl der Elektronen auf der Insel, und  $n_g$  beschreibt deren mittlere Elektronenzahl, die sich mittels einer äußeren Spannung an der Gate-Elektrode regulieren lässt. Somit ist es möglich, die Ströme als Funktion von  $n_g$  zu messen.

Der Transport durch die metallische Insel erfolgt durch ein Elektron, das aus der Source-Elektrode auf die Insel tunnelt. Damit erhöht sich die Zahl der Elektronen von  $N$  auf  $N + 1$ , was mit der Energieänderung  $\Delta_N = E_C[1 + 2(N - n_g)]$  einhergeht. Anschließend tunnelt das Elektron weiter in die Drain-Elektrode, womit sowohl seine Ladung  $e$  als auch Wärme zwischen den Elektroden transportiert wurde. Da wegen der benötigten Ladungsenergie  $\Delta_N$  nur Elektronen mit hinreichend großer Energie  $E > \Delta_N$  zum Transport beitragen, wirkt die Coulomb-Abstoßung auf der Insel als Energiefilter. Dadurch

sind Ladungs- und Wärmetransport entkoppelt und das Wiedemann-Franz-Gesetz verletzt.

Um die Lorenz-Zahl  $L$  experimentell zu bestimmen, ist es erforderlich, die elektrische und die thermische Leitfähigkeit zu messen – letztere ist nur schwierig zu ermitteln. Das Experiment erfolgte bei Temperaturen von etwa 150 mK. Die Source-Elektrode ließ sich mittels einer weiteren, supra-leitenden Elektrode erwärmen oder kühlen, wobei der Wärmestrom durch die Insel sich aus der Energiebalance ableitete. Insgesamt

erlaubte dies die Messung der Lorenz-Zahl als Funktion der mittleren Elektronenzahl  $n_g$ . Für halbzahlige  $n_g$  folgte ein Wert  $L/L_0 = 1$  in Übereinstimmung mit dem Wiedemann-Franz-Gesetz. Im Gegensatz dazu traten für ganzzahlige  $n_g$  Werte bis zu  $L/L_0 = 4$  auf. In diesem Fall ist der Wärmetransport im Vergleich zum elektrischen Transport demnach vierfach erhöht, da nur Elektronen der Energie  $E > E_C$  zum elektrischen Transport beitragen. Die gemessenen Ergebnisse stimmen hervorragend mit den theoretischen Vorhersagen überein [5].

In Zukunft ist geplant, die Insel weiter zu verkleinern – in der Hoffnung, dass dies zu noch unbekanntem, quantenmechanischen Phänomenen im Wärmetransport führt.

Dirk Schuricht

- [1] G. Wiedemann und R. Franz, Annalen der Physik und Chemie **89**, 32 (1853)
- [2] N. Wakeham et al., Nature Commun. **2**, 396 (2011)
- [3] J. Crossno et al., Science **351**, 1058 (2016)
- [4] B. Dutta et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 077701 (2017)
- [5] B. Kubala, J. König und J. Pekola, Phys. Rev. Lett. **100**, 066801 (2008)

Dr. Dirk Schuricht, Institute for Theoretical Physics, Center for Extreme Matter and Emergent Phenomena, Utrecht University, Niederlande

