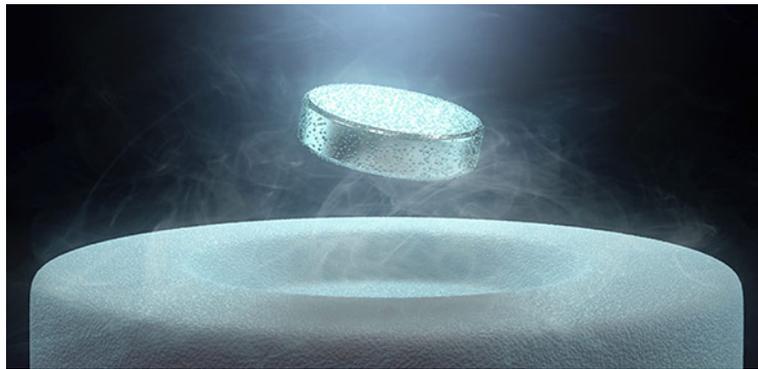


# Versuchsanleitung Fachpraktikum HS3

## Hochtemperatur-Supraleiter

Labor: ETL C11  
Zeit: 13:30 bis 16:30



**Übersicht** Wir kennen heute vier Typen von Supraleitern: Die Fullerene, die metallischen, die organischen und die keramischen Supraleiter. Bei den metallischen Supraleitern handelt es sich um Tieftemperatur-Hochstrom-Materialien ( $4.2\text{ K}$ ,  $J_c > 104 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ ), wogegen die keramischen Supraleitern sog. Hochtemperatur-Materialien ( $> 77\text{ K}$ ) sind. Im Praktikum werden mit einigen dieser neuartigen Hochtemperatur-Supraleiter Versuche im flüssigen Stickstoff bei  $77\text{ K}$  durchgeführt. Dabei lassen sich interessante Effekte beobachten. Es wird gezeigt, wie sich die grundlegenden elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Supraleiters messtechnisch bestimmen lassen.



Voraussetzung für die Zulassung zum Fachpraktikum HS3 ist das Lesen der Aufgabenstellung, die schriftliche Bearbeitung der vorbereitenden Aufgaben in Abschnitt 1.1 und 3.1 und das Studium der Sicherheitsvorschriften im Anhang.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Der Supraleiter</b>	<b>3</b>
1.1	Metallische Supraleiter . . . . .	4
1.2	Niedertemperatur Supraleiter . . . . .	5
1.3	Hochtemperatur Supraleiter (HTSL) . . . . .	5
1.4	Kryoeigenschaften von Metallen . . . . .	6
1.5	Magnetische Eigenschaften . . . . .	7
1.6	Anwendungen in der Praxis . . . . .	7
<b>II</b>	<b>Versuche und Aufgaben</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Versuch 1: Kryoeigenschaften von Metallen</b>	<b>9</b>
1.1	Berechnungen ( <b>Vorbereitung</b> ) . . . . .	9
1.2	Aufgaben zum Versuch . . . . .	10
1.3	Messprotokoll Versuch 1 . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Versuch 2: Verschwinden des elektrischen Widerstandes (Tape)</b>	<b>12</b>
2.1	Messprotokoll Versuch 2 . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Versuch 3: Verschwinden des elektrischen Widerstandes (Ring)</b>	<b>15</b>
3.1	Berechnungen ( <b>Vorbereitung</b> ) . . . . .	15
3.2	Messprotokoll Versuch 3 . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Versuch 4: Meissner-Effekt</b>	<b>18</b>
<b>III</b>	<b>Anhang (für interessierte)</b>	<b>20</b>
<b>1</b>	<b>Anwendung: Projekt AmpaCity</b>	<b>20</b>
1.1	Kenndaten HTSL-Kabel: . . . . .	21
1.2	Kabelaufbau und Endverschluss . . . . .	21
	<b>Anhang 1: Flüssig N2 Dewargefäss</b>	<b>23</b>
	<b>Anhang 2: Spezifischer Widerstand von Kupfer</b>	<b>24</b>
	<b>Anhang 3: Spezifische Wärmekapazität und Enthalpie von Kupfer</b>	<b>25</b>
	<b>Anhang 4: Enthalpie von Kryoflüssigkeiten</b>	<b>26</b>
	<b>Anhang 5: Kritische Stromdichte von HTSL</b>	<b>27</b>

# Teil I

## Theorie

### 1 Der Supraleiter

Kühlt man bestimmte Metalle, Metallverbindungen und keramische Stoffe auf Kryotemperaturen ab, so stellt man fest, dass ihr spezifischer Widerstand bis auf sehr kleine, praktisch nicht messbare Werte absinkt.

