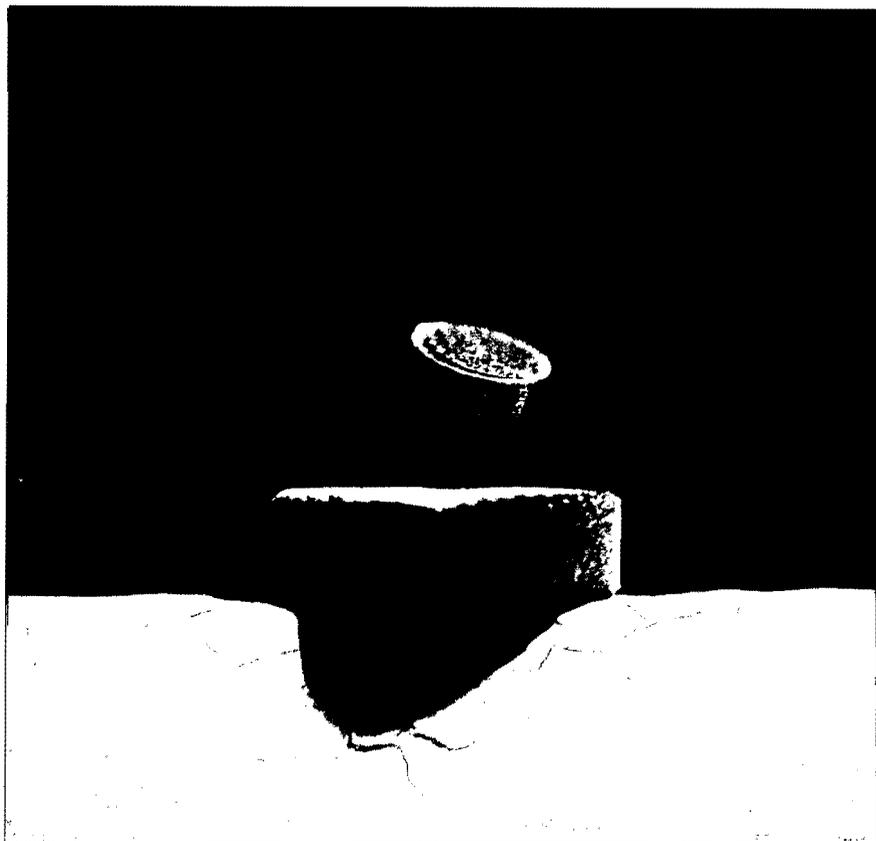


LEHRERFORTBILDUNG
PHYSIKALISCHES INSTITUT

DIDAKTIK DER PHYSIK



ANLEITUNG ZUM EXPERIMENTIERSATZ ZUR
HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG

UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

A.) Vorbemerkung

Der vorliegende Experimentiersatz zur Hochtemperatursupraleitung (HTSL) stellt das Kursmaterial für die Veranstaltung "Neues und Altes zur "neuen" Supraleitung" im Rahmen des Fachdidaktikseminars Physik am 19. 12. 88 dar.

Der Experimentiersatz entstand im Rahmen der Zusammenarbeit des Bayerischen Philologenverbandes (Bezirk Mittelfranken) und der Didaktik der Physik am Physikalischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg. Die Initiative zu diesem Projekt ging vom zuständigen Fachgruppenleiter für Mathematik und Physik des Bezirks Mittelfranken, Herrn Miericke, aus. Der HTSL- Experimentiersatz wurde mit der Absicht geschaffen, die fast einmalige Chance zu nutzen, eine gerade mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Entdeckung auch sofort den Schulen zugänglich zu machen und damit zur Aktualisierung des Physikunterrichts beizutragen.

Der Plan dazu entstand bereits Ende 1987. Allerdings konnte er wegen der bescheidenen Möglichkeiten der Didaktik und einiger unerwarteter Schwierigkeiten beim Übergang vom Labormuster zur "Großserie" (wir mußten z.B. fast 6 Monate auf die Chemikalien warten) erst nach einem Jahr verwirklicht werden. Die zunächst angestrebte Aktualität konnte somit nicht ganz erreicht werden. Wir bitten hierfür um Verständnis. Auch handelt es sich nicht um einen "professionellen" Experimentiersatz. Wir mußten uns bei der Auswahl der Materialien sehr beschränken, damit der Experimentiersatz innerhalb des engen finanziellen Rahmens hergestellt werden konnte. Deswegen beschränkten wir uns z.B. nur auf einen relativ kleinen Magneten, der anders als sonst üblich, über der supraleitenden Probe schwebt. Ein größerer, für die Demonstration sicher besser geeigneter Magnet kostet allerdings bereits das Drei- bis Vierfache des gesamten Experimentiersatzes. Auch konnten die HTSL-Tabletten nur stichprobenartig auf ihre Funktionsfähigkeit hin überprüft werden. Wir hoffen, daß von den drei Tabletten des Experimentiersatzes mindestens eine besonders gut funktioniert. Mit dem Experimentiersatz lassen sich jedoch - trotz der "Abmagerungskur" - einige charakteristische Versuche zur Supraleitung gut durchführen.

