

G. Koppelman / W. Schneider / G. Sinn

Experimente zur Hochtemperatur-Supraleitung

Mit einer in flüssigem Stickstoff gekühlten Keramikscheibe aus Yttrium-Barium-Kupferoxyd läßt sich die Supraleitung leicht demonstrieren. In Ergänzung zum bekannten Schwebeversuch der Scheibe über einem Magneten (Demonstration des Meißner-Ochsenfeld-Effekts) wird das Verhalten einer im Streufeld vor dem Pol eines modifizierten Elektromagneten pendelnd aufgehängten Supraleiterscheibe untersucht und dem analogen Thomsonschen Ringversuch gegenübergestellt. Die Wirkung der Induktionsströme im Metallring und im Supraleiter können gleichzeitig vorgeführt werden. In einer Reihe qualitativer Experimente lassen sich die wichtigsten Eigenschaften von Supraleitern beim Ein- und Ausschalten magnetischer Gleich- und Wechselfelder zeigen. – Zur direkten Messung des elektrischen Widerstandes an Hochtemperatur-Supraleitern im Schulunterricht mit Demonstrationsinstrumenten werden (basierend auf der bekannten Vierpol-Meßmethode) ein einfaches Verfahren zur Kontaktierung der Supraleiterscheiben sowie eine Schaltung für einen preiswerten Vorverstärker angegeben. Qualitative Versuche zum Verschwinden des elektrischen Widerstandes bei der Sprungtemperatur sowie auch zur kritischen Stromstärke können damit realisiert werden.

1. Einleitung

Supraleitung tritt erst unterhalb einer kritischen Temperatur T_c auf, die bei Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) aus Yttrium-Barium-Kupferoxyd-Keramik bei 90 K liegt, so daß eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff ($T = 77$ K) ausreicht. Das Erreichen des supraleitenden Zustandes wird häufig durch den spektakulären Schwebeversuch zur Demonstration des Meißner-Ochsenfeld-Effektes im Schauversuch für kleine Gruppen nachgewiesen [1–8]. Im folgenden werden zwei weitere Versuche beschrieben [9], die es gestatten, mit relativ einfachen Mitteln das Erreichen des supraleitenden Zustandes einer Supraleiterprobe nachzuweisen und auch ohne großen Aufwand einem größeren Zuschauerkreis vorzuführen. Es handelt sich um eine Modifizierung des Thomson'schen Ringversuchs und um den direkten Nachweis des Verschwindens des elektrischen Widerstandes der Supraleiterprobe.

2. Thomsonscher Ringversuch

Für diesen Versuch wählten wir die in Abbildung 1 gezeigte Anordnung [10, 11]. Hier ist der Ring bifilar aufgehängt und der Weicheisenkern entsprechend horizontal angeordnet – in Abweichung zu der üblichen senkrechten Anordnung [6, 7, 12, 13]. Die supraleitende Probe ist ebenfalls bifilar aufgehängt und befindet sich vor dem Ende des Weicheisenkerns. Diese Anordnung hat u.a. folgende Vorteile:

- Durch die Kompensation der Schwerkraft reichen kleinere Magnetfelder aus bzw. es können auch nur noch schwach supraleitende Proben verwendet werden, mit denen der Schwebeversuch nicht mehr durchgeführt werden kann.
- Durch eine einfach zu realisierende Schatten- oder Videoprojektion kann der Versuch einem größeren Zuschauerkreis vorgeführt werden, und es können auch noch kleine Ausschläge nachgewiesen werden.

