

Temperaturrekord für Supraleitung

Zwei Forschergruppen ist es erstmals gelungen, Supraleitung nahe Raumtemperatur zu beobachten – allerdings unter sehr hohem Druck.

F. Malte Grosche

Seit ihrer Entdeckung vor etwas mehr als hundert Jahren gehört zur Supraleitung die Vorstellung, dass sie nur bei ultratiefen Temperaturen auftritt. Viele betrachten sie daher immer noch als interessantes Phänomen ohne nennenswerte Anwendungen. Daran hat auch die weite Verbreitung supraleitender Magnete, beispielsweise in der medizinischen Bildgebung mittels Magnetresonanztomographie, nicht viel geändert. Die Assoziation von Supraleitung mit Kryotechnik ist so fest verankert, dass die Vorstellung von supraleitenden Materialien bei Raumtemperatur geradezu fantastisch anmutet. Das macht die neuen Ergebnisse der Gruppen von Mikhail Eremets am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und von Russell J. Hemley in Washington so aufsehenerregend [1, 2]: Sie konnten nachweisen, dass das wasserstoffreiche Hydrid LaH_{10} bei einer Temperatur von $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder etwa 250 K supraleitend wird (Abb. 1). Damit erscheint Supraleitung bei Raumtemperatur in Reichweite – allerdings existiert dieses Hydrid nur bei einem sehr hohen Druck von etwa 1,5 bis 2 Millionen Atmosphären.

In den meisten Supraleitern binden die Schwingungen des Kristallgitters die Leitungselektronen zu einem supraleitenden Kondensat im Sinne der Bardeen-Cooper-Schrieffer-Theorie [3]. Im Gegensatz zu diesen konventionellen Supraleitern folgen unkonventionelle Supraleiter nicht der BCS-Theorie, meist weil andere – zum Beispiel magnetische – Wechselwirkungen die Leitungselektronen aneinander binden.

In konventionellen Supraleitern ist die Sprungtemperatur proportional zur gemittelten Frequenz der Gitterschwingungen. Der Weg zu höheren Sprungtemperaturen führt also über höhere Schwingungsfrequenzen des Kristallgitters, weil dadurch Elektronen in einem breiteren Energiebe-

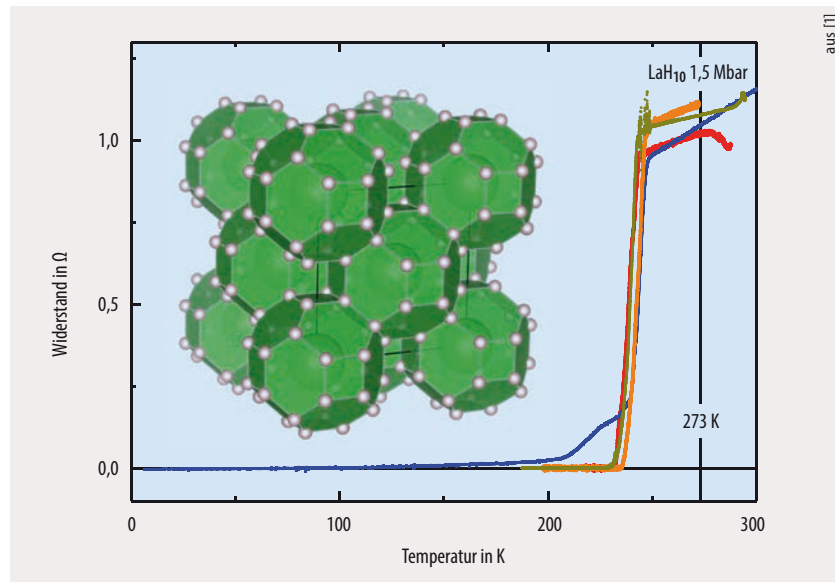


Abb. 1 Bei extrem hohem Druck bildet sich der neue Supraleiter LaH_{10} . Er weist eine klatrathartige Gitterstruktur auf. Die flächenzentriert kubisch angeordneten Lanthanatome (grün) sitzen wie Nüsse in dichtgewebenen Schalen aus Wasserstoffatomen (grau) mit einer Bindungslänge von knapp über einem Ångström. In LaH_{10} verschwindet der Widerstand bei etwa 250 K fast schlagartig.

reich um die Fermi-Kante beeinflusst werden können. Neil Ashcroft wies bereits vor 50 Jahren darauf hin, dass wegen des geringen Atomgewichts und der hohen Federkonstanten in Wasserstoff, der bei hohem Druck metallisiert vorliegt, supraleitende Sprungtemperaturen T_c oberhalb Raumtemperatur möglich sind [4].