Die Herstellung des Experimentiersatzes wäre ohne den Optimismus, die Erfahrung und die tatkräftige Hilfe von Claudia Süß und Jörg Ströbel, Studenten der Gruppe Tieftemperaturphysik am Physikalischen Institut (Prof. Dr. G. Saemann-Ischenko), nicht möglich gewesen. Ferner haben Stefanie Schmidt, Günther Neubauer und Klaus Thies von der Didaktik wesentlich mitgeholfen. Vor harter "Knochenarbeit" hat uns der Werkstattleiter der Pharmazeutischen Technologie an der Universität Erlangen, Herr Drechsel, bewahrt. Er ermöglichte das Pressen der "vielen" Tabletten auf einer "Pillenpreßmaschine".

Allen Beteiligten sei für den geleisteten Einsatz, der mit sehr viel Idealismus verbunden war, recht herzlich gedankt. Dem Philologenverband gilt der Dank für die Initiative zu diesem Projekt und für die finanzielle Unterstützung.

Die an dem Projekt beteiligten Personen hoffen, daß der Experimentiersatz zur Hochtemperatursupraleitung auch genutzt wird und Lehrern und Schülern neue Impulse und Anregungen gibt. Vielleicht kann er mithelfen, daß der bei beiden Gruppen manchmal durch das harte "Unterrichtsgeschäft" zurückgedrängte Spaß an der Physik wieder neu belebt wird - dann hätte sich der Einsatz gelohnt.

B) Einiges zur Entwicklung der Hochtemperatursupraleitung (HTSL) [8]

Seit der Entdeckung der Supraleitung durch Kamerlingh Onnes im Jahr 1911 ist die Suche nach höheren Sprungtemperaturen ein wesentliches Anliegen der Forschung. Trotz intensiver Anstrengungen wurde jedoch die "Rekord-Sprungtemperatur" von $T_c = 23,2$ K für Nb_3Ge lange Zeit (14 Jahre) nicht überboten. Gelegentlich auftauchende Meldungen über die Entdeckung höherer Sprungtemperaturen erwiesen sich immer wieder als nicht stichhaltig. Man betrachtete daher das Gebiet der Supraleitung im Hinblick auf eine Erhöhung der Sprungtemperatur als praktisch abgeschlossen. Daher fand wohl auch die Arbeit von J.G. Bednorz und K.A. Müller im September-Heft 1986 der Zeitschrift für Physik B [1] mit dem Titel "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O-System", in der eine höhere Sprungtemperatur (ca. 30 - 40 K) angegeben war, nur wenig Beachtung, zumal es sich bei dem untersuchten Materialien um eine metallische Keramik handelt, bei der man Supraleitung nicht erwartete. Erst die im Oktober 1986 von beiden Autoren eingereichte Arbeit [2] zum Nachweis des Meißner-Ochsenfeld-Effektes bei Sprungtemperaturen von ca. 40 K erregte mehr Aufmerksamkeit, und auf der Herbsttagung der Material Research Society in Boston im Dezember 1986 war die "neue" Supraleitung die große Sensation. Von diesem Datum an begann lawinenartig in vielen Labors ein hektisches Forschen auf dem durch die Arbeiten von Bednorz und Müller initiierten Feld der metallkeramischen Supraleitern. Weltweit wurde ausgehend von dieser für die Supraleitung neu entdeckten Klasse von Materialien $((La"M")_2CuO_4)$ mit "M" : Ca, Sr, Ba, den sogenannten "40 K - Supraleitern", nach Substanzen mit höherer Sprungtemperaturen geforscht.

Ein weiterer Durchbruch, die Erhöhung der Sprungtemperatur in den Bereich der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K), wurde im März 1987 von C.W. Chu und Mitarbeitern [3] erreicht, die über eine Sprungtemperatur von 92 K bei der metallischen Keramik mit der Zusammensetzung Y-Ba-Cu-O berichteten. Auf das von diesen Autoren angegebene "Rezept" geht auch die Herstellung der HTLS-Proben des Experimentiersatzes zurück. Diese Arbeit ermöglichte, daß praktisch jeder HTLS-Proben herstellen konnte, was zur Popularisierung der neuen Entdeckungen wesentlich beigetragen hat.