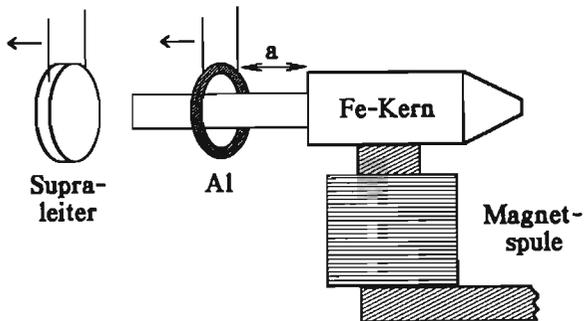


Abb. 1 Thomsonscher Ringversuch und Abstoßung einer bifilar aufgehängten SL-Scheibe im Magnetfeld

- Durch diese empfindliche Nachweismethode lassen sich die Phänomene beim Ein- und Ausschalten des Magnetfeldes genauer untersuchen und vorführen.
- Die Supraleitung kann direkt an die Induktion angeschlossen werden, was einen wichtigen methodischen Gewinn darstellt. Man kann direkt der oft bei der Vorführung des klassischen Ringversuchs von Schülern gestellten Frage nachgehen, was bei einem Ring mit gegen Null strebendem Widerstand im Versuch passieren würde.

Zur Magnetfelderzeugung werden ein Leybold-Elektromagnet mit U-Kern, eine Spule mit 250 Windungen (4Ω) und ein durchbohrter Polschuh verwendet. Spulen mit einem max. zulässigen Dauerstrom von 2,5 A können kurzzeitig (5–10 Sek.) bis auf das Doppelte oder Dreifache belastet werden (mit nachfolgenden entsprechenden Abkühlungspausen). Ein Weicheisenstab (\varnothing 10 mm, Länge 7–10 cm) wird in einen durchbohrten Polschuh geschraubt, um ein maximales Magnetstrefelfeld in Eisenstab-Richtung zu erzeugen (Abb. 1). Die Gleichspannungsquelle und der Transformator für Wechselspannung müssen eine möglichst hohe Ausgangsstromstärke liefern (= 25 V, 8 A; \approx 150 V, 4 A). Den Aufbau kann man mit einer 6 V, 30 W – Punktlicht-Lampe in Schattenprojektion zeigen; der nicht benötigte Versuchsteil wird zweckmäßigerweise abgeschattet.

Wir verwendeten einen leichten metallischen Ring, aus Aluminium (\varnothing 20 mm, Dicke 2 mm), der mit zwei ca. 0,5 m langen, dünnen Seidenfäden bifilar im Abstand $a = 1-3$ cm vom Polschuh über dem Eisenstab aufgehängt wird. An der vor dem Eisenstabende hängenden Supraleiterscheibe werden die Fäden mit einem Tiefkühletikett befestigt, das auch bei 77 K seine Klebefähigkeit behält. Eine (nicht mehr lösbare) Fixierung mit Sekundenkleber ist auch möglich.

Die Fäden für Ring und Supraleiterprobe werden zweckmäßigerweise (leicht verschiebbar) über einen horizontalen Stativstab aufgehängt, der parallel etwa 0,5 m über dem Weicheisen-Magnetstab von einem getrennten Stativ (Dreieckstativfuß mit Stellschrauben mit vertikalem 0,5 m – Stativstab und Kreuzmuffe) gehalten wird. Eine Freihand-Seiten- und Höheneinstellung bereitet dann keine Probleme.

2.1. Aluminium-Ring im magnetischen Gleichfeld

Schaltet man den Gleichstrom ein, so wird der Aluminium-Ring um ca. 2 cm schnell, (unabhängig von der Polung) abstoßend ausgelenkt und kehrt dann relativ langsam (wie „in Honig“) gedämpft in die Ruhelage zurück; ein Supraleiterring sollte in der ausgelenkten Position bleiben. – Nach dem Ausschalten des Spulenstroms erfolgt eine schnelle etwa gleich große entgegengesetzte Auslenkung des Ringes; danach aber schwingt der Ring praktisch ungedämpft. – Unverständlich erscheint zunächst das asymmetrische Verhalten der Abklingbewegung. Lenkt man jedoch den Ring bei eingeschaltetem Strom mechanisch aus, so beobachtet man ebenfalls eine stark gedämpfte Schwingung. Man hat es hier aufgrund des stark inhomogenen Magnet-Streifelfeldes längs des Eisenstabes mit einer erheblichen Wirbelstrombremsung und nicht mit einem Effekt durch das Abklingen der induzierten Ringströme zu tun. Die Abklingzeit dieser Ströme beträgt nämlich Mikro- bis Millisekunden, wie eine Überschlagsrechnung zeigt:

Für den Abklingstrom gilt: $I(t) = I_0 \exp(-(R/L)t)$; für einen Kreisring $2d = 2 \text{ mm}$, $2r = 20 \text{ mm}$ beträgt die Selbstinduktion L nach [1]: $L = \mu_0 r (\ln(r/d) + 0.23) \approx 32 \cdot 10^{-9} \text{ H}$. Ferner gilt: $R = \rho \cdot U/F$, $U = 2\pi r$, $F = \pi d^2/4$; für Aluminium $\rho = 0.03 \text{ } \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ ergibt sich $R = 8 \rho r/d^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega$, d.h. eine Zeitkonstante $\tau = L/R \approx 10^{-5} \text{ s}$. Die Dauer der Pendelschwingung ist bei $l = 0.5 \text{ m}$ dagegen $T = 2\pi \sqrt{l/g} \approx 1.5 \text{ s}$.

Verschiebt man den Ring in den Bereich des schwächeren Magnetfeldes am Eisenstabende ($a = 7-10 \text{ cm}$), so werden die Auslenkungseffekte deutlich geringer. Jenseits des Stabendes (in der Position des Supraleiters Abb. 1) ist kaum noch ein Effekt zu beobachten; dort ist das Magnetfeld ein bis zwei Zehnerpotenzen kleiner. – Kühlt man übrigens den Ring mit flüssigem Stickstoff, so beobachtet man bei eingeschaltetem Strom (in der ursprünglichen Lage des Ringes $a = 1-3 \text{ cm}$) einen deutlich langsameren Rücklauf. Wegen des um fast eine Größenordnung verringerten metallischen Widerstandes ist die Wirbelstromdämpfung erheblich stärker.

2.2. Supraleiter im Gleichfeld

Wenn wir den Thomson-Versuch mit einem Ring aus supraleitendem Material durchführen könnten, dann würden die einmal induzierten Dauerströme bestehen bleiben und die Auslenkung bliebe zeitlich konstant. – Praktisch können wir den Versuch nur mit einer Supraleiterscheibe in dem um Größenordnungen schwächeren Magnetfeld vor dem Ende des Eisenstabes vorführen. Schaltet man nach dem Abkühlen der Supraleiterscheibe (durch Eintauchen in flüssigen Stickstoff in einer Styropor-Schale) das Magnetfeld ein, so wird die Probe um ca. 1–2 cm in eine stabile Lage ausgelenkt¹. Nach Erwärmung der Supraleiterscheibe auf $T \geq T_c$ bricht die Supraleitung allerdings nach ca. 5 Sek. zusammen. Der Supraleiter geht dann (infolge der im Volumen allmählich abklingenden Rest-Dauerströme) langsam in die Ruhelage zurück. – Schaltet man dagegen das Magnetfeld nach der Auslenkung der gekühlten Probe ab, kehrt der Supraleiter natürlich schnell und ungedämpft in die Ausgangsstellung zurück.

¹ Angefachte kleine Restschwingungen können mechanisch, z.B. mit einem weichen Pinsel, abgedämpft werden.

Nach dem Einschalten des Magnetfeldes steht die ausgelenkte Supraleiterscheibe senkrecht zu den Feldlinien. Seitlich angestoßen schwingt sie, sich leicht drehend, senkrecht zu den divergent aus der Eisenstabendfläche austretenden Feldlinien. – Bei einer mechanischen Zwangseinstellung der supraleitenden Scheibe mit einer nicht magnetisierbaren Pinzette in eine beliebige Stellung zum Magnetfeld bleibt sie jedoch interessanterweise in dieser Lage stabil stehen und schwingt angestoßen auch hier wieder sich nach den Feldlinien orientierend. – Dieser Effekt läßt sich wahrscheinlich nur aufgrund von im Supraleitermaterial „eingefrorenen Magnetflüssen“ verstehen. Hochtemperatur-Supraleiter sind sog. Supraleiter 3. Art, in die Magnetfelder etwas eindringen und dort an Störstellen auch festgehalten werden (Pinning). Andere Beobachtungen weisen ebenfalls auf diese Effekte hin [3].