Die Metallisierung von reinem Wasserstoff bleibt ein zentrales Ziel in der Hochdruckforschung und hat in den letzten Jahren zu kontroversen, geradezu erbitterten Diskussionen geführt [5]. Aufgrund der sehr schwierigen experimentellen Bedingungen steht der experimentelle Nachweis von druckinduzierter Supraleitung in reinem Wasserstoff noch aus. Angeregt wiederum von Neil Ashcroft [6] haben sich theoretische und experimentelle Gruppen nun wasserstoffreichen Verbindungen zugewendet, die unter hohem Druck supraleitend werden, beispielsweise SiH_4 ($T_c \approx 15\text{ K}$),

PH_3 ($T_c \approx 100\text{ K}$) und insbesondere Schwefelwasserstoff bei etwa 203 K [7].

Diese aufsehenerregenden Funde motivierten die systematische, computergestützte Suche nach weiteren wasserstoffreichen Materialien, die unter hohem Druck stabil sind. Dazu gehören auch die Superhydride LaH_{10} und YH_{10} , für die Sprungtemperaturen nahe der Raumtemperatur vorhergesagt wurden [8, 9]. Dabei ist neben den hohen Schwingungsfrequenzen, die sich aus der dichten Anordnung der leichten Wasserstoffatome ergeben, auch eine erstaunlich hohe Elektronen-Phononkopplung λ verantwortlich. Laut den Rechnungen erreicht diese Rekordwerte von bis zu 4 und ist damit mehr als doppelt so hoch wie bei anderen stark-koppelnden Supraleitern.

Für den experimentellen Nachweis gilt es zunächst, eines dieser vielversprechenden wasserstoffreichen Hy-

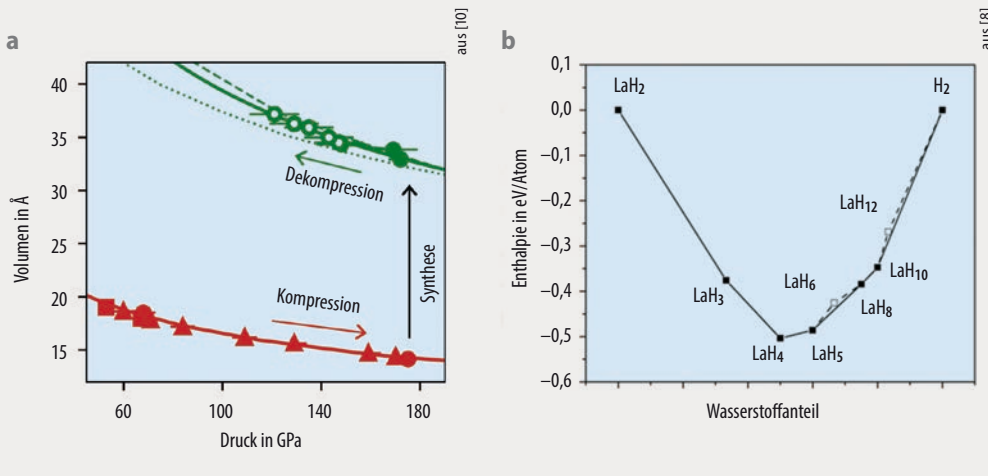


Abb. 2 Bei 300 K verhält sich das Volumen als Funktion des Drucks in Lanthan (a, rot) und den Metallhydriden LaH_{10±x} (grün) unterschiedlich: Röntgenbeugungsexperimente zeigen, dass der Wasserstoff den Lanthankristall aufbläht. Bei einem Druck von 1,5 Mbar sind laut Simulationen einige Hydride stabil (b).