C.) Rezept zur Präparation der HTLS-Proben

Bei dem System $YBa_2Cu_3O_7$ beobachtet man eine Sprungtemperatur von ca. 92 K. Dieses System stellt man in Form polykristalliner Sintergefüge folgendermaßen her (Angaben für ein Mol Keramikmaterial):

- Mischen des stöchiometrischen Gemenges: $0.5\text{mol } Y_2O_3 + 2\text{mol } BaCO_3 + 3\text{mol } CuO$;
- Mörsern;
- Pressen des Pulvers in Tablettenform (Druck $\approx 3,5$ kbar), Druck nicht sehr kritisch;
- ca. 16stündiges Kalzinieren bei ca 950°C an Luft;
- langsames Abkühlen im Ofen auf 450°C und 16h bei dieser Temperatur belassen, anschließend schnell abkühlen (z.B. in fl. Stickstoff werfen);
- nochmaliges Mörsern, Pressen und Sintern;

Das Verfahren erfordert reine Ausgangsmaterialien (am besten p.A.), eine Presse, einen passenden Ofen und eine Analysenwaage (eine auf schulische Verhältnisse zu-

geschnittene Präparationsanleitung findet man in [4]).

D.) Experimentiersatz zur Hochtemperatursupraleitung

1.) Bestandteile:

- 1 Aufbewahrungsdose aus Hartschaum - gleichzeitig Isoliergefäß zum Abkühlen der Probe; der tiefere Boden eignet sich für die R(T)-Messung und der flachere Deckel für den Schweberversuch;
- 1 Dose mit Silikagelkugeln zur Aufbewahrung der Proben und der Magnete;
- 1 Pinzette aus Kunststoff (Vorsicht: bricht leicht - vor allem im kalten Zustand);
- 2 CoSm-Magnete ($\varnothing = 5\text{mm}$, $d = 1,5\text{mm}$), Vorsicht: sprödes Material, kann im kalten Zustand springen; lokal sehr starkes Magnetfeld (0,04T); die Magnete sind leicht zu verlieren, da sie relativ klein sind und sofort an eventuell in der Nähe befindlichen, ferromagnetischen Teilen "kleben";
- 3 HTLS-Proben ($\varnothing = 12\text{mm}$, $d=3\text{mm}$)

2.) Hinweise zum Gebrauch des Experimentiersatzes:

- Proben nach dem Gebrauch möglichst trocken lagern, aber nicht unter Vakuum aufbewahren; die blaue Farbe der Silikagelkugeln zeigt an, daß die Kugeln noch funktionstüchtig sind - farblose Kugeln können durch Erwärmen getrocknet werden und nehmen die blaue Farbe wieder an.
- Die Schwermetallbestandteile der HTSL-Probe sind giftig; Schüler sollten auf diese Gefahrenquelle hingewiesen werden.
- deshalb Proben nur mit der Pinzette anfassen und bewegen.
- Auf mögliche Gefahren beim Umgang mit flüssigem Stickstoff hinweisen.
- Nachlassende Supraleitfähigkeit: Die HTSL-Proben sind empfindlich gegen Luftfeuchtigkeit. Sollten sich die Versuche nicht mehr durchführen lassen, so kann eine Nachpräparation helfen. Hierzu wird die Probe im Ofen bei 480°C ca. 16h getempert und anschließend möglichst schnell abgekühlt (in fl. Stickstoff werfen).
- Nachlassen der Tablettenfestigkeit: zur Abhilfe die Proben im Ofen bei ca. 950°C sintern (ca. 16h), auf 480°C abkühlen, bei dieser Temperatur 16h tempern und dann möglichst schnell abkühlen (fl. N_2).
- Keine flüssige Luft verwenden. Sauerstoff ist paramagnetisch und schwächt das Magnetfeld. Außerdem ist flüssige Luft gefährlich, da der in ihr enthaltene Sauerstoff einen niedrigeren Siedepunkt hat als Stickstoff und somit als Rest im Vorratsgefäß übrigbleibt.
- Transport und Aufbewahrung von flüssigem Stickstoff: Geeignet sind Thermosflaschen, oder Gefäße aus dickwandigem Hartschaum - beide unverschlossen lassen.
- Bezug von fl. Stickstoff: Institute, Krankenhäuser, Firma Linde (Nürnberg).

