

Supraleitung

Vortrag im Rahmen der Fortbildungsreihe „Fundamentale Fragen der Physik“ im Rahmen der von der Universität Bremen angebotenen „Fortbildung für Lehrkräfte“

am Dienstag, dem 4.6.2019, von 17:00 Uhr bis 19:00 Uhr im Seminarraum S1260, Gebäude NW1 (Otto-Hahn-Allee, 28359 Bremen) der Universität Bremen

von Gerd Czycholl, Institut für Theoretische Physik, Universität Bremen

Als Supraleitung bezeichnet man das abrupte Verschwinden des elektrischen Widerstands eines Materials unterhalb einer kritischen Temperatur T_c . Dies wurde erstmals 1911 von dem niederländischen Physiker Heike Kamerlingh Onnes für Quecksilber (Hg) beobachtet, das unterhalb von $T_c = 4,15\text{ K}$ ($= -269\text{ °C}$) supraleitend wird; die Original-Messkurve für Hg ist im linken Teil der Abb. 1 gezeigt. Für diese Entdeckung erhielt Onnes 1913 den Physik-Nobelpreis. Im rechten Teil von Abb. 1 ist die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands des keramischen Kuprat-Systems $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ gezeigt; der Widerstand verschwindet schon bei $T_c = 93\text{ K}$ ($= -180\text{ °C}$). Das ist ein „Hochtemperatur“-Supraleiter, und für die erst 1986 erfolgte Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung wurde der Physik-Nobelpreis

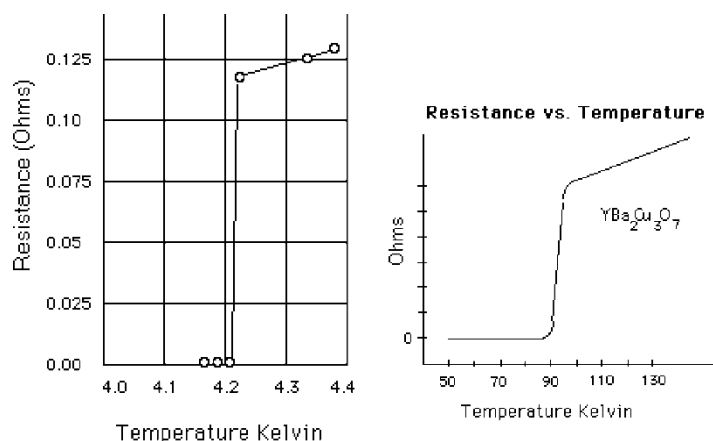


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Hg (links) und von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (rechts)

preis 1987 an Bednorz und Müller verliehen. Vor 3 Jahren wurde berichtet, dass Schwefelwasserstoff (H_2S) supraleitend werden kann mit $T_c = 200\text{ K}$ ($= -70\text{ °C}$), allerdings nur unter extrem hohem Druck. Die letzte Rekordmeldung stammt von 2018 mit einer supraleitenden Sprungtemperatur von $T_c = 250\text{ K}$ ($= -23\text{ °C}$) für Lanthan-Hydrid (LaH_{10}), auch wieder bei extrem hohem Druck. Für Anwendungen (z.B. zum verlustlosen Transport von Elektrizität oder zur Erzeugung sehr hoher Magnetfelder) wären natürlich Raumtemperatur-Supraleiter bei Normaldruck wünschenswert.

Charakteristisch für den supraleitenden Zustand ist – neben dem Verschwinden des elektrischen Widerstands – insbesondere, dass ein Magnetfeld vollständig verdrängt bzw. abgeschirmt wird, wie es schematisch in Abb. 2 gezeigt ist. Das bezeichnet man auch als Meißner-Effekt, der 1933 experimentell entdeckt wurde. Ein Supraleiter ist also ein perfekter Diamagnet. Das kann man anschaulich (aber nicht voll richtig) über das Induktionsgesetz verstehen. Bringt man einen Supraleiter in ein Magnetfeld, werden Ströme induziert, die nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegen gerichtet sind, also ein Magnetfeld aufbauen, das das äußere Magnetfeld kompensiert. Ein Magnet schwebt daher über einem Supraleiter, weil er von dem durch die supraleitenden Ströme erzeugten Magnetfeld abgestoßen wird; dies hat Anwendungspotential für reibungsfreie Magnet-Lager. Dies funktioniert allerdings nur bis zu einem oberen kritischen Magnetfeld $H_c(T)$, noch höhere Magnetfelder zerstören die Supraleitung wieder. Auch andere Messgrößen (z.B. die spezifische Wärme) zeigen charakteristische Anomalien beim Übergang in den supraleitenden Zustand.

