Supraleitung

QUANTENTECHNOLOGIE · MATERIALIEN

Am 8. April 1911 notierte Heike Kamerlingh Onnes in Leiden drei Worte in sein Laborbuch: „Kwik nagenoeg nul“, Quecksilber praktisch null [1]. Gemeint war der elektrische Widerstand eines dünnen Quecksilberfadens, den er mit flüssigem Helium auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt hatte. Der Widerstand war nicht langsam kleiner geworden, wie man erwartet hatte. Er war unterhalb von etwa 4,2 Kelvin einfach verschwunden.

So entdeckte man die Supraleitung, und es dauerte fast ein halbes Jahrhundert, bis jemand erklären konnte, was da passiert. Die Antwort ist reine Quantenphysik, und zwar eine der wenigen Stellen, an denen sich Quanteneffekte im Großen zeigen, in Kabeln, die man in die Hand nehmen kann, und Magneten, so groß wie ein Lkw.

Strom, der nicht aufhört zu fließen

In einem gewöhnlichen Kupferkabel stoßen die Elektronen ständig mit den schwingenden Atomen des Metalls und mit Verunreinigungen zusammen. Dabei geben sie Energie ab, das Kabel wird warm, und ein Teil des Stroms geht als Wärme verloren. Kühlt man Kupfer ab, wird der Widerstand kleiner, aber er bleibt immer endlich.

Ein Supraleiter verhält sich anders. Unterhalb einer für jedes Material typischen Sprungtemperatur fällt der Widerstand schlagartig auf null, und zwar nicht ungefähr, sondern so genau, dass man einen Strom, den man in einem supraleitenden Ring einmal angeworfen hat, jahrelang kreisen lassen kann, ohne dass er messbar schwächer wird. Für ein Stromnetz wäre das ein Traum. Für die Physiker der Zwanzigerjahre war es ein Rätsel, denn nach der klassischen Physik konnte es so etwas gar nicht geben.

Der schwebende Magnet

1933 fanden Walther Meißner und Robert Ochsenfeld in Berlin eine zweite Eigenschaft, die mindestens so merkwürdig ist. Ein Supraleiter drängt ein Magnetfeld aus seinem Inneren hinaus, sobald er unter die Sprungtemperatur abkühlt [2]. Er ist also nicht einfach ein perfekter Leiter, sondern ein eigener Zustand der Materie, so wie Eis etwas anderes ist als sehr kaltes Wasser.

Diesen Meißner-Ochsenfeld-Effekt kennt man aus den Bildern von kleinen Magneten, die über einer mit Stickstoff gekühlten Keramikscheibe schweben. Wer das einmal live gesehen hat, vergisst es nicht. Der Magnet liegt nicht auf, er hängt einfach ein paar

Millimeter über der dampfenden Scheibe in der Luft, und man kann ihn anstupsen, ohne dass er herunterfällt. Dass er so stabil an seinem Platz bleibt, hat bei diesen Keramiken übrigens noch einen zweiten Grund: Ein Teil des Magnetfelds dringt in feinen Schläuchen in das Material ein und wird dort festgehalten, was den Magneten in seiner Lage fixiert.

Warum Elektronen plötzlich Paare bilden

Die Erklärung lieferten 1957 John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer, nach ihnen heißt sie BCS-Theorie [3]. Ihr Kern ist eine Idee, die zunächst absurd klingt. Elektronen sind negativ geladen und stoßen sich ab. Im Kristallgitter eines Metalls können sie sich aber über einen Umweg doch anziehen.

Man kann es sich so vorstellen: Ein Elektron zieht beim Durchqueren des Gitters die positiv geladenen Atomrümpfe ein wenig zu sich heran. Es hinterlässt eine kleine Spur aus etwas dichterer positiver Ladung, und diese Spur zieht ein zweites Elektron an. Die beiden bilden ein lose gekoppeltes Paar, ein Cooper-Paar, obwohl sie oft Hunderte Atomabstände voneinander entfernt sind. Das Bild hinkt wie jedes Bild, trifft aber den Kern.

Jetzt kommt die Quantenphysik ins Spiel. Einzelne Elektronen sind Fermionen und dürfen nie im selben Zustand sein. Ein Paar aus zwei Elektronen verhält sich dagegen wie ein Boson, und Bosonen dürfen sich alle im selben Quantenzustand sammeln. Genau das tun die Cooper-Paare. Sie bilden einen gemeinsamen Zustand, der sich über das ganze Material erstreckt und in dem alle im Gleichschritt laufen. Ein einzelnes Paar kann nicht mehr an einem Atom hängen bleiben, ohne den ganzen Zustand zu stören, und dafür reicht die Energie bei tiefer Temperatur nicht. Deshalb fließt der Strom ohne Verlust. Für die Theorie gab es 1972 den Nobelpreis.

