

Supraleitung

Eine Unterrichtsidee von Dr. Matthias Hauck

Das im Folgenden dargestellte Unterrichtsmaterial wurde zur Einbindung des Artikels „Harte Nuss für Theoretiker“ aus der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ zum 100. Jubiläum der Entdeckung der Supraleitung entwickelt [Huebener (2011)]. Es kann im Anschluss an die Einheit Quantenmechanik im Rahmen der Festkörperphysik in der Kursstufe eingesetzt werden. Dieser Artikel wurde unter einer Reihe von Aufsätzen zur Supraleitung ausgewählt, da er auf einem für die Schule verständlichen Niveau die interessante geschichtliche Entwicklung der Supraleitung darstellt. Somit kann er als ideale Ergänzung zu den entsprechenden Experimenten und theoretischen Betrachtungen verwendet werden. Hierzu ist ein entsprechendes Arbeitsblatt mit Fragen zum Text und einigen weiterführenden Fragen diesem WIS-Dokument beigefügt. Das gesamte Unterrichtsmaterial wurde bereits in zwei vierstündigen Physikkursen der gymnasialen Kursstufe in Baden-Württemberg erfolgreich eingesetzt.

Fachgebiet	Physik
Bezug zu	Naturwissenschaft und Technik (NwT)
Thema	Festkörperphysik
Stichwort	Supraleitung, Cooper-Paare, Meißner-Ochsenfeld Effekt, Sprungtemperatur, flüssiger Stickstoff
Klassenstufe	Kursstufe
Zeit	3-4 Stunden

Hintergrundinformationen

Allgemeine Betrachtungen

Das Thema Supraleitung gehört nicht zum Standardstoff der gymnasialen Kursstufe. Gerade im Hinblick auf die dahinter stehende Theorie erscheint es zunächst als viel zu komplex, um es auf ein adäquates Maß fachlich reduzieren zu können. Aus einem strengen quantenmechanischen Blickwinkel und im Hinblick auf die Theorie der Hochenergie-Supraleiter trifft diese Sichtweise uneingeschränkt zu. Die von Bardeen, Cooper und Schrieffer entwickelte und nach ihnen benannte BCS-Theorie zur Erklärung der Supraleitung bei tiefen Temperaturen ist jedoch in einem anschaulichen Modell für Schüler durchaus verständlich [Bardeen et al. (1957)].

Aus diesem Grund war die Supraleitung beispielsweise im Lehrplan der Kursstufe¹ für Baden-Württemberg von 2001 als Wahlmodul innerhalb des Teilbereichs der Festkörperphysik, sowohl im zweistündigen als auch im vierstündigen Physikkurs, enthalten. Hierbei sollte explizit auf grundlegende materialspezifische Eigenschaften von Supraleitern eingegangen und die Theorie der Supraleitfähigkeit erarbeitet werden.

¹ Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.): Lehrplanheft 3/2001. Bildungsplan für die Kursstufe des Gymnasiums.

Im Folgenden werden keine umfassenden theoretischen Betrachtungen zur Supraleitung gemacht. Die entsprechende Theorie ist ganz ausgezeichnet in dem Artikel „Hundert Jahre Zweisamkeit“ aus „Physik in unserer Zeit“ dargestellt [Keimer (2012)]. Dieser Artikel kann ebenfalls im Unterricht verwendet werden, wird gegen Ende jedoch sehr anspruchsvoll.

Zusammenfassend besagt die Theorie zur klassischen Supraleitung unterhalb von 40 K, dass sich in Supraleitern so genannte Cooper-Paare aus zwei Elektronen mit entgegengesetzten Spins bilden [Cooper (1956)]. Diese sind die Ursache für den Suprastrom, der abhängig vom Material ab einer hinreichend tiefen Temperatur, der so genannten Sprungtemperatur, auftritt. Der Spin eines Cooper-Paares ist ganzzahlig, im Gegensatz zum halbzahligen Spin von Elektronen. Bei einem Cooper-Paar addieren sich beide Spins zu Null, wodurch es als Boson nicht mehr dem Pauli-Prinzip unterliegt. Cooper-Paare folgen somit der Bose-Einstein-Statistik wechselwirkungsfreier Teilchen, wodurch die Gesamtheit der Cooper-Paare in der Quantenmechanik durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben werden kann. Hierbei setzt die Kopplung der Elektronen einen Teil ihrer kinetischen Energie in Bindungsenergie um, so dass sich alle Cooper-Paare im Vergleich zu einzelnen Elektronen auf einem tiefer gelegenen Energieniveau befinden. Zur Spaltung der Paare wird diese Energiedifferenz benötigt. Sie ist jedoch höher als die durch Streuung über das Gitter vermittelbare Energie. Auf diese Weise kann keine Energie durch Stoßprozesse verloren gehen, und der Stromfluss ist verlustfrei [Bardeen et al. (1957)].