Materialien, die dieses Phänomen zeigen, nennt man **Supraleiter (SL)**. Der Übergang vom normalleitenden zum supraleitenden Zustand findet nicht graduell, sondern nahezu sprunghaft in einem engen Temperaturbereich  $\Delta T$  statt.

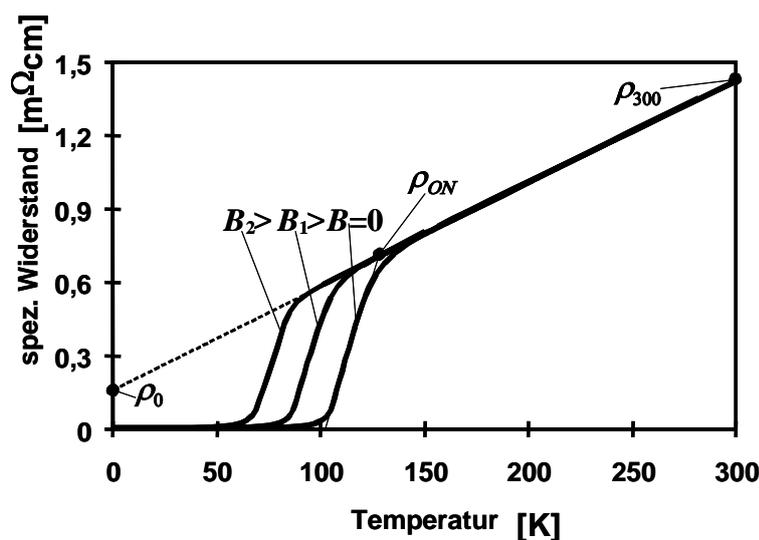
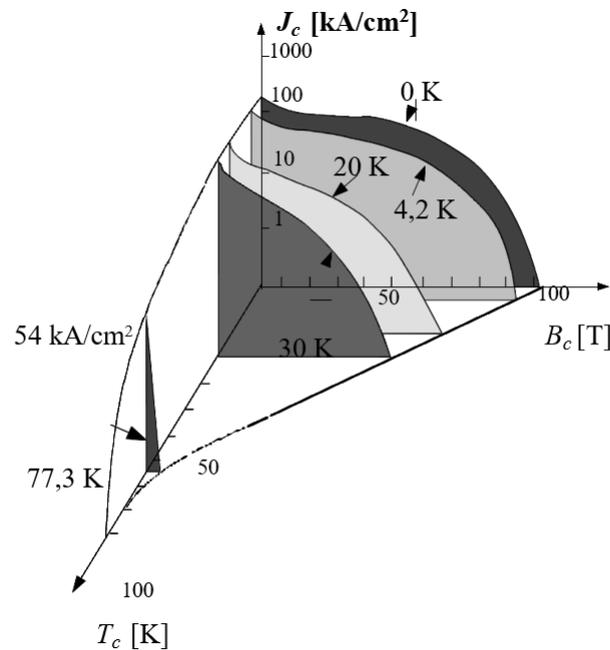


Abbildung 1: Spezifischer Widerstand von  $\text{Bi}_2\text{Sr}_1\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_7$  in Abhängigkeit der Temperatur mit der Flussdichte des Fremdfeldes (senkrecht zur Probe) als Parameter

Wird der Supraleiter einem externen Magnetfeld ausgesetzt, so nimmt der Wert  $T_c$  (Kritische Temperatur) ab, siehe Abbildung 2. Bei einer bestimmten Temperatur behält das Material seinen supraleitenden Zustand bis zu einem Feldwert  $B_c$ , der als kritisches Feld bezeichnet wird. Auch hängt der supraleitende Zustand bei einer Temperatur  $T$  von der Stromdichte  $J$  ab. Bei bestimmten  $T$  und  $B$  Werten bleibt der SL bis zu einer Stromdichte  $J_c$ , die man als kritische Stromdichte bezeichnet, supraleitend. Die drei Größen  $T_c$ ,  $B_c$  und  $J_c$  sind spezifische Materialeigenschaften des SL. Oberhalb von  $B_c$ ,  $J_c$  und  $T_c$  existiert keine Supraleitung.

