

■ Supraleitung unter Hochdruck

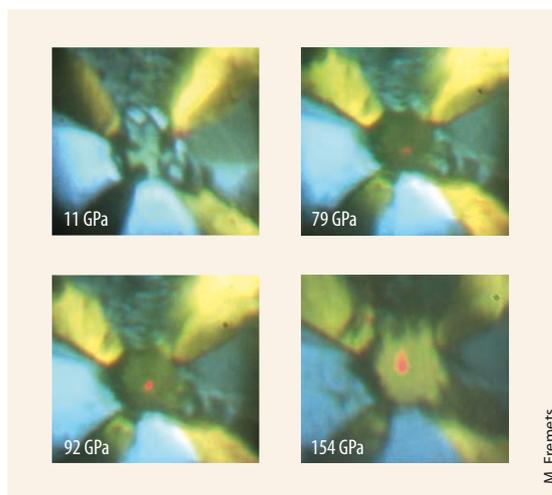
In Schwefelwasserstoff tritt bei 203 K und 190 GPa konventionelle Supraleitung auf.

Supraleitung ist der verlustfreie Transport von elektrischem Strom, also von Energie. Die Entdeckung von 1911 gehört zu den faszinierendsten physikalischen Erscheinungen. Allgemein ist bekannt, dass Energietransport immer mit Verlusten verbunden ist. Dissipation lässt Schwingungen und Ströme abklingen oder bremst Fahrzeuge und Satelliten ab. Im Supraleiter ist sie außer Kraft gesetzt, und der Strom läuft und läuft und läuft.

Der praktischen Anwendung stellt sich aber ein Hindernis in den Weg, da die Materialien erst weit unterhalb der Raumtemperatur Supraleitung zeigen. Umso spannender war daher die Beobachtung von Supraleitung in H_2S bei einer Rekordtemperatur von 203 K und einem Druck von 190 GPa, die eine Gruppe um Mikhail Eremets kürzlich beobachtete [1].

Die Suche nach neuen Supraleitern ist eine lange Geschichte voller Überraschungen. Aber wie kommt man ausgerechnet auf die Idee, Schwefelwasserstoff zu testen? Die mikroskopische Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS) erklärt, wie 10^{23} Leitungselektronen eines Metalls durch die Bildung von Cooper-Paaren in einen kollektiven Zustand kondensieren, den eine einzige quantenmechanische Wellenfunktion beschreibt. Diese entspricht der Wellenfunktion eines stationären Elektronenzustands im Atom. Der Suprastrom und damit das Fehlen von Dissipation sind unabhängig vom Paarungsmechanismus die Folge.

In Materialien wie Quecksilber oder Zinn hängt die Sprungtemperatur T_c unterhalb der Supraleitung auftritt, von der Isotopenmasse ab. Aufgrund dieses Isotopen-Effekts spielt das Kristallgitter in der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer eine zentrale Rolle. In ihrem stark idealisierten Modell hängt T_c linear von der materialabhängigen Phononenfrequenz ω_{ph} und exponentiell von der Elektron-Phonon-Wechselwirkung λ ab.



M. Eremets

Beim Blick in das Probenvolumen der Diamantdruckzelle mit etwa 25 Mikrometern Durchmesser zeigt sich, wie die Probe mit zunehmendem Druck das rote Laserlicht zu reflektieren beginnt, also metallisch wird. Bei 154 GPa ist das gesamte Probenvolumen metallisch und wird supraleitend.

Welches reale Material als Supraleiter infrage kommt und wie groß T_c tatsächlich ist, lässt sich damit aber nur schwer vorhersagen. Daher wuchs die maximal mögliche Sprungtemperatur lange Zeit nur inkrementell. Bis 1980 lag die Obergrenze für die höchstmögliche Sprungtemperatur bei den etwa 6 000 bekannten elementaren und intermetallischen Supraleitern, zu denen z. B. Nb, NbTi oder Nb_3Sn gehören, bei etwa 40 K [2]. Diese Abschätzung erfolgt unter der Annahme, dass die Phononenfrequenz ω_{ph} der supraleitenden Übergangsmetallverbindungen wenig variiert und dass das Kristallgitter für starke Elektron-Phonon-Wechselwirkungen ($\lambda \gg 1$) instabil wird.