2.3. Aluminium-Ring im Wechselfeld

Mit Wechselstrom wird der Aluminium-Ring zeitlich konstant abstoßend ausgelenkt. Durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld werden fortgesetzt Ringströme induziert, die jeweils zu einem abstoßenden Dipol-Magnetfeld führen. – Praktisch versucht auch der Ring sich möglichst parallel zum Stab zu drehen. Das Wechselfeld führt übrigens zu kleinen Oszillationen mit 5–10 Hz um die Querlage.

2.4. Supraleiter im Wechselfeld

Der gekühlte Supraleiter wird im magnetischen Wechselfeld abstoßend ausgelenkt, da auch hier abstoßende Ringströme wechselnden Vorzeichens induziert werden. – Die Supraleiterscheibe schwingt übrigens auch hier zunächst sehr stark um ihre stabile Auslenkungslage, die man aber durch mechanische Dämpfung einstellen kann. Alle weiteren Versuche sind wie im Gleichstromfeld durchführbar.

3. Direkte Widerstandsmessung an Hochtemperatur-Supraleitern mit Demonstrationsmeßgeräten

Das Hauptproblem bei der Messung des Widerstandes an keramischen Supraleitern ist der große Kontaktwiderstand zwischen Meßspitzen und Keramik-Supraleiter. Er liegt im Bereich einiger Ohm, während der eigentliche Probenwiderstand wenige Milliohm beträgt. Bei der üblicherweise verwendeten Vierpunkt-Meßmethode (Abb. 2a) [5, 7, 14–18] wird über die äußeren Elektroden ein Prüfstrom i_{14} durch die Probe geschickt und der Spannungsabfall U_{23} zwischen den beiden inneren Elektroden gemessen. Bei Verwendung eines sehr „hochohmigen“ Voltmeters wird die Spannungsmessung unabhängig vom Kontaktwiderstand, und der Spannungsabfall U_{23} ist dann ein direktes Maß für den Probenwiderstand.

3.1. Praktischer Aufbau zur Vierpunkt-Meßmethode

Als Kontaktierverfahren haben sich mechanisch kontrollierbare Preßkontakte als besonders geeignet erwiesen. Die empfohlene Herstellung von Indium-Kontakten [14] hat sich in unseren Versuchen nicht bewährt; da der Supraleiter angeritzt werden muß, zerspringt häufig die

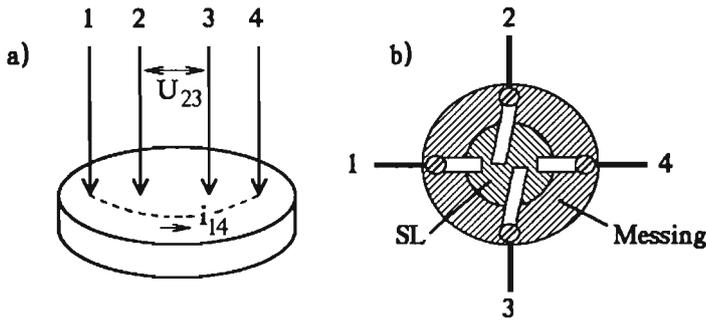


Abb. 2a Vierpunkt-Meßmethode zur Messung kleinster Widerstände, b): Praktischer Aufbau