dride zu erzeugen. Im Sommer 2017 gelang der Gruppe in Washington die Synthese von LaH₁₀ [10]. Dazu wird etwas Lanthan im mikroskopisch kleinen Probenvolumen einer Diamantdruckzelle mit etwa 40 µm Durchmesser und 15 µm Höhe untergebracht. Danach füllt man das Restvolumen mit Wasserstoffgas unter hohem Druck auf oder bringt ein Spendermaterial (NH₃BH₃) ein, das den Wasserstoff abgibt [2]. Unter hohem Druck und bei kurzem Aufheizen mithilfe eines Laserstrahls bildet sich das gewünschte Metallhydrid LaH₁₀. Die Gruppe in Mainz stellte fest, dass sich

das Hydrid auch langsam von selbst unter hohem Druck bildet [1]. Den Nachweis, dass sich in beiden Fällen tatsächlich LaH₁₀ in den Druckzellen gebildet hat, lieferten eindrucksvolle Röntgenstrukturuntersuchungen bei einem Druck im Megabarbereich (**Abb. 2a**). Dieser Durchbruch eröffnet der Chemie ein weiteres, wenn auch beschwerliches Arbeitsgebiet.

Beide Gruppen bestimmten Ende 2018 die Widerstandsdaten des so hergestellten LaH₁₀, die überzeugend und übereinstimmend Supraleitung bei Temperaturen um 250 bis 260 K be-

legen, in einzelnen Messungen sogar bei 280 K (**Abb. 1**). Die Ergebnisse wurden in mehreren Experimenten reproduziert und sind plausibel vom Magnetfeld abhängig. Der Nachweis des Meissner-Effekts steht noch aus und bleibt wegen der geringen Größe der Proben zusammen mit dem unvermeidlich hohen Hintergrundsignal durch die Druckzelle schwierig.

Die raschen Fortschritte der letzten Jahre ergeben sich aus dem engen Wechselspiel von Experiment und Theorie. Spezialisierte Einrichtungen wie am Geophysical Laboratory in Washington in den USA, am CSEC der University of Edinburgh in Großbritannien und am Forschungszentrum HPStar in China sowie die Pionierarbeiten am MPI für Chemie in Mainz erschließen den Druckbereich von einigen Megabar für die Materialsynthese, Transport- und magnetische Messungen. Dabei hilft die computergestützte Erkundung des Materialraums durch neue Rechenmethoden und schnelle Hardware. Hier führen präzise und verlässliche Vorhersagen zu stabilen und metastabilen Strukturen (**Abb. 2b**) inklusive ihrer elektronischen und Vibrationspektren. Basierend auf dem weitgehenden Verständnis der konvention-

Optimiert geflogen

Einige Pflanzen, darunter die Familie der *Dipterocarpaceae*, haben Samen oder Früchte mit Flügeln entwickelt. Forscher der Universität Oslo haben nun deren Flugeigenschaften untersucht. Zunächst stellten sie ein theoretisches Modell auf, um die Fallkurve mithilfe der Flügelparameter zu beschreiben. Dabei ergibt sich der Fallwinkel aus dem Verhältnis von Länge und Krümmungsradius. Unter der Annahme, dass die Masse der Flügel begrenzt bleibt, folgt ein optimaler Fallwinkel von 100°, den Experimente mit künstlichen Samen aus dem 3D-Drucker bestätigten. Ein Blick in die Natur zeigte, dass auch die Evolution zu diesem Ergebnis kommt: Alle 27 Arten, welche die Forscher untersuchten, haben Flügel mit diesem Fallwinkel entwickelt.

J. Rabault et al., Phys. Rev. Lett **122**, 024501 (2019)



Fotolia / jcsmillly; Fotolia / barnmerwega

nellen Supraleitung lassen sich auch die Eigenschaften möglicher Kandidaten für Hochtemperatursupraleitung bemerkenswert genau vorhersagen. Dennoch wird dieser Weg wahrscheinlich nicht zu einem konventionellen Hochtemperatursupraleiter bei Normdruck führen. Denn metallische Wasserstoffverbindungen – und damit die hohen Schwingungsfrequenzen, die für die Supraleitung nötig sind – lassen sich erst unter hohem Druck realisieren.

In den bereits erwähnten unkonventionellen Supraleitern, beispielsweise den kupratbasierten Hochtemperatursupraleitern, ersetzen andere, meist magnetische Kopplungsmechanismen die in LaH_{10} so wirkungsvolle Gitterkopplung. Im Gegensatz zu konventionellen Supraleitern ist hoher Druck nicht prinzipiell erforderlich, um die magnetischen Eigenschaften zu optimieren. Mit dem sich allmählich herausbildenden gründlichen theoretischen Verständnis solcher unkonventioneller Supraleiter eröffnet sich auch hier die Perspektive, vieler-

sprechende neue Materialfamilien in enger Zusammenarbeit von Theorie und Experiment zu finden.