Die Jagd nach höheren Temperaturen

Das große Problem der Supraleitung ist die Kälte. Klassische Supraleiter wie Quecksilber, Blei oder Niob brauchen flüssiges Helium, das teuer und knapp ist. Jahrzehntelang kletterte der Rekord nur in kleinen Schritten nach oben, und viele Physiker hielten etwa 30 Kelvin für eine natürliche Grenze.

Dann kam 1986 eine Arbeit aus dem IBM-Forschungslabor in Rüschlikon bei Zürich. Georg Bednorz und Alex Müller berichteten, vorsichtig im Titel mit dem Wort „möglich“, von Supraleitung in einer Keramik aus Lanthan, Barium, Kupfer und Sauerstoff bei rund 35 Kelvin [4]. Keramiken galten bis dahin als Isolatoren, niemand hatte dort gesucht. Schon ein Jahr später erhielten die beiden den Nobelpreis, so schnell wie kaum jemand vor ihnen.

Was dann folgte, nannten Zeitgenossen das Woodstock der Physik. Weltweit mischten Labore Kupferoxid-Keramiken in allen denkbaren Kombinationen, und schon 1987 fanden Maw-Kuen Wu, Paul Chu und ihre Kollegen in Alabama und Houston mit Yttrium-Barium-Kupferoxid, kurz YBCO, Supraleitung bei 93 Kelvin [5]. Damit lag die Sprungtemperatur

erstmals über dem Siedepunkt von flüssigem Stickstoff, 77 Kelvin, und Stickstoff ist billig wie Milch. 1993 erreichte eine Quecksilber-Verbindung 133 Kelvin bei normalem Druck [6] (Abb. 1).

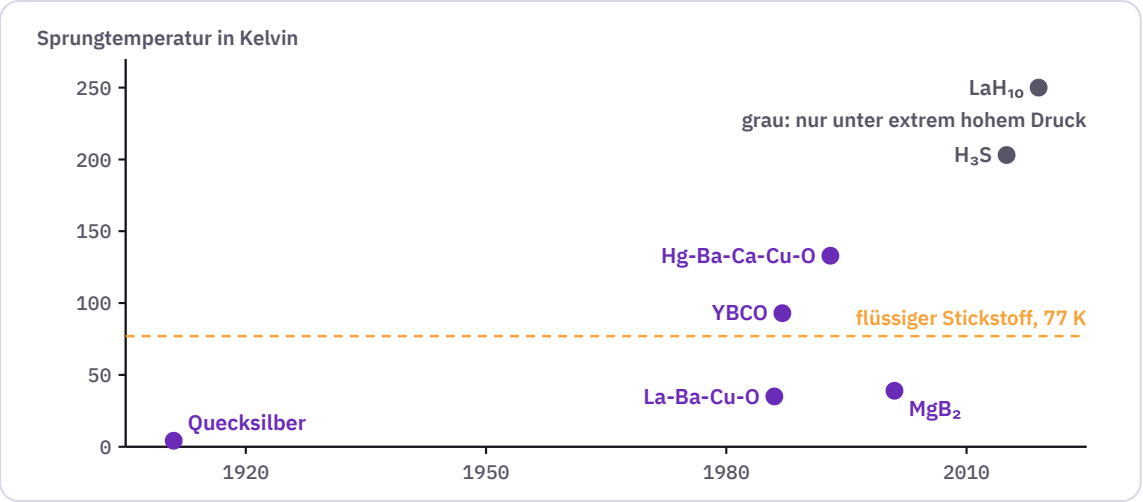


Abb. 1: Einige Meilensteine der Sprungtemperatur. Die grauen Werte für Schwefelwasserstoff und Lanthanhydrid gelten nur unter Drücken von 1,5 bis 1,7 Millionen Atmosphären. Eigene Darstellung nach [1],[4],[5],[6],[7],[8],[9].

Eine Überraschung war 2001 Magnesiumdiborid, ein ganz gewöhnliches Laborchemikal, das bei 39 Kelvin supraleitend wird und jahrzehntelang unbemerkt im Regal gestanden hatte [7]. Und 2015 zeigte eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, dass Schwefelwasserstoff bei 203 Kelvin supraleitet, allerdings nur, wenn man ihn zwischen Diamantspitzen auf rund 150 Gigapascal zusammenpresst [8]. Dieselbe Gruppe kam 2019 mit Lanthanhydrid bei rund 170 Gigapascal auf etwa 250 Kelvin, also minus 23 Grad Celsius [9]. Für eine Stromleitung ist das keine Option, für das Verständnis aber ein wichtiger Hinweis, dass hohe Sprungtemperaturen grundsätzlich möglich sind.

Warum die Kupferoxide so hoch hinaus kommen, ist übrigens noch immer nicht vollständig verstanden. Die BCS-Theorie allein reicht für sie nicht aus, und das ist eines der großen offenen Probleme der Festkörperphysik.