E.) Demonstrationsversuche mit den HTLS-Proben

Ein Supraleiter ist u. a. durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Supraleitung tritt nur unterhalb einer kritischen Temperatur T_c auf;
- ein Supraleiter ist ein idealer Leiter ($R = 0$);
- ein Supraleiter ist ein idealer Diamagnet (vollständige Magnetfeldverdrängung aus dem Inneren des Leiters)

- Supraleitung tritt nur auf, wenn ein jeweils charakteristisches Wertepaar aus äußerem Magnetfeld B und Temperatur T ($T < T_c$) unterschritten ist, hierbei sind die kritischen Werte B_c und T_c die jeweiligen Grenzwerte, d.h. für $T = T_c$ muß $B = 0$ für $B = B_c$ muß $T = 0K$ sein, damit gerade noch Supraleitung auftritt; entsprechendes gilt für das Wertepaar Stromdichte im Supraleiter und Temperatur.

Die erwähnten Eigenschaften lassen sich mit dem Experimentiersatz in einfachen Demonstrationsversuchen nachweisen. Die Eigenschaft, ein idealer Leiter zu sein, zeigt sich dabei im steilen Anstieg der $R(T)$ -Kurve in der Nähe der kritischen Temperatur. Der Diamagnetismus und auch die ideale Leitfähigkeit kann besonders einfach über den spektakulären Schweberversuch nachgewiesen werden.

Zur Abkühlung der Proben eignet sich die Aufbewahrungsdose aus Hartschaum (für die Beobachtung des Schweberversuchs ist der flachere Deckel besser geeignet). Für die $R(T)$ -Messung nimmt man den tieferen Boden der Dose.

1.) Schweberversuch

Das Schweben einer supraleitenden Probe im inhomogenen Feld eines genügend starken Magneten (bzw. umgekehrt das Schweben eines Magneten über einer supraleitenden Probe) ist immer noch der spektakulärste Versuch zur HTLS. Er kann ohne größeren experimentellen Aufwand auch mit dem Experimentiersatz demonstriert werden. Im Experimentiersatz ist das Schweben des Magneten über der Probe vorgesehen (siehe auch c.)).

a.) Zum Versuch legt man eine der HTLS-Proben in den Hartschaumdeckel und füllt soweit flüssigen Stickstoff ein, bis die Probe bedeckt ist. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit empfiehlt sich die Verwendung von Unterlegscheiben aus nicht-magnetischem Material. Man kann auch kurz die kalte Probe auf den Rand der Dose legen. Dann bringt man den Magnet mit der Pinzette über die Probe und läßt ihn frei. Der Magnet stellt sich sofort irgendwie schräg über der Probe ein und schwebt. Wir haben - je nach Probe - Schwebehöhen von 1 bis 5mm beobachtet. Die Proben sind aufgrund unterschiedlicher Präparationsbedingungen im Ofen nicht alle gleich in ihrer supraleitenden Eigenschaft, was zu unterschiedlichen Schwebehöhen führen kann. Nach einiger Zeit sinkt der Magnet auf die Probe, da durch die unvermeidbare Erwärmung der Probe ihre supraleitende Eigenschaft verloren geht. Das Bild des "schwebenden Magneten" auf dem Deckblatt der Anleitung zeigt einen Magnet und eine Probe aus dem Experimentiersatz. Zur Aufnahme (Beobachtung) wurde die kalte Probe auf den Rand des Hartschaumdeckels gelegt.

b.) Kühlt man jetzt die Probe durch Zugießen von Stickstoff wieder ab, so hebt sich der Magnet von allein und schwebt auch über der Probe.

c.) Stellt man den Magnet auf eine glatte, horizontale Unterlage oder hängt ihn bifilar auf und nähert ihm eine abgekühlte Probe, so treten abstoßende Kräfte auf. Der Magnet "flieht" vor der Probe. Diesen Effekt kann man leicht in Schattenprojektion vorführen.

Erläuterungen zu den Versuchen:

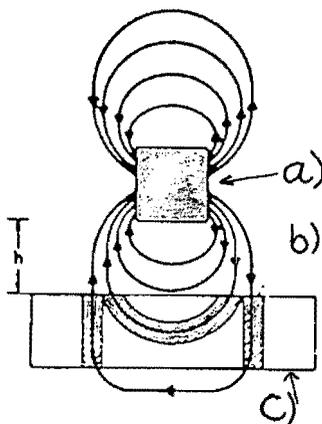
Zu a): Senkt man einen Magneten auf eine unter ihre kritische Temperatur abgekühlte supraleitende Probe (oder umgekehrt), so werden im Supraleiter Ströme induziert, die nach der Lenzschen Regel zu einem Magnetfeld führen, das dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet ist. Es kommt zur Abstoßung. Da keine Dämpfung der Ströme eintritt, bleibt der Schwebezustand erhalten. Entsprechend läßt sich

c) als Induktionsvorgang deuten.