Wir kennen heute vier Typen von Supraleitern: Die Fullerene, die metallischen, die organischen und die keramischen Supraleiter. Bei den metallischen Supraleitern handelt es sich um Tieftemperatur-Hochstrom-Materialien ( $4.2\text{ K}$ ,  $J_c > 104 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ ), wogegen die keramischen Supraleitern sog. Hochtemperatur-Materialien ( $> 77\text{ K}$ ) sind. Im Praktikum

Abbildung 2:  $T_c$ - $B_c$ - $J_c$ -Diagramm für Ag-ummanteltes  $\text{Bi}_2\text{Sr}_1\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_7$ 

werden mit einigen dieser neuartigen Hochtemperatur-Supraleiter Versuche im flüssigen Stickstoff bei 77 K durchgeführt. Dabei lassen sich interessante Effekte beobachten. Es wird gezeigt, wie sich die grundlegenden elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Supraleiters messtechnisch bestimmen lassen.

## 1.1 Metallische Supraleiter

Die Metalle sind für energietechnische Anwendungen praktisch unbrauchbar, da sowohl  $T_c$  als auch  $B_c$  sehr klein sind. Nur in der Mikroelektronik haben **Nb** und **Pb** für die Herstellung von Kavitäten (für Linearbeschleuniger) eine bestimmte Bedeutung erlangt.

Material	$T_c$ [K] bei $B = 0$ T	$B_c$ [mT] bei $T = 0$ K
Al	1.18	10.5
Hg	4.15	40
Nb	9.25	198
Pb	7.3	80
Sn	3.72	3.5
Ti	0.4	10

Tabelle 1:  $T_c$  und  $B_c$  Werte von metallischen Supraleitern ohne Strombelastung

## 1.2 Niedertemperatur Supraleiter

Supraleiter aus Metallegierungen sind hingegen für die technische Anwendung geeignet. Sie besitzen zwar ebenfalls eine niedrige kritische Temperatur  $T_c$ , vermögen aber auch bei grossen magnetischen Feldern hohe Stromdichten zu tragen. Diese Supraleiter heissen technische **Niedertemperatur Supraleiter (NTSL)**. Tabelle 2 zeigt einige der wichtigsten technischen NTSL. Beachte die noch hohen Stromdichten bei magnetischen Feldern von 5 T und 10 T.  $J_c$  nimmt bei gleich bleibender Temperatur mit zunehmendem  $B$  ab.

Material	$T_c$ [K]	$B_c$ [T] bei $T=0$ K	$J_c$ [ $\frac{\text{kA}}{\text{cm}^2}$ ] bei $T=4.2$ K, $B=5$ T	$J_c$ [ $\frac{\text{kA}}{\text{cm}^2}$ ] bei $T=4.2$ K, $B=10$ T
NbTi	9,5	13	280	20
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	23	220	80
Nb <sub>3</sub> N	16,0	15	-	-
V <sub>3</sub> Ga	16,0	22	80	33
NbGe	23,0	38	20	-
PbMo <sub>6</sub> S <sub>8</sub>	15,0	60	160	100

Tabelle 2: Eigenschaften einiger technischer NTSL

Kupfer (nicht supraleitend) kann im Vergleich zu den technischen NTSL bis zu einer Stromdichte von  $1000 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$  mit Wasserkühlung bzw. bis ca.  $2000 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$  mit Flüssigstickstoffkühlung betrieben werden. Die technischen NTSL erfordern zur Kühlung und für den Betrieb flüssiges He, ihr Betrieb ist daher teuer. Für den Spulenbau in der Hochenergiephysik konnten sie die Kupferspulen fast vollständig verdrängen. Auch im Bereich der Hochfeldmagnete ( $B < 30$  T) werden immer mehr die technischen NTSL verwendet. Wechselstromanwendungen von NTSL sind, von Ausnahmen abgesehen, wegen zu grossen Hystereseverlusten uninteressant. Experimente mit NTSL erfordern zur Kühlung und zum Betrieb flüssiges Helium. Daher werden in diesem Praktikum keine Experimente mit NTSL durchgeführt.

