

■ Kalt dank kolossalem Koeffizienten

In Einkristallen des korrelierten Halbleiters FeSb_2 wurde ein riesiger Seebeck-Koeffizient gemessen.

Thermoelektrische Materialien sind Halbleiter, die es erlauben, eine elektrische Spannung aus einer Temperaturdifferenz bzw. umgekehrt ein Temperaturgefälle aus einer angelegten Spannung zu erzeugen (Seebeck- bzw. Peltier-Effekt) [1]. Ein wichtiges Beispiel sind Thermoelektrika auf der Basis von Bi-Te-Verbindungen, die sich bereits in vielen Anwendungen finden, z. B. zur Kühlung von Getränken im Auto oder neuerdings auch in der Weltraumforschung. Die Suche nach neuen, effizienteren Thermoelektrika bedeutet für die Materialwissenschaften eine besondere Herausforderung. Diese könnten es ermöglichen, einen Teil der bei technischen Prozessen oder bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzten Wärme in elektrische Energie umzuwandeln. Umgekehrt verspricht man sich z. B. von Peltier-Kühlern für Temperaturen von 10 bis 100 Kelvin, dass sich Hochtemperatur-Supraleiter oder der relativ neue Supraleiter MgB_2 im IT-Bereich und in der Energietechnik verwenden lassen. Das könnte gleichzeitig einen deutlich eingeschränkten Verbrauch an flüssigem Helium als Kühlmittel bedeuten. Daher wird weltweit intensiv nach einer besonderen Spezies von Thermoelektrika, sog. Kondo-Isolatoren, gesucht. Solche „hochkorrelierten“ Halbleiter weisen einen sehr großen Seebeck-

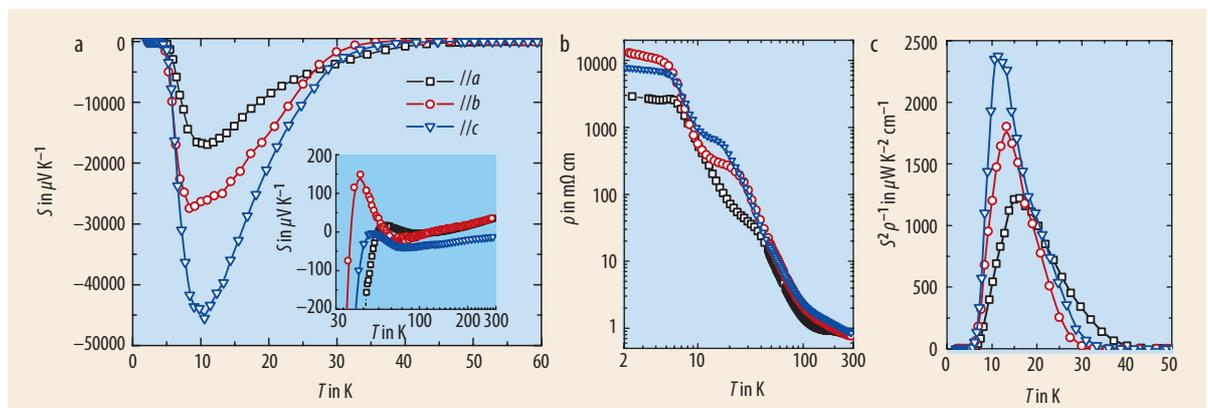
Koeffizienten S (Thermokraft) auf. Diese Größe bestimmt gemeinsam mit dem elektrischen Widerstand ρ und der thermischen Leitfähigkeit κ den dimensionslosen Gütefaktor $ZT = (S^2\rho^{-1})/\kappa$, von dem der Wirkungsgrad einer thermoelektrischen Wärmepumpe maßgeblich abhängt.

Kondo-Isolatoren gehören zur Familie der Schwere-Fermionen-Verbindungen, die alle Ionen mit lokalisierten f- bzw. d-Elektronen enthalten [2]. In diesen Substanzen bewirkt die schwache kovalente Mischung der atomaren f- bzw. d-Wellenfunktionen mit denen der delokalisierten Leitungselektronen einen dramatischen Vielteilcheneffekt: Da Teilchen-Loch-Anregungen beim Abkühlen die lokalen magnetischen Momente der f- bzw. d-Elektronen zunehmend abschirmen, bildet sich knapp unterhalb bzw. oberhalb der Fermi-Kante aus den f- bzw. d-Zuständen ein Quasiteilchenband. Dieses ist sehr flach, sodass die effektive Masse der Ladungsträger sehr groß wird – daher der Name „Schwere Fermionen“.

Die meisten Schwere-Fermionen-Verbindungen sind bei tiefer Temperatur hervorragende Metalle, oft sogar Supraleiter. Im Gegensatz dazu nehmen die Kondo-Isolatoren bei tiefer Temperatur einen halbleitenden Zustand an. Ein einfaches Modell geht davon aus, dass das halbbesetzte Quasiteilchenband

mit einem ebenfalls halbbesetzten breiten Leitungsband hybridisiert [3]. Auf diese Weise bildet sich bei $T = 0$ eine sehr kleine Bandlücke von einigen meV zwischen dem vollbesetzten unteren und dem leeren oberen hybridisierten Band aus. In der Regel hängt die Quasiteilchenzustandsdichte an der Fermi-Kante dann sehr stark von der Energie ab, und als Konsequenz daraus nimmt der Seebeck-Koeffizient riesige Werte an. So wurden z. B. für den Kondo-Isolator FeSi ein Wert $|S| \approx 500 \mu\text{V/K}$ bei $T \approx 10 \text{ K}$ beobachtet und für andere Verbindungen sogar Maximalwerte von rund $1000 \mu\text{V/K}$.