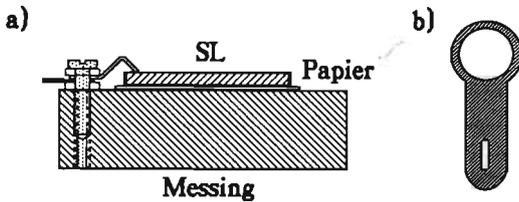


Abb. 3a Aufbau für die Vierpunkt-Meßmethode, b): Flach-Lötösen

Scheibe infolge Sprödigkeit des Materials. Außerdem sind diese Kontakte wegen der großen Temperaturänderungen ($T = 300\text{ K} - 77\text{ K}$) während der Messung mechanisch instabil und müssen meist nach jedem Versuch neu präpariert werden.

Unsere Anordnung besteht aus einem Messingblock (ca. $\varnothing 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, Abb. 2b) mit guter Wärmeleitfähigkeit bei der Kühlung, auf dem die Probe aufliegt. Vorher legt man dünnes Papier zur elektrischen Isolation auf den Block. In vier Gewinden werden Kunststoffschrauben befestigt, mit denen die Federkontakte unter Verwendung passender Kunststoff-Unterlegscheiben auf den Supraleiter angedrückt werden (Abb. 3a). Die Meßleitungen werden zu Schlaufen gebogen und ebenfalls zwischen den Unterlegscheiben eingeklemmt (sicherer Klemm-Kontakt). Die Federkontakte bestehen z.B. aus geeigneten Flach-Lötösen (Abb. 3b), deren Lötsteg zu einer Druckfeder gebogen wird. Die gerundete Form des Lötösenhakens ermöglicht einen guten „Spitzen“-Kontakt mit relativ niedrigem Übergangswiderstand. Dieser wird noch kleiner, wenn man vorher die Supraleiterprobe an den vier Punkten mit Leitsilber oder -platin versehen hat.

3.2. Elektrischer Aufbau und Vorverstärker

Um nun die sehr kleine Prüfspannung von wenigen $100\ \mu\text{V}$ und deren Absinken auf 0 Volt mit einem Schul-Demonstrationsmeßgerät nachweisen zu können, muß sie geeignet vorverstärkt werden. Dazu gibt es von verschiedenen Lehrmittelfirmen spannungsempfindliche Meßverstärker, Elektrometer-Verstärker u.ä. Man kann sich einen geeigneten Verstärker

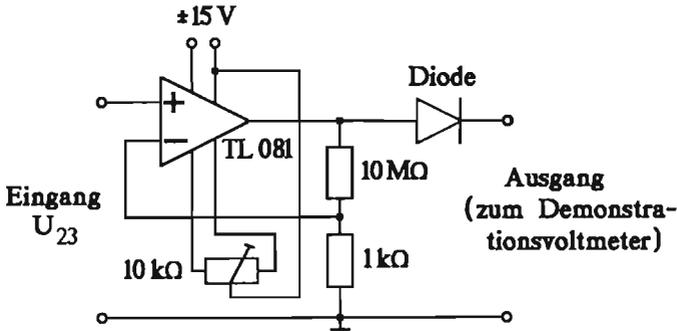


Abb. 4 Empfindlicher Elektrometer-Vorverstärker im Selbstbau

aber auch leicht selbst für wenige Mark aus einigen elektronischen Bauteilen aufbauen. Die Schaltung (Abb. 4) besteht aus einem handelsüblichen Operationsverstärker mit FET-Eingang, zwei Widerständen, die die Größe der Verstärkung bestimmen, einem Offsetspannungsregler und einer Diode. Der Vorverstärker wird zweckmäßigerweise auf einer Lochrasterplatine aufgebaut. Eine Materialliste ist in Tabelle 1 angegeben. Ein Netzgerät liefert die Versorgungsspannung von ± 15 V.