Das von Bednorz und Müller 1986 entdeckte LaBaCuO übersprang diese Grenze [3] und löste eine nie dagewesene Euphorie aus. Die Entdeckung weiterer Kuprate mit Sprungtemperaturen jenseits von 100 K folgte. Auch die eisenbasierten Supraleiter [4] sind mit diesen anisotropen Materialien verwandt. Für die hohen Sprungtemperaturen macht man in beiden Fällen die Konkurrenz von Supraleitung und Magnetismus verantwortlich, während die Gitterschwingungen höchstens eine Nebenrolle spielen [5].

Die Suche nach immer höheren Sprungtemperaturen konzentrierte sich in der Folge auf diese Materi-

alien. Daran änderte auch die Entdeckung von MgB_2 mit $T_c = 39$ K [6] nichts. Da seine Sprungtemperatur nicht über der Grenze von 40 K liegt, verstärkte es diese Denkrichtung sogar.

Bereits seit Ende der 1960er-Jahre verfolgte dagegen Neil Ashcroft einen Weg jenseits von Magnetismus oder anderen rein elektronischen Paarungsmechanismen. In seinen theoretischen Überlegungen fand er Hinweise auf Supraleitung von metallischem Wasserstoff unter extrem hohen Drücken [7]. Nach der BCS-Eliashberg-Theorie beruht dieser Effekt auf sehr hohen Phononenfrequenzen aufgrund der kleinen Masse des Wasserstoffs, die auch ohne unrealistisch starke Elektron-Phonon-Wechselwirkung eine um Faktoren höhere Sprungtemperatur erlauben. Allerdings war klar, dass die erforderlichen Drücke zur Realisierung von metallischem Wasserstoff weit jenseits des Druckes im Erdinneren liegen würden. Deshalb bezog Ashcroft ab 2004 auch Hydride wie CH_4 und SiH_4 in seine Betrachtungen mit ein [8].

Aus dem vergangenen Jahr stammt die Vorhersage, dass Schwefelwasserstoff unter hohem Druck dissoziiert und dass das gemäß $2 \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{H}_3\text{S} + \text{S}$ entstehende H_3S supraleitend sein könnte [9]. Parallel dazu fanden Experimente mit H_2S in einer Diamantdruckzelle

Priv.-Doz. Dr. Rudolf Hackl, Walther-Meißner-Institut, Bayerische Akademie der Wissenschaften, 85748 Garching; Prof. Dr. Bernd Büchner, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung Dresden, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden

statt. Der elektrische Widerstand verschwindet ab etwa 100 GPa, und ein diamagnetisches Signal tritt auf (Abb. 1) [1]. Nimmt die Magnetisierung langsamer zu als das externe Feld, dringt dieses in die Probe ein. Das untere kritische Feld $\mu_0 H_{c1}$ ist überschritten und die Begrenzung der Meißner-Phase nahe T_c gefunden. Weitere Untersuchungen klärten die Kristallstruktur der supraleitenden Phase auf und wiesen den Isotopen-Effekt nach [10].

Dieses eindrucksvolle Experiment hebt zwei Aspekte bei der Suche nach neuen Supraleitern hervor, die man in den letzten 30 Jahren weitgehend aus den Augen verloren hatte. Einerseits führt die Elektron-Phonon-Wechselwirkung auch in kubischen Verbindungen wie Schwefelwasserstoff zu sehr hohen Sprungtemperaturen, wenn die Gitterstruktur stabil bleibt. Andererseits lässt sich die Sprungtemperatur der wasserstoffhaltigen Verbindungen anders als bei Übergangsmetallverbindungen im Rahmen konventioneller, auf Elektron-Phonon-Wechselwirkung basierender BCS-Eliashberg-Betrachtungen relativ genau vorhersagen [8, 9, 11].