Die Erklärung der Bildung von Cooper-Paaren, welche die Grundlage der BCS-Theorie bilden, ist für Schülerinnen und Schüler in der Regel nicht einsichtig, da sie über viele Jahre gelernt haben, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen. Um dies plausibel zu machen, muss man den Schülerinnen und Schülern vergegenwärtigen, dass sich in einem Festkörper neben den Elektronen auch positiv geladene Atomrümpfe befinden. Bei klassischen Supraleitern sind diese von großer Bedeutung zur Beschreibung des Kopplungsprozesses.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, zieht ein Elektron, das sich durch das Metallgitter des Leiters bewegt, die Atomrümpfe ein wenig zu sich heran und erzeugt somit eine lokale Polarisation des Gitters. Diese lokale Gitterpolarisation ist vergleichbar mit einer positiven Ladung, die ein zweites Elektron mit ent-

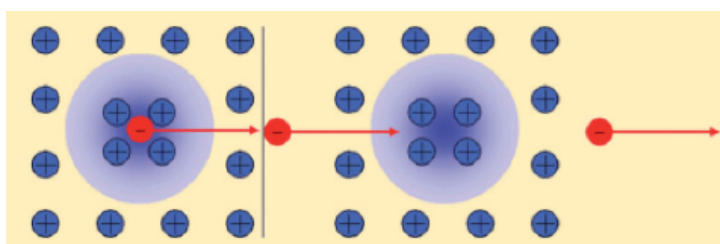


Abbildung 1: Bildung von Cooper-Paaren durch Elektron-Gitter-Wechselwirkung in klassischen Supraleitern [Keimer (2012)].

gegengesetztem Spin anziehen kann. Auf diese Weise koppeln zwei Elektronen über die Wechselwirkung des Gitters miteinander. In manchen Materialien führt dieser Mechanismus zur Bildung von Cooper-Paaren. Die maximale Distanz, bei der diese Bindung noch wirksam ist, definiert die Kohärenzlänge des Cooper-Paares. Sie darf nicht zu klein sein, da in diesem Fall die aufeinander wirkenden Coulomb-Kräfte beider Elektronen die gegenseitige Kopplung zerstören würden. Typische Kohärenzlängen von Cooper-Paaren liegen im Bereich von 10 bis 100 Nanometer.

Der hier beschriebene Mechanismus zur Erklärung der Supraleitung auf Grundlage von Cooper-Paaren funktioniert jedoch nur bei Temperaturen bis etwa 40 K. Darüber hinaus ist die thermische Energie der Schwingungen des Metallgitters zu groß, so dass die Bildung von Cooper-Paaren nicht mehr möglich ist. Die Hochtemperatur-Supraleitung ist daher mit Hilfe der BCS-Theorie nicht zu erklären. Darüber hinaus handelt es sich bei Hochtemperatur-Supraleitern, wie sie erstmals 1986 von Bednorz und Müller bei $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$ mit einer Sprungtemperatur von über 30 K beschrieben wurden, in der Regel nicht mehr um metallische Leiter, sondern um Keramiken [Bednorz und Müller (1986)].

Experimente für die Schule

Das Thema Supraleitung kann experimentell im Unterricht durchaus behandelt werden. Hierzu bieten sich im Besonderen zwei Versuche an: die Untersuchung der Sprungtemperatur eines Supraleiters und der Meißner-Ochsenfeld-Effekt. Die im Folgenden beschriebenen Aufbauten stammen von Leybold-Didactic. In den Experimenten werden ausschließlich Hochtemperatur-Supraleiter verwendet, die sich mit flüssigem Stickstoff kühlen lassen.

Im Umgang mit flüssigem Stickstoff sollten einige Sicherheitsmaßnahmen beachtet werden. So bestehen im Wesentlichen drei Gefahren:

1. Gefahr von Erfrierungen

Der Hautkontakt mit flüssigem Stickstoff kann zu starken Erfrierungen führen. Insbesondere können die Augen durch Spritzer geschädigt werden. Daher sollte man beim Arbeiten mit flüssigem Stickstoff unbedingt eine Schutzbrille aufsetzen und Kleidung tragen, die Arme und Beine vollständig bedeckt.