Tab. 1: Materialsatz für Vorverstärker und Probenhalterung zur Messung der Supraleitung

Messingblock 10 mm × 30 mm Ø	Operationsverstärker TL081
4 Flachlötlösen für M4	Widerstand 1 kΩ
4 Kunststoffschrauben M4 × 10	Widerstand 10 MΩ
8 Kunststoffscheiben Ø 4,3	Trimm-Potentiometer 10 kΩ
Lochrasterplatte 50 × 50 mm ²	Si-Diode (z.B. Typ 1 N 41 48)

Wegen des hohen Verstärkungsfaktors von 10^4 ist ein Operationsverstärker mit möglichst niedrigem Offset zu wählen, z.B. ein TL 081. Dieser Offset, der sich aus der Differenz der Beträge der positiven und negativen Versorgungsspannung ergibt, liegt nämlich neben dem eigentlichen Meßsignal auch am Eingang des Verstärkers und wird entsprechend mitverstärkt. Um eine Verfälschung der Messung zu vermeiden, wird der Operationsverstärker über ein 10 kΩ-Potentiometer im unbelasteten Zustand so abgeglichen, daß keine Ausgangsspannung vorliegt. Der unbelastete Zustand der gesamten Anordnung ist dabei so definiert, daß die Meßleitungen der Prüfkontakte bereits angeschlossen sind, aber über diese noch kein Strom fließt. Um Schwankungen des Meßsignals bei der Messung durch Fremdpotentiale (wie beim Annähern der Hand) zu vermeiden, ist auf eine gute Erdung zu achten. Der nicht-invertierende Verstärker zeichnet sich durch einen sehr hohen Eingangswiderstand (1 GΩ) aus, der für unseren Fall einer „leistungslosen“ Spannungsmessung notwendig ist. – Die Diode, die in Durchlaßrichtung geschaltet ist, ermöglicht eine Vereinfachung des Demonstrationsversuches. Sie dient dazu, daß nach Eintritt der Supraleitung auch im empfindlichsten Meßbereich vom Demonstrations-Meßgerät keine Spannung angezeigt wird. Dazu regelt man die Offset-Spannung im hohen Meßbereich ohne Diode ein

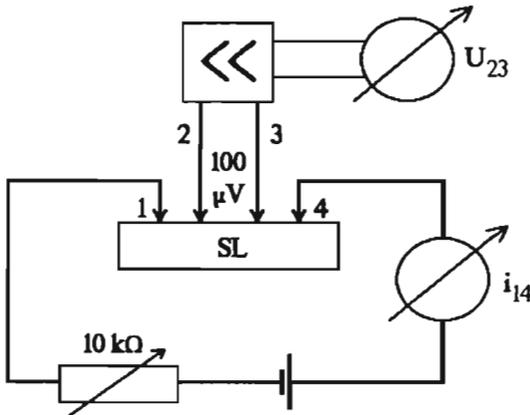


Abb. 5 Schaltung zur Messung der Leitfähigkeit

wenig unterhalb von $U = 0 \text{ V}$. Ohne Diode müßte man sonst die auftretende negative oder positive Restspannung erklären, die aber nur durch den Offset, also die Meßanordnung, bedingt ist.

Als Quelle für die Prüfströme empfiehlt sich ein regelbares Netzgerät ($i = 10\text{--}500 \text{ mA}$), das aber eigentlich nur zur Demonstration der kritischen Stromstärke (s.u.) nötig ist. Ansonsten verwendet man eine Batterie mit regelbarem Vorwiderstand ($1\text{--}10 \text{ k}\Omega$ -Potentiometer) (Abb. 5).