- [1] A. P. Drozdov et al., arXiv:1812.01561 (2018)
- [2] M. Somayazulu et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 027001 (2019)
- [3] F. M. Grosche, Physik Journal, Februar 2016, S. 29
- [4] N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **21**, 1748 (1968)
- [5] S. Friedemann, Physik Journal, April 2017, S. 18
- [6] N. W. Ashcroft, Phys. Rev. Lett. **92**, 187002 (2004)
- [7] A. P. Drozdov et al., Nature **525**, 73 (2015)
- [8] H. Liu et al., Proc. Nat. Acad. Sci. **114**, 6990 (2017)
- [9] F. Peng et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 107001 (2017)
- [10] Z. M. Geballe et al., Angew. Chem. Int. Ed. **57**, 688 (2018)

Autor

Prof. Dr. F. Malte Grosche, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, Großbritannien

Kurzgefasst

Zackiges Nanographen

Nanographen könnte eines Tages die heutige Mikroelektronik auf Siliziumbasis ersetzen. Weil Form, Größe und Rand die elektronischen Eigenschaften bestimmen, gilt es, die Graphenfragmente gezielt herzustellen. Chemiker und Physiker der U Erlangen-Nürnberg entwickelten kürzlich ein Verfahren mit einer hundertprozentigen Ausbeute von Proben mit Zickzackrand. Während der Synthese kristallisiert die Probe ohne Kontakt zu Sauerstoff, der die Strukturen zersetzen könnte. Zackige Ränder führen zu freier beweglichen Elektronen, was höhere Schaltfrequenzen ermöglicht.

D. Lungerich et al., Nat. Commun. **9**, 4756 (2018)

Kaonen als Kernbausteine

Erstmals ist es gelungen, Anti-Kaonen in Kernmaterie einzubauen und so einen Cluster mit sehr großer Bindungsenergie und hoher Dichte zu erzeugen. Eine internationale Kollaboration nutzte den japanischen Beschleuniger J-PARC, um die Anti-Kaonen herzustellen und anstelle des Neutrons in ^3He -Isotopen zu implantieren. Als Kernbausteine erweisen sich die Anti-Kaonen als stabil im Vergleich zu ihrer Lebensdauer als freie Teilchen. Die Ergebnisse helfen,

den Aufbau extrem dichter Materie, wie sie auch in Neutronensternen vorkommt, zu verstehen.

J-PARC E15 Coll. et al., Phys. Lett. B **789**, 620 (2019)

Actinoide enden wie erwartet

Die Ionisierungsenergien der Elemente Fermium, Mendelevium, Nobelium und Lawrencium ($Z = 100$ bis 103) bestätigen theoretische Vorhersagen, dass die Serie der Actinoiden beim Element Lawrencium abgeschlossen ist. Sie verhalten sich damit analog zur Serie der Lanthanoiden, ihren leichteren chemischen Homologen. Die instabilen Elemente wurden mit Raten von wenigen Atomen pro Sekunde am Tandembeschleuniger der Forschungsorganisation JAEA in Tokai, Japan, erzeugt und in einer Tantalkammer ionisiert.

T. K. Sato et al., J. Am. Chem. Soc. **140**, 14609 (2018)

Daten über Daten

Pan-STARRS1 stellt die weltweit größte digitale Himmelsdurchmusterung vor: Nach dem zweiten Data Release stehen 1,6 Petabyte Daten zu 3 Milliarden Objekten frei zugänglich zur Verfügung.

<https://panstarrs.stsci.edu>



Dr. Jürgen Stuhler, Senior Director Quantum Technologies

Win Schroedinger's cat...

Are you an expert in quantum technology? Meet us at the DPG spring meetings 2019 in Rostock and Regensburg and play the quantum quiz. You have the chance to win a Schroedinger's cat...

...maybe.

TOPTICA's products for quantum technologies

- ▶ Tunable Diode Lasers
- ▶ ps/fs Fiber Lasers
- ▶ Frequency Combs
- ▶ Wavelength Meters
- ▶ Laser Diodes
- ▶ Single Mode Diode Lasers
- ▶ Single Frequency Lasers
- ▶ Customized Solutions