In einer Kooperation zwischen dem MPI für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden und der Universität Aarhus (Dänemark) gelang es kürzlich, diesen Rekord deutlich zu verbessern: Nachdem frühere thermodynamische und Transport-Untersuchungen an polykristallinem FeSb_2 verblüffende Ähnlichkeiten zu FeSi ergeben hatten, fanden A. Bentien et al. [4] für Einkristalle aus FeSb_2 „kolossale“ Werte von $|S| \leq 45000 \mu\text{V/K}$ bei $T \approx 10 \text{ K}$. Allerdings ist zurzeit noch nicht verstanden, warum Einkristalle diese um fast zwei Größenordnungen erhöhte Thermokraft aufweisen. Einen ersten Hinweis darauf liefert die Tatsache, dass bei Temperaturen zwischen 10 und 20 K der Extremwert der Thermokraft offen-



In FeSb_2 -Einkristallen nimmt der Seebeck-Koeffizient S bei Temperaturen von rund 10 K bisher unerreichte Rekordwerte an (a). Die Ursache dafür hängt

vermutlich mit der Korrelation der Extrema von S mit den Plateaus im elektrischen Widerstand ρ zusammen (b). Auch der Leistungsfaktor $S^2\rho^{-1}$ übertrifft

den bisherigen Rekordwert deutlich. Die Kurven wurden entlang unterschiedlicher Kristallrichtungen an verschiedenen FeSb_2 -Einkristallen gemessen.

bar mit der Höhe des Widerstands-Plateaus korreliert (Abb.). Vermutlich ist die Ausbildung des flachen Quasiteilchenbandes beim Abkühlen zu diesen tiefen Temperaturen für diesen riesigen Seebeck-Koeffizienten verantwortlich. Die mikroskopischen Zusammenhänge, welche dieser Vermutung zugrunde liegen, bedeuten eine besondere Herausforderung für die Theorie der korrelierten Materie. Wegen des riesigen Wertes von S^2 übertrifft auch der „Leistungsfaktor“ $S^2\rho^{-1}$ der neuen FeSb₂-Einkristalle den bisherigen Rekordwert für Thermoelektrika um ein Vielfaches.

Für technologische Anwendungen muss allerdings $ZT > 1$ gelten. Hierzu ist neben einem möglichst hohen Leistungsfaktor eine hinreichend niedrige Wärmeleitfähigkeit κ erforderlich. Für die von Bientien et al. untersuchten FeSb₂-Einkristalle ist κ bei ca. 10 K allerdings um mehr als einen Faktor 100 zu groß, weshalb sich diese Proben noch nicht für Anwendungen eignen. Zukünftige

Aktivitäten der Gruppen in Dresden und Aarhus zielen deshalb darauf ab, die von den thermischen Gitterschwingungen dominierte Wärmeleitfähigkeit entsprechend zu reduzieren, möglichst ohne den Leistungsfaktor $S^2\rho^{-1}$ zu beeinträchtigen. Eine drastische Verringerung der mittleren freien Weglänge der propagierenden Phononen lässt sich im relevanten Temperaturbereich entweder durch Dotierung oder durch ausgedehnte Gitterbaufehler (Mehrfachschichten, Einbau

von nanoskaligen Einschlüssen) erzielen. Erst wenn diese Versuche erfolgreich sein sollten, kann man an einen Kryo-Kühlschrank auf der Basis von FeSb₂ denken.

Konrad Samwer

Prof. Dr. Konrad Samwer, I. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen

- [1] J. Sommerlatte, K. Nielsch und H. Böttner, *Physik Journal*, Mai 2007, S. 35
- [2] F. Steglich, *Physik Journal*, August/September 2004, S. 61
- [3] G. Aeppli und Z. Fisk, *Comments Cond. Mat. Phys.* **16**, 155 (1992)
- [4] A. Bientien et al., *Europhys. Lett.* **80**, 17008 (2007), Erratum: *Europhys. Lett.* **80**, 39901 (2007)

KURZGEFASST

■ Anti-Wasserstoff in der Falle

Forschern am CERN ist es gelungen, sog. kalten (also abgebremsten) Anti-Wasserstoff zu erzeugen. Dazu fingen sie die schnellen Ausgangsteilchen (Anti-Protonen und Positronen) in einer einzigen magnetischen Falle und führten sie darin zusammen, sodass Anti-Wasserstoff entstand. Der nächste Schritt wird sein, die Anti-Wasserstoff-Atome länger zu speichern, um sie spektral genau zu vermessen. G. Gabrielse et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 113001 (2008)

■ Vom Supraleiter zum Superisolator

In Filmen aus supraleitenden Körnern kann das Tunneln von Cooper-Paaren durch Josephson-Kontakte dazu führen, dass sich auf den Körnern eine Ladung aufbaut, die den Stromfluss unterdrückt. Ein internationales Forscherteam hat nun gezeigt, dass ein dünner Titanitridfilm bei einer Temperatur von 70 mK von diesem Zustand des Cooperisolators übergeht zu einem Zustand mit unendlichem Widerstand – dem exakten Gegenteil der Supraleitung. V. M. Vinokur et al., *Nature* **452**, 613 (2008)