Zu b): Geht die Probe in den supraleitenden Zustand über, so wird das magnetische Feld aus dem Inneren des Supraleiters - bis auf den Bereich einer dünnen Oberflächenschicht - verdrängt. Diese Feldverdrängung kommt durch das ideal diamagnetische Verhalten des Supraleiters zustande (Meißner-Ochsenfeld-Effekt) und bewirkt ebenfalls die Entstehung von ungedämpften Oberflächenströmen, deren Magnetfeld die Abstoßung zwischen supraleitender Probe und Magnet hervorruft.

Anmerkung: Der supraleitende Zustand wird bei den Schweberversuchen schon vor dem Erreichen der kritischen Temperatur zerstört, da das äußere Magnetfeld verschieden von Null ist.

Verwunderlich beim Schweberversuch ist, daß der Schwebezustand räumlich sehr stabil ist. Es muß eine Art "Regelmechanismus" vorhanden sein, der für die Stabilität sorgt. Bei der Probe des Experimentiersatzes handelt es sich um einen Supraleiter vom Typ II [5], bei dem sich "Flußschläuche" (s. Abb. 1) in der Probe ausbilden können (sogenannte Shubnikov-Phase).



Inhomogenitäten der Probe bewirken "Pinningkräfte" (Potentialmulden), die dafür sorgen, daß die Flußschläuche im Supraleiter an festen Stellen "festgehalten" werden. Die einmal ausgebildete Anordnung der Flußschläuche ist energetisch günstig und bleibt somit ohne die Einwirkung äußerer Kräfte erhalten. Verändert man die Stellung des Magneten von außen, so stellt sich eine andere, energetisch günstige Anordnung der Flußschläuche ein, und der Magnet behält die neue Lage bei. Damit wird die beobachtete Stabilität des Schwebezustands einsichtig. Diese zunächst ungewöhnlich erscheinende Argumentation über die Pinningkräfte ist jedoch im Rahmen der Beschreibung der Supraleitertyp II gängig [5] und wird dort näher begründet. Anzumerken ist, daß der Durchmesser der supraleitenden Probe im Verhältnis zur Größe des Magneten so gewählt werden muß, daß die Ausbildung von Flußlinien innerhalb der Probe möglich ist. Andernfalls sind die Pinningkräfte zu gering und der Magnet weicht seitlich aus.

Abb. 1: Schematische Darstellung der Flußschläuche in einer supraleitenden Probe;
a) Permanentmagnet,
b) Flußschlauch,
c) supraleitende Probe.

innerhalb der Probe möglich ist. Andernfalls sind die Pinningkräfte zu gering und der Magnet weicht seitlich aus.

2.) Versuche mit der bifilar aufgehängten supraleitenden Probe - Ergänzungen zu dem Thomsonschen Ringversuch

Der Schweberversuch ist zwar spektakulär, jedoch mit dem Magnet und der Probe des Experimentiersatzes praktisch nur in Einzelbeobachtung möglich. Besser geeignet ist die bifilare Aufhängung der Probe, da man hier selbst bei nicht so guten Proben, oder bei in ihrer Supraleitung nachlassenden Proben, noch gut sichtbare Effekte der Supraleitung demonstrieren kann. Durch die bifilare Aufhängung der Probe wird in der Ruhelage die Gewichtskraft kompensiert. Die abstoßenden Kräfte müssen dann im Vergleich zum Schweberversuch nicht mehr so groß sein, um gut sichtbare Ausschläge zu bekommen.

Als Faden eignet sich z.B. eine dünne Angelschnur ($\varnothing \approx 0,1\text{mm}$), die man mit einem Tropfen Sekundenkleber an der Probe befestigt.

Für den Unterricht ist ferner von Interesse, daß man jetzt in Fortsetzung zum **Thomsonschen Ringversuch** [12] auch den Fall zeigen kann, daß der "Ring", falls er supraleitend ist, nach dem Einschalten des Magnetfelds nicht in die Ausgangslage zurückkehrt bzw. erst dann langsam zurückkehrt, wenn durch die unvermeidbare Erwärmung der Probe die Supraleitung verschwindet. In der gängigen Schulbuchliteratur wird der Thomsonsche Ringversuch unterschiedlich dargestellt. Es folgt daher eine kurze Beschreibung der von uns bevorzugten Anordnung, die sich für die Vorführung des Ringversuchs und der HTLS als günstig erwiesen hat.

