

Supraleitung – Strom ohne Widerstand

Im zweiten Teil dieser Artikelserie werden die ersten Grunderscheinungen der Supraleitung ausführlicher beschrieben. Dabei wird im Rahmen dieser Ausführungen vor allem die Messung von Widerstandsanomalien behandelt.

4. Grunderscheinungen der Supraleitung

Das Phänomen der Supraleitung ist nicht nur dadurch gegeben, daß beim Unterschreiten der kritischen Temperatur T_C der elektrische Widerstand eines solchen Leiters sprunghaft und praktisch vollständig verschwindet. Außer diesem Effekt treten noch einige andere Erscheinungen auf, die insbesondere für die Anwendung von großer Bedeutung sind. Nachfolgend werden daher die wichtigsten Erscheinungen im Zusammenhang mit dem supraleitenden Zustand näher erläutert.

4.1 Widerstandsverhalten

Das unterschiedliche Verhalten von Normal- und Supraleitern bei Abkühlung zu sehr tiefen Temperaturen ist noch einmal in Abbildung 7 dargestellt. Während Normalleiter auch beim absoluten Nullpunkt noch einen Restwiderstand besitzen, verschwindet der Widerstand von Supraleitern bei der kritischen Temperatur $T_C > 0K$ praktisch vollständig. Allerdings gilt dieses Verhalten bei Supraleitung nur für Gleichströme.

Bei den ersten Untersuchungen wurde der Widerstand im supraleitenden Zustand über eine Strom-Spannungs-Messung bestimmt. Auf diese Weise konnte festgestellt werden, daß der Widerstand beim Eintritt der Supraleitung um etwa 4 Größenordnungen abnahm. Für das Verständnis dieses Phänomens war es von großem Interesse, die Widerstandsabnahme möglichst genau zu messen, um einen evtl. noch vorhandenen äußerst geringen elektrischen Restwiderstand möglichst exakt bestimmen zu können. Daher wurde für diesen Zweck bereits einige Jahre nach der Entdeckung der Supraleitung eine wesentlich empfindlichere Meßmethode entwickelt und eingesetzt.

Dazu erzeugte man in einem supraleitenden Ring einen elektrischen Kreisstrom und beobachtete dessen Abklingverhalten. Das Prinzip zur Erzeugung eines Dauerstromes

in einem Supraleiter ist in Abbildung 8 skizziert. Ein Ring aus supraleitendem Material – hier Blei, das bereits bei 7,2 K supraleitend wird – wird von einer magnetischen Kraftflußdichte B durchsetzt. Dieses Feld kann z. B. mit Hilfe eines Permanentmagneten erzeugt und durch seine Feldlinien beschrieben werden. In Abbildung 8 sind diese Feldlinien angedeutet. Wird dieses Feld nun für $T > T_C$ abgeschaltet, so wird im Ring ein Stromstoß induziert, der allerdings wegen $R \neq 0$ rasch abklingt. Wenn das Magnetfeld dagegen für $T < T_C$ abgeschaltet wird, so wird durch die längs des Ringes erzeugte Induktionsspannung ein Strom angeworfen, der als Supraleitungsstrom I_S wegen $R = 0$ dauernd fließt. Das von diesem Dauerstrom erzeugte Magnetfeld ist in Abbildung 8 ebenfalls angedeutet und entspricht in seiner Größe gerade dem abgeschalteten Magnetfeld.

Befindet sich nun innerhalb dieses Ringes eine Magnethöhle, so wird sich diese entsprechend der Größe und Richtung des vom Dauerstrom erzeugten Magnetfeldes in einer bestimmten Stellung ausrichten. Eine Veränderung dieser Ausrichtung würde auf eine Abnahme des Ringstromes hindeuten, da dann auch das von diesem erzeugte Magnetfeld abklingen würde. Trotz intensiver Beobachtung über lange Zeiten konnte eine solche Einstellungsveränderung der Magnethöhle nicht registriert werden. Dieses Ergebnis legt den Schluß nahe, daß bei einem Supraleiter unterhalb von T_C der Widerstand in der Tat verschwindet.