## ■ Unerwartete Verstärkung

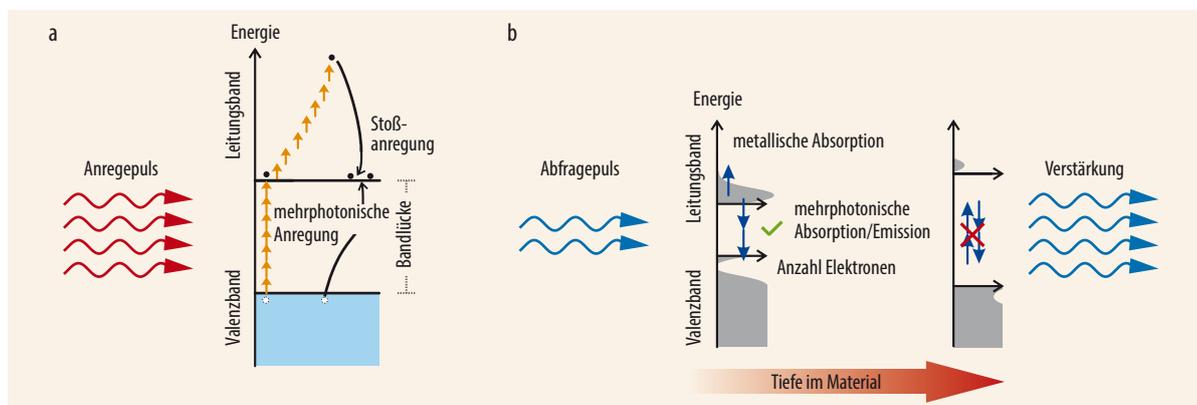
**Dielektrika, die mit ultrakurzen Laserpulsen angeregt wurden, können einen Abfragepuls verstärken.**

Vor gut hundert Jahren hat Albert Einstein die stimulierte Emission postuliert und damit den gedanklichen Grundstein für die Entwicklung des Lasers gelegt. Heute findet man Anwendungen des Lasers in sehr vielen Geräten, und als eines der meistgenutzten Forschungswerkzeuge der Physik stehen Laser in fast jedem Labor. Die Lichtverstärkung in klassischen Lasermedien wie Gasen, Festkörpern oder Farbstoffen ist ein linearer Prozess, bei dem jeweils ein Photon die Emission eines weiteren Photons stimuliert. Vor Kurzem haben Wissenschaftler aus Deutschland und Dänemark einen Effekt entdeckt, bei dem die Emission mehrerer Photonen in einem nicht-linearen Prozess stimuliert wird [1].

Eigentlich wollten die Forscher das Absorptionsverhalten von Dielektrika untersuchen: Materialien mit großer Bandlücke, z. B. Gläser oder Wasser, erscheinen im Normalfall durchsichtig, weil Licht im sichtbaren Bereich nicht absorbiert wird. Für ultrakurze, hochintensive Laserpulse ändern verschiedene nichtlineare Anregungsprozesse die optischen Eigenschaften des Materials vom transparenten zu einem metallartigen Zustand. Zeitaufgelöste Untersuchungen des Transmissions- und Reflexionsverhaltens des Materials geben Aufschluss über grundlegende Prozesse wie die Dynamik angeregter Elektronen und ihre Relaxation [2, 3].

Bei einem solchen Experiment beobachteten die Forscher aus Kas-

sel und Aarhus, dass Licht in einem angeregten Material nicht stark absorbiert, sondern – im Gegenteil – verstärkt werden kann. Zunächst wurde eine Saphir-Probe mithilfe eines ultrakurzen nur 30 fs langen Laserpulses von 800 nm Wellenlänge in einen angeregten Zustand versetzt. Die zeitgleiche Absorption mehrerer Photonen erlaubt den Elektronen, aus dem voll besetzten Valenzband in das anfangs leere Leitungsband zu wechseln. Hier können sie weitere Energie aus dem Laser aufnehmen. Übertragen sie die Energie durch Stoßanregung auf andere Elektronen des Valenzbandes, erreichen diese ebenfalls das Leitungsband (Abb. 1a) [4]. Wieviele Elektronen zu welcher Zeit und bei welcher Energie im



**Abb. 1** Ein ultrakurzer Anregepuls erzeugt im Dielektrikum über nichtlineare Prozesse eine hohe freie Elektronendich-

te im Leitungsband (a). Die Absorption des Abfragepulses wird zeitversetzt gemessen (b). Kommt es nahe der Oberflä-

che des Dielektrikums zur stimulierten Emission zweier Photonen, passiert ein verstärkter Abfragepuls das Material.