3.3. Demonstration der idealen Leitfähigkeit

Für qualitative Widerstandsmessungen stellt man bei Zimmertemperatur einen konstanten Prüfstrom i_{14} von $10\text{--}20 \text{ mA}$ ein. Die Prüfspannung U_{23} liegt je nach Supraleitermaterial und Güte der Kontakte im Bereich einiger $100 \mu\text{V}$, die entsprechend verstärkt mit einem Demonstrations-Meßgerät (z.B. 10 V -Meßbereich) angezeigt werden kann. – Wird der Messingblock² mit der Probe im Styroporbecher mit flüssigem Stickstoff gekühlt, sinkt zunächst die Spannung (wie bei einem Metall) langsam ab. Kleine Schwankungen sind durch Thermospannungen bedingt, die durch das schnelle Abkühlen entstehen. Sobald die kritische Temperatur unterschritten wird, erfolgt ein rascher Abfall der Spannung auf 0 Volt . Diesen beobachtet man infolge der Trägheit des Meßgerätes innerhalb von $1\text{--}2 \text{ s}$. Eine Umschaltung auf einen niedrigeren Meßbereich (z.B. 60 mV) beweist den völligen Zusammenbruch der Spannung.

Es empfiehlt sich, bei den Versuchen den Supraleiter über den Messingblock langsam vorzukühlen, da beim direkten Übergang von Zimmertemperatur zu der von flüssigem Stickstoff starke Thermospannungen auftreten können und die Messung außerdem wesentlich länger dauert, (da der gesamte Aufbau erst abkühlen muß). – Nimmt man den Messingblock mit

² Es ist darauf zu achten, daß der Stickstoff nur den Messingblock nicht aber den Supraleiter erreicht, da dieser sonst sofort supraleitend wird und somit die Zunahme der metallischen Leitfähigkeit nicht gezeigt werden kann.

dem Supraleiter aus dem flüssigen Stickstoff heraus, so steigt die Spannung bei Erreichen der kritischen Temperatur wieder stark an³.

3.4. Versuche zur kritischen Stromstärke des Supraleiters

Erhöht man bei abgekühlter Probe den Prüfstrom, so kann man zeigen, daß bei Überschreiten der kritischen Stromstärke die Supraleitung zusammenbricht [18]. Dies erfolgt in unserer Anordnung bei 300–500 mA.

Anmerkung: Man muß allerdings bei der Deutung des Versuches als Überschreitung der kritischen Stromstärke des Supraleiters vorsichtig sein. Die hohe Stromdichte an den Punktkontakten führt nämlich teilweise (wegen der Kontaktwiderstände) zu einer hohen lokalen Erwärmung des Supraleiters auf $T > T_c$, wodurch der Prüfstrom⁴ i_{14} und damit auch die Prüfspannung U_{23} zusammenbricht⁵. Dies wäre dann aber keine Folge der kritischen Stromstärke des Supraleiters.

Reduziert man den Prüfstrom wieder auf wenige mA, so müßte wieder Supraleitung auftreten. Findet man $R=0$ (d.h. $U_{23}=0$ bei $i \neq 0$), so ist die vorherige Beobachtung mit einiger Sicherheit auf die Überschreitung der kritischen Stromdichte zurückzuführen. Nach Erwärmung auf $T > T_c$ sollte dann wieder $R \neq 0$ werden. – Häufig bleibt jedoch nach Reduzierung des Prüfstroms $U_{23} = 0$ und auch $i_{14} = 0$; in diesem Fall wurden durch die hohen Stromdichten die Kontakte zerstört. Für eine Wiederholung der Versuche müssen die Elektroden etwas abgeschliffen und neu aufgesetzt sowie die Leitsilberauflage auf dem Supraleiter erneuert werden.

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. Gerd Koppelman, Dipl.-Phys. Gert Sinn (Optisches Institut TU Berlin, Hardenbergstr. 36, 1000 Berlin 12), Prof. Dr. Werner Schneider (Didaktik der Physik Universität Erlangen, Staudtstr. 7, 8520 Erlangen)

Eingangsdatum: 8. 11. 1990

Literatur

- [1] W. Buckel: Supraleitung. Physik-Verlag Weinheim 3. Auflage (1984) S. 10
- [2] H. Deger, K. Luchner: Hochtemperatur-Supraleiter – Do it yourself. Physik u. Didaktik 16, Heft 1 (1988) S. 56–62
- [3] G. Koppelman, J. Linders und H. Rehnert: Hochtemperatur-Supraleiter. Physik u. Didaktik 18, Heft 1 (1990) S. 70–84
- [4] H. Brandl: Herstellung und Demonstration eines Hochtemperatur-Supraleiters im Schulversuch. Praxis d. Naturw. (Physik) 37, Heft 8 (1988) S. 12–16

3 Dies sollte im unempfindlichen Meßbereich gezeigt werden, da der Anstieg sehr rasch erfolgt.

4 i_{14} wird mit einem zweiten Demonstrationsinstrument gemessen.