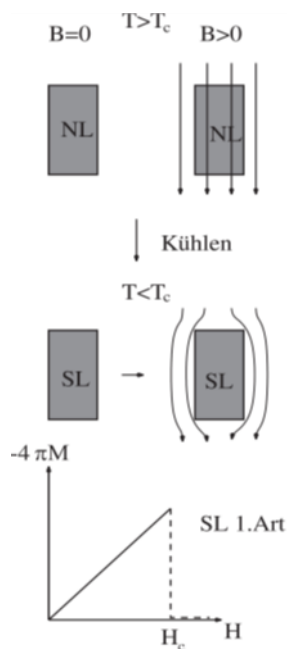


Abb.2: Meißner-Effekt, Verdrängung eines Magnetfeldes aus einem Supraleiter

In dem Vortrag wird zunächst ein Überblick über experimentelle Ergebnisse und die erreichten T_c -Werte verschiedener Materialien und auch über die historische Entwicklung gegeben. Es wird auch der Meißner-Effekt erläutert und der Schwebversuch (Schweben eines Magneten über einem Supraleiter) als Demonstration des Meißner-Effekts – nach Möglichkeit – vorgeführt und der Unterschied zwischen Typ-I- und Typ-II-Supraleitern erläutert. Dann werden verschiedene Ansätze zum Verständnis der Supraleitung erklärt.

Zunächst werden phänomenologische Theorien besprochen, speziell die London-Theorie (ca. 1935 entwickelt von den Brüdern Fritz und Heinz London), mit der man den Meißner-Effekt erklären kann. Im Jahr 1950 verallgemeinerte Fritz London den Ansatz durch Einbeziehung elementarer Ideen der Quantenmechanik und sagte voraus, dass der von einem supraleitenden Ring eingeschlossene magnetische Fluss stets ein ganzzahliges Vielfaches von $h/2e$ sein muss, wobei h Plancksche Konstante und e die Elementarladung bezeichnet. Diese theoretisch vorhergesagte „Flussquantisierung“ wurde experimentell bestätigt und ist (neben dem Quanten-Hall-Effekt) ein Beispiel für ein makroskopisches Quanten-Phänomen. Eine noch bessere phänomenologische Theorie wurde in den 1950er-Jahren von den russischen Theoretikern Ginzburg und Landau entwickelt. Damit ließ sich auch der Unterschied zwischen Typ-I- und Typ-II-Supraleitern erklären (bzw. die Existenz von Typ-II-Supraleitern voraussagen). Eine mikroskopische Theorie der Supra-

leitung wurde schließlich 1957 durch Bardeen, Cooper und Schrieffer entwickelt. Gemäß dieser BCS-Theorie ist die mikroskopische Ursache für die Supraleitung eine anziehende (attraktive) Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen. Dadurch kommt es zu neuen gebundenen Zuständen zwischen den Elektronen, den sogenannten Cooper-Paaren. Da Energie aufzuwenden ist, um ein Cooper-Paar wieder „aufzubrechen“, bleiben diese bei hinreichend tiefer Temperatur erhalten und werden auch durch Störstellen o.ä. nicht zerstört. Die mikroskopische Ursache für die anziehende Wechselwirkung zwischen den – sich elektrostatisch ja eigentlich abstoßenden – Elektronen wird bei den herkömmlichen Supraleitern (und auch bei den neuen Hoch-

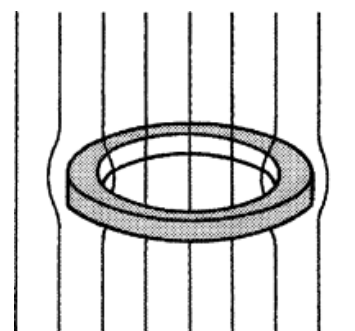


Abb. 3: von supraleitendem Ring umschlossener magnetischer Fluss

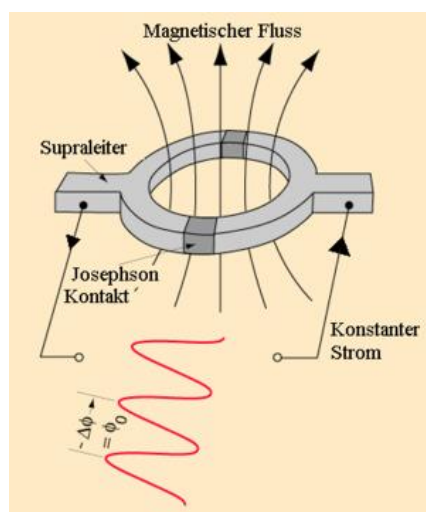


Abb. 4: SQUID

druck-Hybrid-Supraleitern) durch die Gitterschwingungen vermittelt. Bei den Kuprat- („Hochtemperatur“-) Supraleitern muss es aber einen anderen bisher unverstandenen Mechanismus für diese anziehende Wechselwirkung geben.

Im Vortrag wird schließlich auch noch der Josephson-Effekt besprochen, der auf dem quantenmechanischen Tunneln von Cooper-Paaren zwischen 2 Supraleitern durch eine isolierende (oder normalleitende) Barriere beruht. Mit Josephson-Kontakten kann man schnelle Schaltelemente realisieren. Mittels 2 Josephson-Kontakten in einem supraleitenden Ring kann man ein SQUID (superconducting quantum interference device) realisieren, mit dem man (wegen der Fluss-Quantisierung) extrem schwache Magnetfelder bzw. deren Änderung nachweisen kann.