2. Erstickungsgefahr

Gasförmiger Stickstoff ist im kalten Zustand schwerer als Luft bei Raumtemperatur. Insbesondere in abgeschlossenen Räumen besteht die Gefahr, dass der Sauerstoffgehalt der Luft durch Beimischung von Stickstoff absinkt. Der Mensch besitzt hierfür keine sensorischen Warnsignale, so dass Erstickungsgefahr besteht. Daher sollte unbedingt auf eine gute Durchlüftung des Experimentierraumes geachtet werden.

3. Explosionsgefahr

Flüssiger Stickstoff besitzt eine Siedetemperatur von -196°C . Im Gegensatz hierzu siedet flüssiger Sauerstoff aber bereits bei -183°C . Aus diesem Grund kann der Sauerstoff aus der Luft in den Stickstoff einkondensieren und sich mit der Zeit dort anreichern. Bei Kontakt mit brennbaren Stoffen kann der angereicherte flüssige Sauerstoff explodieren. Deshalb sollte flüssiger Stickstoff beispielsweise nicht längere Zeit in offenen Gefäßen gelagert werden.

a) Bestimmung der Sprungtemperatur

Die Bestimmung der Sprungtemperatur ist für die Schülerinnen und Schüler in der Regel sehr interessant, da sie wissen, dass der Widerstand eines metallischen Leiters mit wachsender Temperatur zu-

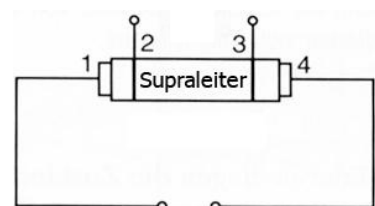


Abbildung 2: Messbaustein zur Bestimmung der Sprungtemperatur des eingebauten Supraleiters.

nimmt. Daher haben sie meist die Vermutung, dass er bei fallender Temperatur bis zu einem bestimmten Wert sinkt, der durch die Struktur des Metallgitters bestimmt wird.

Zur experimentellen Untersuchung der Sprungtemperatur eines Supraleiters wird der in Skizze 2 schematisch dargestellte integrierte Messbaustein verwendet, worin sich ein Hochtemperatur-Supraleiter ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) befindet. Zur Vermeidung systematischer Fehler durch den Widerstand der Zuleitungen wird die Stromstärke zwischen den Punkten 1 und 4 konstant gehalten und die abfallende Spannung über den Kontakten 2 und 3 gemessen. Die Messung erfolgt mit dem Computer-gestützten Messwerterfassungssystem CASSYLAB von Leybold-Didactic. Hierbei wird die Spannung über dem Supraleiter sowie dessen Temperatur aufgezeichnet².

Wird der Messbaustein mit flüssigem Stickstoff abgekühlt, so nimmt der Widerstand zunächst wie erwartet ab. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine entsprechende Messung. Bei einer Temperatur von etwa -180°C tritt offensichtlich ein starker Spannungsabfall über dem stromdurchflossenen Supraleiter auf. Die Temperatur an diesem Spannungsabfall ist die zu bestimmende Sprungtemperatur.