Wie empfindlich diese Methode zum Nachweis auch geringster Widerstände ist, soll nachfolgend aufgezeigt werden. In einem supraleitenden Ringleiter, der von einem Dauerstrom I durchflossen wird, ist die gespeicherte Energie durch $1/2 \cdot L \cdot I^2$ gegeben. Wenn eine zeitliche Änderung (Abnahme) dieser Energie aufgrund eines endlichen Widerstandes R vorläge, so würde der Verlust der gespeicherten Energie zu einer Erwärmung des Widerstandes führen. Dieser Ver-

Teil 2

von Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Fellmann
Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik
Fachhochschule Ostfriesland
2970 Emden

lust an gespeicherter Energie entspricht der auftretenden Jouleschen Wärmeleistung $R \cdot I^2$. Die Abnahme der gespeicherten Energie muß also gerade gleich der erzeugten Wärmeenergie sein

$$-\frac{d}{dt} (1/2 \cdot L \cdot I^2) = R \cdot I^2.$$

Daraus folgt die Differentialgleichung

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} \cdot I = 0.$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung liefert

$$I(t) = I(0) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

Dabei sind $I(0)$ der Anfangsstrom zum Zeitpunkt $t = 0$, $I(t)$ der zum Zeitpunkt $t > 0$ noch vorhandene Strom, R der Widerstand und L die Induktivität des Ringleiters.

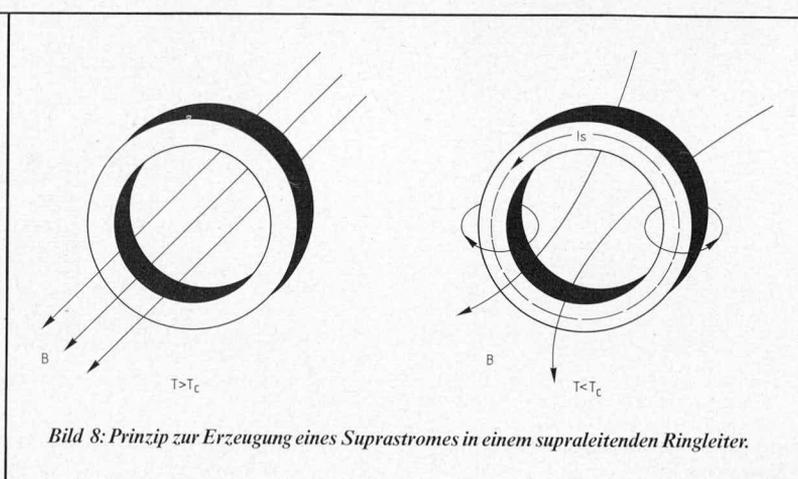
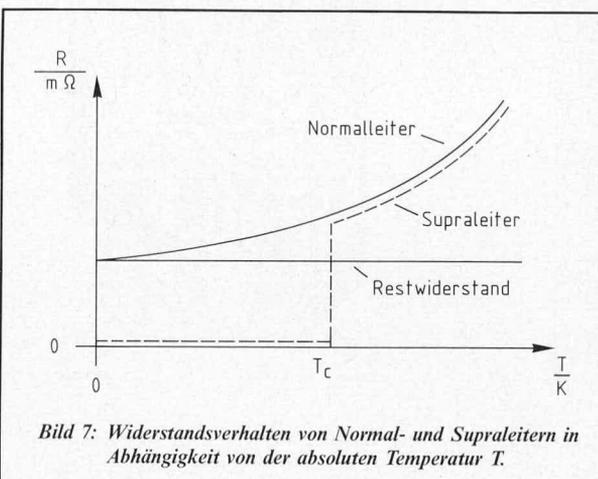
Aus dieser Beziehung folgt, daß jeder im Ring kreisende Anfangsstrom $I(0)$ exponentiell mit wachsender Zeit gegen Null abklingt. Bei Normalleitern (Widerstand $R \neq 0$ für $T > T_C$) ist der Strom bereits nach einigen Millisekunden abgeklungen. Dagegen gilt im supraleitenden Zustand $R = 0$, so daß aus der obigen Beziehung $I(t) = I(0)$ folgt. Daher wird hier ein Anfangsstrom $I(0)$ nicht auf Null abnehmen, sondern ohne Änderung seiner Größe auf unbestimmte Zeit im Ring kreisen. Diese Aussagen sollen im folgenden an 2 Beispielen erläutert werden.