- Auf den Eisenkern des Experimentiertrafos setzt man den durchbohrten Polschuh, in dessen Bohrung ein Weicheisenstab ($\varnothing=10\text{mm}$, $L\approx 6\text{cm}$) gesteckt ist. Man wählt zwei Spulen so aus, daß passend zur jeweils vorhandenen Stromquelle das Feld maximal wird (Bsp.: für zwei Spulen (600 Wdgn.), Hufeisenkern, Netzgerät (15V, 5A) erreichten wir ca. 0.04T am Ende des Eisenkerns; dies entspricht dem Feld auf der Oberfläche des kleinen Permanentmagneten).
- Das Netzgerät muß geglätteten Gleichstrom liefern.
- Ein leichter Alu-Ring ($\varnothing\approx 20\text{mm}$, $d\approx 2\text{mm}$) wird bifilar so aufgehängt, daß der Eisenkern sich im Innern des Rings befindet und daß der Abstand vom Polschuhende ca. 1cm und vom Eisenkernende ca. 3cm beträgt.
- Zur Schattenprojektion verwendet man eine punktförmige Lichtquelle (ohne Kondensator).

Schaltet man den Strom ein, so wird der Ring um ca. 20mm ausgelenkt und kehrt dann - bei eingeschaltetem - Strom langsam, wie in "Sirup" gedämpft, zur Ausgangslage zurück. Dabei sind leichte Wackelbewegungen zu beobachten. Oft wird dieser für die Induktion und Nachweis der Lenzschen Regel ebenso interessante Teil wenig beachtet. Dies liegt vielleicht daran, daß die Versuchsbedingungen nicht passend gewählt werden. Für diesen Versuch ist es nach unserer Erfahrung wichtig, daß der Alu-Ring leicht ist, daß der Ring bei seiner Bewegung den Bereich des Eisenkerns nicht verläßt und daß es sich um ein durch geglätteten Gleichstrom erzeugtes, starkes Magnetfeld handelt. Nach dem Ausschalten des Spulenstroms wird der Ring heftig von der Spule angezogen.

Für die Versuche mit der supraleitenden Probe wird diese dicht vor das Ende des Eisenkerns aufgehängt. Die Kühlung führt man am besten am Ort der Probe durch, indem man den fl. Stickstoff in einer kleinen Schale mit Stiel unter die Probe bringt. Es lassen sich folgende charakteristischen Beobachtungen machen:

- Schaltet man nach dem Abkühlen das Magnetfeld ein, so wird die Probe um ca. 20mm ausgelenkt und bleibt dort stabil stehen. Eine kleine Verdrehung der Probe bleibt nach dem Loslassen, trotz der Rückstellkräfte durch Verdrillung der Aufhängung, im Raum erhalten.
- Durch die Erwärmung der Probe nimmt die Supraleitung langsam ab, und die Probe kehrt ohne "Wackelbewegung" in die Ausgangslage zurück.
- Kühlt man die Probe in der Ruhestellung bei eingeschaltetem Magnetfeld ab, so findet eine schlagartige Auslenkung der Probe statt, sobald eine kritische Temperatur unterschritten ist.
- In der Schattenprojektion sieht man die Probe nicht mehr "scharf". Sie ist von Schlieren umgeben, die aufgrund der starken Abkühlung der Luft in Probennähe und den damit verbundenen Brechungsindexschwankungen hervorgerufen werden. Dies ist ein interessantes "Abfallprodukt", das Schüler sicher neugierig macht.

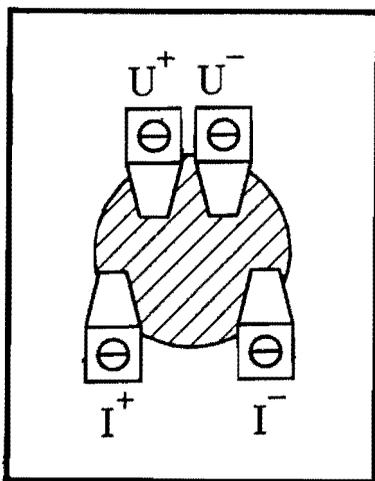
- Zur Gegenüberstellung kann man auch beide Versuche - Ablenkung der supraleitenden Probe und Ringversuch - gleichzeitig ablaufen lassen.

Insgesamt sind mit der bifilaren Aufhängung der supraleitenden Probe die charakteristischen Versuche zur Supraleitung möglich. Sie sind vielleicht weniger spektakulär als die Schweberversuche, dafür aber besser zu beobachten. Zusätzlich passen sie als Analogie zum Ringversuch gut in den üblichen Unterrichtsgang.

3.) Nachweis der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes und das Auftreten der kritischen Temperatur

Überraschend ist, daß keramisches Material überhaupt leitend ist. Mit einem Ohmmeter und aufgedrückten Prüfspitzen mißt man ca. 10 - 20 Ohm. Weiter ist überraschend, daß im kalten Zustand in etwa der gleiche Widerstandswert angezeigt wird. Das erwartete Absinken auf den Wert Null ist so nicht zu beobachten. Dies liegt an dem zu großen Kontaktwiderstand, der den eigentlichen Probenwiderstand (Bruchteile von einem Ohm), überdeckt. Hier wird ein Nachteil der Metallkeramik sichtbar. Für sie gibt es noch kein einfaches Kontaktierungsverfahren mit einem gegenüber dem Probenwiderstand vernachlässigbarem Übergangswiderstand. Man ist auf Preßkontakte angewiesen und muß deren relativ großen Übergangswiderstände in Kauf nehmen.