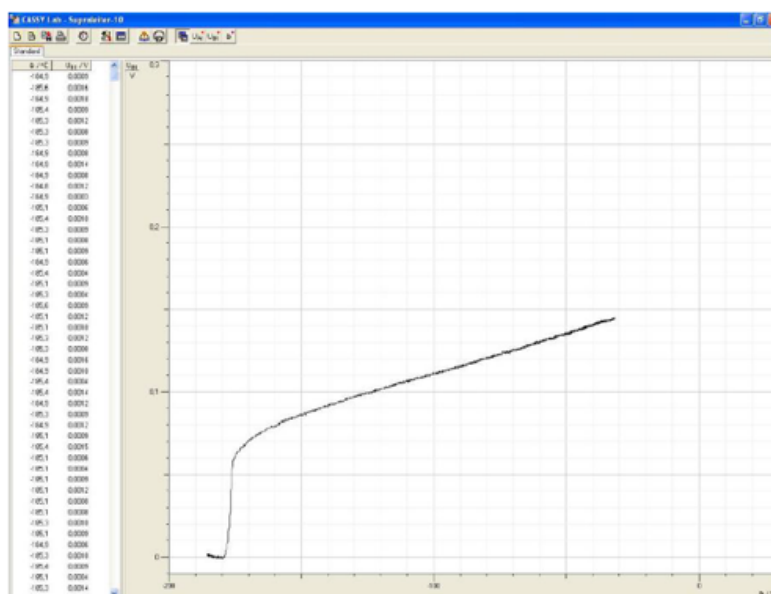


Abbildung 3: Exemplarische Messung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatur-Supraleiters ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Auf der Ordinate ist die Spannung am Supraleiter und auf der Abszisse dessen Temperatur aufgetragen.

Bei diesem Demonstrationsexperiment ist zu beachten, dass die Aufnahme der Messwerte etwa zehn Minuten benötigt, da der Supraleiter zunächst von Raumtemperatur heruntergekühlt werden muss.

b) Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt

In diesem Versuch wird gezeigt, dass unterhalb der Sprungtemperatur Magnetfelder aus dem Inneren eines Supraleiters verdrängt werden, und dieser sich in dem entsprechenden Temperaturbereich wie ein perfekter Diamagnet verhält. Ein Permanentmagnet wird dann



Abbildung 4: Versuchsaufbau zum Meißner-Ochsenfeld-Effekt. In der Schale für den flüssigen Stickstoff befindet sich das schwarze Supraleiter-Pellet, darüber der graue Permanentmagnet. Die Pinzette dient zur Positionierung des Magneten über dem Supraleiter im Stickstoffbad.

² Leybold Didactic. Versuch zur Sprungtemperatur von Supraleitern. Gebrauchsanweisung 667 552. <http://www.ld-didactic.de/ga/6/667/667552/667552de.pdf> [zuletzt aufgerufen am 14. Januar 2014]

vom Supraleiter abgestoßen und schwebt in einem gewissen Gleichgewichtsabstand über ihm.

Das Versuchsmaterial für die Demonstration des Effekts im Unterricht zeigt Abbildung 4. Hierbei wird ein Supraleiter-Pellet verwendet, dessen Sprungtemperatur über der Temperatur von flüssigem Stickstoff liegt³.

Dieser Versuch ist recht schnell und in der Regel problemlos durchführbar. Der Supraleiter wird in der Mitte der Schale positioniert und diese wird mit flüssigem Stickstoff gefüllt, bis das Pellet vollständig bedeckt ist. Nach Abklingen des Siedevorgangs des Stickstoffs positioniert man den Magneten mit Hilfe einer Pinzette über dem Supraleiter. Dieser schwebt dann, wie in Abbildung 5 dargestellt, in einem Abstand von etwa 7 mm über dem Pellet. Das Versuchsergebnis ist in zwei Videos festgehalten, die neben diesem Artikel ebenfalls zum Download bereit stehen.



Abbildung 5: Aufnahme des Versuchs zum Meißner-Ochsenfeld Effekt.

Aufgrund der geringen Distanz zwischen dem Magneten und dem Supraleiter ist es unter Umständen sinnvoll, diesen mit Hilfe einer Kamera auf eine Leinwand zu projizieren. Unter Aufsicht der Lehrperson und Einhaltung der Sicherheitsmaßnahmen ist es sogar denkbar, den Magneten von interessierten Schülerinnen und Schülern eigenständig über dem Pellet im Stickstoffbad platzieren zu lassen.

Literatur

J. Bardeen, L.N. Cooper und J.R. Schrieffer (1957). *Microscopic Theory of Superconductivity*. Physical Review Letters, 106(1):162–164.

J.G.Bednorz und K.A.Müller (1986). *Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*. Z. Phys. B 64: 189–193.

L.N. Cooper (1956). *Bound electron pairs in a degenerate fermi gas*. Physical Review Letters, 104(4): 1189–1190.

R.P. Huebener (2011). *Harte Nuss für Theoretiker*. Physik in unserer Zeit, 42: 14–20.

B. Keimer (2012). *Hundert Jahre Zweisamkeit*. Physik in unserer Zeit, 43: 128–135.

³ Leybold Didactic. Versuch zum Meißner-Ochsenfeld Effekt. Gebrauchsanweisung 667 551. <http://www.ld-didactic.de/ga/6/667/667551/667551de.pdf> [zuletzt aufgerufen am 14. Januar 2014]