5 Man beobachtet in diesem Fall sogar an den Kontakten zwischen Supraleiter und Metallspitzen im Dunkeln Funkenüberschläge (selbst unter flüssigem Stickstoff).

-
- [5] K. Brüggemann: Experimente mit Supraleitern in der Schule. Praxis d. Naturw. (Physik) 37, Heft 8 (1988) S. 17–21
- [6] W. Kuhn: Supraleitung. Praxis d. Naturw. (Physik) 38, Heft 1 (1989) S. 23–31
- [7] H.-J. Stöckmann: Die neuen Hochtemperatur-Supraleiter. Math. Naturw. Unterr. 41/5 (1988) S. 276–284
- [8] P.J. Ouseph: Meissner oscillator. Am. J. Phys. 57 (1989) S. 955–956
- [9] W. Schneider, G. Koppelman, H. Rehnert, G. Sinn: Weitere Unterrichtsversuche zur Hochtemperatur-Supraleitung. Didaktik der Physik, Tagungsband, DPG-Tagung Gießen 1990 (Hrsg.: W. Kuhn)
- [10] R. Brennecke, G. Schuster: Physik, Oberstufe. Vieweg Verlag, Braunschweig (1969)
- [11] W. Connolly: Lenz's law demonstration. The Physics Teacher Heft 1 (1989) S. 50
- [12] A. Friedrich: Handbuch der experimentellen Schulphysik, Bd. 8 (Elektrizitätslehre III). Aulis-Verlag Deubner, Köln (1965) S. 86
- [13] S.Y. Mak, K. Young: Floating metal ring in an alternating magnetic field. Am. J. Phys. 56 (1984) S. 808–811
- [14] H. Deger: Demonstration zur Leitfähigkeit von Hochtemperatur-Supraleitern. Praxis d. Naturw. (Physik) 37, Heft 8 (1988) S. 22–24
- [15] H.-W. Oberholz: Ein Erfahrungsbericht: 1-2-3-Supraleiter. Praxis d. Naturw. (Physik) 38, Heft 4 (1989) S. 37–41
- [16] J.N. Fox, F.A. Rustad, R.W. Smith: Measurement of the transition temperature of a high T_c superconductor. Am. J. Phys. 56 (1988) S. 980–982
- [17] G.C. Brown, J.O. Rasure, W.A. Morrison: Simple Demonstration of superconductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Am. J. Phys. 57 (1989) S. 1142–1144
- [18] M.J. Pechan: Quasiequilibrium determination of high- T_c superconductor transition temperatures. Am. J. Phys. 58 (1990) S. 642–644
- [19] I. Apfelstedt, R. Flükiger, H. Küpfer, R. Meier-Hirmer, W. Schauer, H. Wühe: Kritische Ströme und Felder des Hoch- T_c -Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. KfK-Nachrichten Jahrg. 19, 3/87 S. 130–137
-

Gedenktage

John Thomson. 1881 berechnete er erstmals die rein elektromagnetische Masse bewegter Ladungen. Später wies er mit Rutherford das Leitendwerden von Gasstrecken und Dielektrika bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen nach. Die Natur der Kathodenstrahlen erklärte er als Ströme freier Elektronen. Als Lehrstuhlinhaber am Cavendish Laboratory in Cambridge erhielt er 1906 den Physik-Nobelpreis zuerkannt; 1908 erhob ihn die britische Krone für seine Verdienste in den Ritterstand.

(Aus: Kultur und Technik Heft 2/1990, Deutsches Museum, München)