Diese Schwierigkeiten lassen sich jedoch durch die Verwendung einer sogenannten "Vier-Elektrodenanordnung" umgehen, mit der die gewünschte $R(T)$ Untersuchung möglich wird. Dazu bringt man auf der Probe vier nebeneinander liegende Kontakte an, schickt über die beiden äußeren Kontakte einen Prüfstrom von ca. 10 bis 30mA durch die Probe und mißt den Spannungsabfall, der sich über den beiden inneren Kontakten für den jeweiligen Prüfstrom einstellt. Bei Verwendung eines hochohmigen Voltmeters ist diese Spannung unabhängig von den Übergangswiderständen und stellt ein direktes Maß für den Probenwiderstand dar.



Die Herstellung der Kontakte erfordert etwas Bastelarbeit, die gegebenenfalls von Schülern ausgeführt werden kann. Von den möglichen Versuchsanordnungen haben sich die bewährt, bei denen beim Anpressen der Kontakte keine unkontrollierbaren mechanischen Belastungen der Probe auftreten, die sonst zu einem Bruch der Probe führen können (siehe Beispiel in Abb. 2).

Auf einen Kupfer- oder Aluminiumblock (ca. 30x30x15 mm) setzt man die Probe und legt ein dünnes Papier zur elektrischen Isolation unter. In der Oberfläche des Blocks sieht man, wie in Abb. 2 skizziert, vier Löcher mit Gewinde (M3) vor. Sie dienen zur Aufnahme von Nygonschrauben, mit denen die vier Federkontakte unter Verwendung passender Unterlegscheiben z.B.

Abb. 2: Skizze zum Aufbau der Vier-Elektrodenanordnung aus Preßkontakten auf einem Cu-Block zur $R(T)$ -Untersuchung;

denen die vier Federkontakte unter Verwendung passender Unterlegscheiben z.B.

aus Nylon voneinander isoliert auf die Probe aufgedreht werden können (s. Abb. 2). An die Kontakte werden die Meßleitungen angelötet.

Die $R(T)$ -Messung (qualitativ) wird folgendermaßen durchgeführt: Vor dem Abkühlen stellt man einen konstanten Prüfstrom von ca. 20mA ein und mißt die Prüfspannung. Zu erwarten sind ca. 0,2mV (Nachweis: vierstelliges Digitalvoltmeter oder Meßverstärker mit hochohmigem Eingang). Der Cu-Block und die Probe mit den Kontakten werden im Isoliergefäß vollständig mit flüssigem Stickstoff umspült. Dann läßt man den Stickstoff verdampfen und registriert die Prüfspannung. Durch die Kopplung des Blocks an das Bad aus flüssigem Stickstoff und an die umgebende Luft stellt sich ein Temperaturgefälle innerhalb des Blocks ein, das von der Höhe des Stickstoffspiegels abhängt. Man kann damit die Temperatur der Probe von Werten unterhalb der kritischen Temperatur bis zur Zimmertemperatur anwachsen lassen. In der Nähe der Sprungtemperatur beobachtet man ein sprunghaftes Anwachsen der Prüfspannung von Null auf ca. 0,2mV. Setzt man auf den Cu-Block noch einen geeichten Temperaturfühler (z.B. Pt 100), so ist auch eine quantitative Untersuchung von $R(T)$ möglich.

Erhöht man bei abgekühlter Probe den Prüfstrom, so kann auch gezeigt werden, daß beim Überschreiten eines kritischen Stroms die Supraleitung "zerstört" wird. Bei der von uns gewählten Anordnung trat dies bei ca. 400mA auf.

3.) Die "magnetische Wippe"

Mit diesem Versuch lassen sich die vorher erwähnten "Pinningkräfte" noch spektakulärer veranschaulichen. Hierzu wird eine "Magnetfolie" auf ein leicht konkav gebogenes Blech gelegt (s. Abb. 3). Das Magnetfeld der Folie ist in der Nähe der Oberfläche nahezu homogen (parallel verlaufende Feldlinien).