Nimmt man für die Induktivität des Ringleiters den realistischen Wert $L = 1,5 \cdot 10^{-7} H$ ($1 H = 1 \frac{Vs}{A} = 1$ Henry) und den Widerstandswert $R = 1 \Omega$ an, so gilt gemäß obiger Beziehung nach einer Millisekunde

$$\frac{I(t = 1 \text{ ms})}{I(0)} = e^{-15} = 3 \cdot 10^{-7}.$$

Der Anfangsstrom $I(0)$ ist also bereits nach 1 ms um fast 7 Größenordnungen abgeklungen.

Fragt man umgekehrt danach, wie groß der Widerstand sein müßte, damit bei dem Ringleiter mit der Induktivität $L = 1,5 \cdot 10^{-7} H$ der Ringstrom nach einer Beobachtungszeit



von 2 Stunden um 1 % abnimmt, so folgt aus obiger Beziehung

$$R = -\frac{L}{t} \cdot \ln \frac{I(t)}{I(0)} = -\frac{1,5 \cdot 10^{-7} \text{ H}}{7,2 \cdot 10^3 \text{ s}} \cdot \ln 0,99 = 2,1 \cdot 10^{-13} \Omega.$$

Bei der genannten geringen Abnahme des Dauerstroms nach 2 Stunden Beobachtungszeit darf also der Widerstand des Ringleiters nicht größer als $2 \cdot 10^{-13} \Omega$ sein. Die Messung dieser kleinen Widerstände bzw. deren Änderung kann nicht – wie oben beschrieben – mit der Auslenkung einer Magnetnadel im magnetischen Feld des Dauerstroms erfolgen.

Daher wurde von Kamerlingh Onnes und auch späteren Experimentatoren eine erheblich empfindlichere Meßanordnung gewählt, deren Prinzip in Abbildung 9 skizziert ist. Mit dem oben beschriebenen Induktionsvorgang wird in den zwei Ringleitern ein Dauerstrom angeworfen, der beide Ringleiter in parallele Lage auszurichten versucht. Der innere Ringleiter wird durch Verdrehung des Fadens so aufgehängt, daß er aus der Parallellage herausgedreht ist. Die von dem Faden und dem Dauerstrom herrührenden Momente halten sich das Gleichgewicht. Ein parallel zum feststehenden äußeren Ringleiter einfallender Lichtstrahl trifft auf einen am Faden befestigten Spiegel und wird dort reflektiert. Der reflektierte Strahl erreicht eine Skala, auf der geringste Veränderungen der Gleichgewichtslage abgelesen werden können. Solche Veränderungen wären dann ein Hinweis für die Abnahme der Supraströme. Bei keinem dieser Experimente konnte je eine Änderung der Dauerströme festgestellt werden.

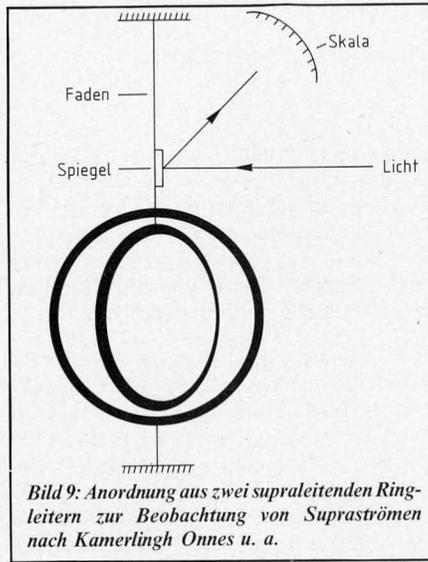


Bild 9: Anordnung aus zwei supraleitenden Ringleitern zur Beobachtung von Supraströmen nach Kamerlingh Onnes u. a.