Wo Supraleiter schon heute arbeiten

Die meisten Menschen, die einem Supraleiter begegnen, merken es nicht. Im Inneren fast jedes Kernspintomographen steckt eine supraleitende Spule aus Niob-Titan, gekühlt mit flüssigem Helium, die ein starkes, sehr gleichmäßiges Magnetfeld erzeugt. Ohne Supraleitung wäre ein solcher Magnet ein riesiger Stromfresser.

Ein Extrembeispiel ist der Large Hadron Collider am CERN bei Genf. Damit die Protonen auf ihrer 27 Kilometer langen Bahn bleiben, sind 1232 supraleitende Dipolmagnete aus Niob-Titan nötig, die auf 1,9 Kelvin gekühlt werden und Ströme von fast 12 000 Ampere

führen [10]. Auch die Qubits vieler Quantencomputer sind supraleitende Schaltkreise, und in Japan fährt eine Magnetschwebebahn mit supraleitenden Magneten im Testbetrieb.

Und der Raumtemperatur-Supraleiter?

Ein Material, das bei Zimmertemperatur und normalem Druck supraleitet, wäre eine Sensation. Verlustfreie Stromnetze, billige Magnete, neue Motoren. Kein Wunder, dass Meldungen darüber regelmäßig für Aufregung sorgen, und nicht alle halten. Die Zeitschrift Nature zog 2022 und 2023 zwei Arbeiten einer Gruppe aus Rochester zurück, die Supraleitung bei Raumtemperatur in Hydriden unter Druck gemeldet hatte, wegen Unregelmäßigkeiten bei Daten und Proben [11]. Im Sommer 2023 ging ein Video um die Welt, das ein Stückchen eines Materials namens LK-99 halb schwebend über einem Magneten zeigte. Innerhalb weniger Wochen versuchten Labore in aller Welt, es nachzubauen. Das Ergebnis war ernüchternd. Die beobachteten Effekte ließen sich durch eine Verunreinigung mit Kupfersulfid erklären, und reines LK-99 erwies sich als Isolator [12].

Das ist keine Blamage für die Wissenschaft, sondern zeigt, wie sie funktioniert: Eine außergewöhnliche Behauptung wird so lange überprüft, bis klar ist, was dran ist. Die Suche geht weiter, und wenn ein Raumtemperatur-Supraleiter irgendwann gefunden wird, dann wird er diese Prüfung bestehen müssen.

Zum Weiterlesen

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer Spektrum · ISBN 978-3-662-49093-8

Das Kapitel über Supraleitung erklärt Meißner-Effekt, Cooper-Paare und Hochtemperatur-Supraleiter mit den nötigen Formeln, verständlich für das Grundstudium.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. D. van Delft, P. Kes: *The discovery of superconductivity.* In: Physics Today 63 (2010), Heft 9, S. 38–43, doi:10.1063/1.3490499.

2. W. Meissner, R. Ochsenfeld: *Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit.* In: Die Naturwissenschaften 21 (1933), S. 787–788, doi:10.1007/BF01504252.
3. J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer: *Theory of Superconductivity.* In: Physical Review 108 (1957), S. 1175–1204, doi:10.1103/PhysRev.108.1175.
4. J. G. Bednorz, K. A. Müller: *Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system.* In: Zeitschrift für Physik B 64 (1986), S. 189–193, doi:10.1007/BF01303701.
5. M. K. Wu u. a.: *Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure.* In: Physical Review Letters 58 (1987), S. 908–910, doi:10.1103/PhysRevLett.58.908.
6. A. Schilling u. a.: *Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system.* In: Nature 363 (1993), S. 56–58, doi:10.1038/363056a0.
7. J. Nagamatsu u. a.: *Superconductivity at 39 K in magnesium diboride.* In: Nature 410 (2001), S. 63–64, doi:10.1038/35065039.
8. A. P. Drozdov u. a.: *Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system.* In: Nature 525 (2015), S. 73–76, doi:10.1038/nature14964.
9. A. P. Drozdov u. a.: *Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures.* In: Nature 569 (2019), S. 528–531, doi:10.1038/s41586-019-1201-8.
10. CERN: *LHC Machine Outreach: Magnets.* lhc-machine-outreach.web.cern.ch.
11. E. Conover, J. R. Riordon: *Is this the superconductor of scientists' dreams? A new claim faces scrutiny.* Science News, 7. März 2023, aktualisiert am 7. November 2023. sciencenews.org.
12. D. Garisto: *LK-99 isn't a superconductor — how science sleuths solved the mystery.* In: Nature 620 (2023), S. 705–706, doi:10.1038/d41586-023-02585-7.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Supraleitung.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/supraleitung.html (PDF: https://quanten.de/pdf/supraleitung.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fermionen und Bosonen · Kernspintomographie · Supraleitende Qubits · Spintronik

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/supraleitung.html