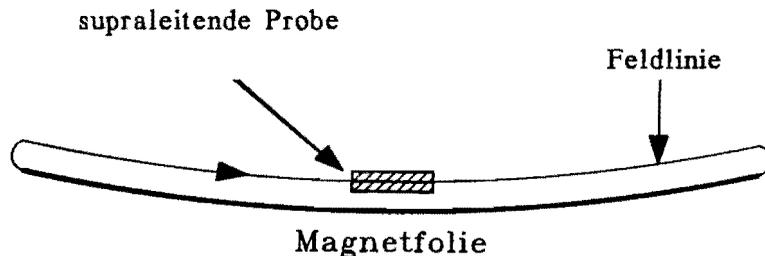


Abb. 3: Skizze zur "magnetischen Wippe" (Bezugsquelle am Ende)

Legt man eine unter T_c abgekühlte Probe auf die Flanke der Wippe, so schwebt sie wie auf einem Luftkissen entlang der Feldlinien der Probe hin und her. Im Feld der Magnetfolie bilden sich in der HTLS-Probe (Typ II Supraleiter) energetisch günstige Flußschlauchanordnungen aus, durch die die Feldlinien des äußeren Feldes in der Probe geführt werden. Bei einem seitlichen Verkippen der Wippe ändert die Probe ihre Bewegungsrichtung daher nicht. Versetzt man der Probe einen Stoß senkrecht zu den Feldlinien der Wippe, so hat dies nur zur Folge, daß die Probe jetzt durch danebenliegende Feldlinien geführt weiterschwebt.

F.) Ausblick

Die vor zwei Jahren einsetzende intensive Forschung auf dem Gebiet der metallkeramischen Supraleiter hat mittlerweile (Dezember 1988) u. a. ergeben, daß metalli-

sche Keramiken mit einer Sprungtemperatur von 125K hergestellt werden können. Gerüchteweise spricht man auch schon von 160K. Neben der Erhöhung der Sprungtemperatur steht die Frage nach einer Erhöhung der Stromdichte und des kritischen Feldes im Vordergrund. Zusätzlich wird die Herstellung supraleitender Drähte und supraleitender HTLS-Filme bzw. Mikrostrukturen intensiv erforscht. Auch haben sich neue, grundsätzliche Fragen zum Verständnis der Supraleitung aufgetan, die intensive theoretische Untersuchungen eingeleitet haben.

G.) Literatur

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Müller, Z. f. Physik B 64, 189 (1986)
- [2] J.G. Bednorz et al. Europhys. Lett. 3, 379 (1987)
- [3] M.K. Wu et al. Phys. Rev. Lett. 58, 908 (1987)
- [4] H. Deger, K. Luchner, "HTLS-Do it Yourself", Phys. u. Didaktik 1, S. 56 (1988)
- [5] W. Buckel, "Supraleitung", Weinheim 1972
- [6] V. Oestreich, "Supraleitung und ihre Anwendungsmöglichkeiten", Physik in unserer Zeit 11, 6 (1971)
- [7] H. Rietschel, "Keramische Hochtemperatursupraleiter - ein erster Überblick", Physikal. Blätter, 43, 357 (1987)
- [8] G. Saemann-Ischenko, "Zur Geschichte der Entdeckung der neuen Hochtemperatur Supraleitung", Physikal. Bl. 43, 360 (1987)
- [9] J.G. Bednorz und K.A. Müller, "Oxide mit Perowskitstruktur - Der neue Weg zur Hochtemperatursupraleitung" Phys. Bl. 44, 347 (1988) (Nobelvortrag)
- [10] D. Rainer, "Wo steht die Hochtemperatursupraleitung?", Physik. Bl. 44, 110 (1988)
- [11] Bergmann/Schaefer, "Lehrbuch der Experimentalphysik Band IV/2", Berlin 1980
- [12] G. Sprockhoff, "Physikalische Schulversuche, Elektrizitätslehre II", München 1970

H.) Bezugsquellen

Magnete: Hermetiko, Amalienstr. 53, 8510 Fürth (SmCo 5 - Magnet, Artikel Nr. 75-0083-00; Preis bei Einzelbezug ca. 1,50DM)

Chemikalien: HEK, Postfach 1810, 2400 Lübeck 1

Pinzette: Laborcenter, Humboldtstr. 39, 8500 Nürnberg 73

Magnetfolie: Sahlberg, Postfach 220, 8016 Feldkirchen bei München,

(Folie Anti-Dröhn, 500x640x1,4mm; Artikel Nr. 552001; Preis ca. 60DM)

Hartschaumdose: E. Jakob, Postfach 52, 8501 Cadolzburg

Flüssiger Stickstoff: Universitätsinstitute, Kliniken, Firma Linde (Nürnberg)

I.) Kontaktadresse

Prof. Dr. W. Schneider

Didaktik der Physik - Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg

Glückstr. 6

Telefon 09131/85 2477

8520 Erlangen