Durch die Verwendung von Ringleitern mit kleinstmöglicher Induktivität L und durch Steigerung der Beobachtungszeit konnte die Empfindlichkeit dieser Meßanordnungen noch erheblich gesteigert werden. Aus solchen Untersuchungen weiß man heute, daß der Widerstandssprung beim Übergang in den supraleitenden Zustand etwa 15 Größenordnungen beträgt. Dieser Zahlenwert wird etwas anschaulicher, wenn man zum Vergleich einen der besten metallischen Leiter – Kupfer – heranzieht. Dann kann gesagt werden, daß der Unterschied der Widerstände zwischen reinem Metall im supraleitenden und im normalleitenden Zustand mindestens so groß ist, wie zwischen Kupfer und guten gängigen Isolatoren. Zusammenfassend darf daher gesagt werden, daß der elek-

trische Widerstand im supraleitenden Zustand Null wird, solange jedenfalls nur Gleichströme betrachtet werden.

Der Übergang vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand hängt in starkem Maße vom Ordnungszustand der Probe ab. Bei reinen Metallen nimmt der Widerstand mit sinkender Temperatur um so plötzlich ab, je weniger Verunreinigungen das Metall enthält und je idealer dessen Kristallstruktur ist. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 10 für verschiedene Zinn-Proben dargestellt. Wenn optimale Verhältnisse vorliegen – z. B. der Kurvenverlauf für einen extrem reinen Sn-Einkristall in Abbildung 10 –, genügt eine Temperaturabnahme von etwa 10^{-3} K , um den Widerstand unter die Meßgrenze absinken zu lassen. Für andere Kristallstrukturen des gleichen Metalls verläuft der Übergang zwischen normalleitender und supraleitender Phase weniger abrupt. Ähnlich liegen die Verhältnisse auch bei den neuen Hochtemperatursupraleitern.

Wie schon erwähnt, ist der Widerstand bei Supraleitung nur für Gleichströme wirklich Null. Bei Wechselströmen hängt der Widerstand dagegen sowohl von der Frequenz als auch von der Temperatur der Probe ab. Dieses Verhalten ist in Abbildung 11 skizziert. Wenn die Temperatur der Probe deutlich unterhalb der Sprungtemperatur T_c liegt, dann ist zwar der Widerstand für kleine Frequenzen auch hier Null, steigt aber bei einer kritischen höheren Frequenz nahezu abrupt auf seinen Wert bei Normalleitung an. Für den Fall, daß die Probentemperatur sich knapp unterhalb der Sprungtemperatur befindet, nimmt der Widerstand mit wachsender Frequenz nahezu gleichmäßig zu, um auf den

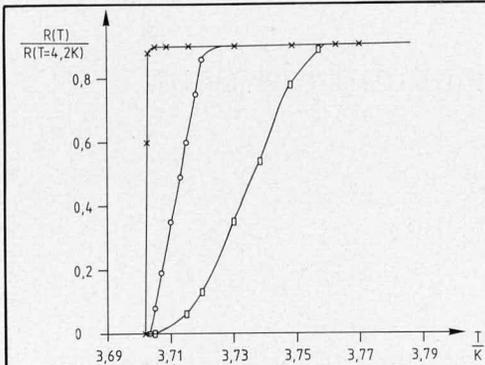


Bild 10: Übergang vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand für verschiedene Zinn-Proben.
x-x = extrem reiner Sn-Einkristall
o-o = extrem reiner grobkristalliner Sn-Draht
□-□ = älterer polykristalliner Sn-Draht.

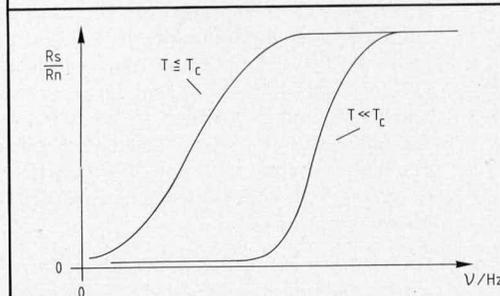


Bild 11: Das Verhältnis der Widerstände R/R_n im supraleitenden (R_s) und normalleitenden (R_n)-Zustand in Abhängigkeit von der Frequenz mit der absoluten Temperatur T als Parameter.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}$$