Supraleitung und damit verlustfreien Energietransport auch bei

Umgebungsbedingungen anzutreffen, ist in naher Zukunft aber nicht zu erwarten, da höhere Sprungtemperaturen nicht wahrscheinlich sind und die technische Realisierung von Drähten auf der Basis von H_3S bestenfalls Science Fiction ist. Dennoch zeigt die Entdeckung von Supraleitung unter Hochdruck nichts an Überraschungspotenzial eingebüßt hat und dass selbst Schwefelwasserstoff für frischen Wind sorgen kann.

Rudolf Hackl und Bernd Büchner

- [1] A. P. Drozdov et al., Nature **525**, 73 (2015)
- [2] C. M. Varma, in: W. Buckel und W. Weber (Hrsg.), Superconductivity in d- and f-Band Metals, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1982), S. 500
- [3] J. G. Bednorz und K. A. Müller, Z. Phys. B **64**, 189 (1986)
- [4] Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008)
- [5] I. I. Mazin, Nature **464**, 183 (2010)
- [6] J. Nagamatsu et al., Nature **410**, 63 (2001)
- [7] N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **21**, 1748 (1968)
- [8] N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **92**, 187002 (2004)
- [9] D. Duan et al., Sci. Rep. **4**, 6968 (2014)
- [10] M. Einaga et al., arXiv:1509.03156 [cond-mat.supr-con]
- [11] Y. Quan und W. E. Pickett, arXiv:1508.04491 [cond-mat.supr-con]

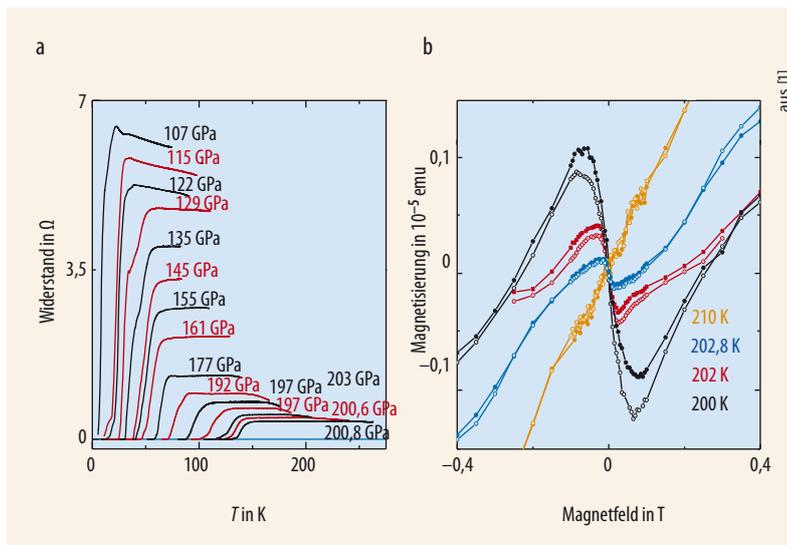


Abb. 1 Mit zunehmendem Druck verschiebt sich in Schwefelwasserstoff die Sprungtemperatur T_c zu immer höheren Werten (a). Betrachtet man die magnetischen Übergangskurven nahe T_c (b), geht die Magnetisierung bei etwa 203 K von paramagnetischem in diamagne-

tisches Verhalten über [1]. Magnetisierung und Magnetfeld sind entgegengerichtet, und das Feld wird aus der Probe verdrängt. Die Übergangskurven zeigen außerdem, dass mit abnehmender Temperatur zunehmend Hystere auftritt (offene und ausgefüllte Symbole).