$$\frac{E}{\Delta T}$$

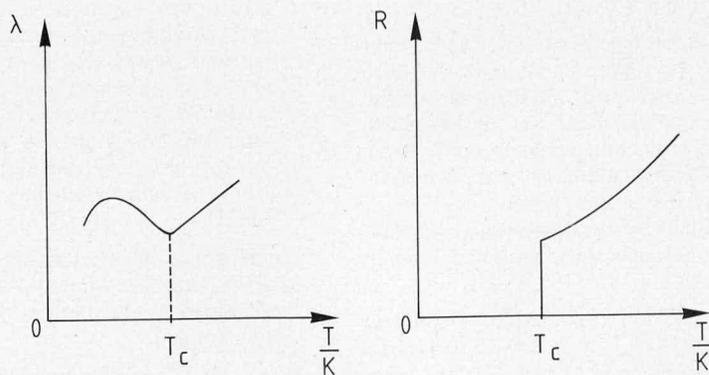
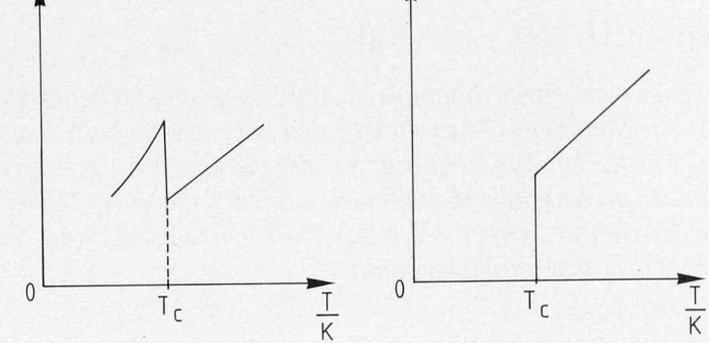


Bild 12: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität c , der thermoelektrischen Empfindlichkeit $E/\Delta T$, der Wärmeleitfähigkeit λ und des Widerstandes R .

Wert im Normalzustand überzugehen. Insgesamt gilt daher, daß bei ausreichend hohen Frequenzen der Widerstand im supraleitenden Zustand mit dem Wert im Normalzustand übereinstimmt. Die dazu erforderlichen Frequenzen bewegen sich im Mikrowellen- bzw. im langwelligen Infrarotbereich.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß nach Abkühlung supraleitender Substanzen unter die kritische Temperatur T_C nicht nur deren elektrischer Widerstand abrupt verschwindet, sondern daß bei anderen Materialeigenschaften unter diesen Umständen abrupte Änderungen auftreten. Auch diese Änderungen treten bei der Temperatur T_C sprunghaft auf. Unterhalb von T_C unterscheiden sich eine Reihe von Materialeigenschaften von denen oberhalb der kritischen Temperatur. In Abbildung 12 ist dieser

Sachverhalt für einige Beispiele dargestellt.

Die spezifische Wärmekapazität

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

nimmt mit sinkender Temperatur T ab. Dabei sind ΔQ die zugeführte Wärmemenge, m die Masse der Substanz und ΔT die erreichte Temperaturerhöhung. Bei der kritischen Temperatur steigt c jedoch plötzlich an und zeigt unterhalb der Sprungtemperatur ein anderes Verhalten als oberhalb von T_C .

In normalleitenden Materialien entsteht durch eine Temperaturdifferenz ΔT ein elektrisches Feld E im Leiter. Der Quotient $E/\Delta T$ ist definitionsgemäß die thermoelektrische Empfindlichkeit des Materials. Bei der kritischen Temperatur verschwindet in einem Supraleiter die thermoelektrische Empfindlichkeit genauso abrupt wie der Widerstand.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Wärmeleitfähigkeit λ eines Supraleiters. Bei der kritischen Temperatur T_C ändert sich die Größe λ abrupt, um unterhalb von T_C ein anderes Verhalten als oberhalb von T_C zu zeigen.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, daß bei der Übergangstemperatur T_C nicht nur der Widerstand sein Verhalten abrupt verändert, sondern daß dies auch auf andere Materialeigenschaften eines Supraleiters zutrifft.

Diese mehrteilige Artikelserie wird fortgesetzt mit der Behandlung des Verhaltens von Supraleitern in Magnetfeldern einerseits und mit der Beschreibung der Bedeutung von kritischem Strömen andererseits. In einem weiteren Beitrag werden die physikalische Deutung des Phänomens Supraleitung und praktische Beispiele zur Anwendung der Supraleitung beschrieben.