## 1.3 Hochtemperatur Supraleiter (HTSL)

1986 wurden die HTSL am IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon entdeckt. Diese Kuperate oder keramischen Supraleiter zeichnen sich dadurch aus, dass sie auch bei Temperaturen von Flüssiger Stickstoff (fl.N<sub>2</sub>) betrieben werden können.

Charakteristische Eigenschaften einiger bekannter Kuperate sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Technische Anwendungen solcher HTSL sind Übertragungskabel, Transformatoren und Kurzschluss-Strombegrenzer. Flüssiger Stickstoff ist gegenüber fl.He billig und seine Handhabung einfach. Die Verdampfungstemperatur des fl.N<sub>2</sub> ist hoch.

Trotz der günstigen Eigenschaft, dass die HTSL bei fl.N<sub>2</sub> betrieben werden können, was ihre technische Anwendbarkeit wesentlich vereinfacht, ist es bis heute noch nicht möglich ihre kritische Stromdichte ( $J_c$ ) und das kritische Feld ( $B_c$ ) bei 77 K zu erhöhen. Das niedrige  $B_c$  und die niedrige Stromdichte hat dazu geführt, dass das nicht supraleitende

Material	$T_c$ [K] bei $B = 0T$	$B_c$ [T] bei $T = 77K$	$J_c$ $[\frac{A}{cm^2}]$ bei $T = 77K, B = 0.5T$	$J_c$ $[\frac{A}{cm^2}]$ bei $T = 21K, B = 5T$
<b>YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub></b>	92	1	700	60'000
<b>Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub></b>	110	1	600	60'000
<b>Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub></b>	95	1	600	60'000
<b>Ti<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub></b>	125	-	-	-
<b>HgBa<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6</sub></b>	133	-	-	-

Tabelle 3: Charakteristische Eigenschaften einiger HTSL

Kupfer ( $J = 2000 \frac{A}{cm^2}$  bei fl.N<sub>2</sub>) immer noch bevorzugt wird. Bei Temperaturen von fl.H<sub>2</sub> (21 K; letzte Spalte in Tabelle 3) sind die kritischen Stromdichten von HTSL sehr hoch und diese Tatsache könnte zu neuen Anwendungen führen (z.B. Schwebbahnen, HTSL-Kabel).

Die keramischen SL sind spröde und lassen sich nicht einfach zu Drähten grosser Länge ziehen und verarbeiten. Sie brechen leicht, wenn sie gebogen oder unsachgemäss behandelt werden. Mit einiger Mühe ist es gelungen, Drähte bis zu Längen von einigen 100 m zu ziehen. Für die Herstellung von Drähten wird das pulverförmige Ausgangsmaterial (z.B. **Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>**) in **Ag-Mg**-Röhrchen eingefüllt und gezogen. In anderen Anwendungen wird der SL nach der CVD (chemical vapour deposition) Methode auf **Ag-Mg**-Bänder aufgebracht. Mit den Drähten werden zuerst Spulen gewickelt. Anschliessend wird die fertig gewickelte Spule bei 800–1000 K in einer Schutzgas-Atmosphäre reagiert.

Zur Demonstration der Eigenschaften der SL eignen sich die HTSL sehr gut, da der Betrieb mit fl.N<sub>2</sub> sehr einfach ist. HTSL zeigen alle typischen Eigenschaften der Supraleiter wie das Verschwinden des elektrischen Widerstands, die Beobachtung des ideal diamagnetischen Verhaltens oder das Auftreten quantisierter magnetischer Flussschläuche. Die in Tabelle 3 markierten SL werden in den folgenden Versuchen verwendet.

## 1.4 Kryoeigenschaften von Metallen

Wird ein metallischer Leiter, z.B. Kupfer, von Raumtemperatur auf niedrige Temperaturen abgekühlt, dann nimmt sein spezifischer Widerstand monoton ab. Bei 77.6 K (d.h. der Siedetemperatur von fl.N<sub>2</sub>) kann bei reinem Kupfer eine Reduktion des spezifischen Widerstands von  $\frac{\rho_{300}}{\rho_{77.6}} \approx 7$  festgestellt werden. Der spezifische Widerstand und damit die ohmschen Verluste nehmen also um einen Faktor 7 ab.

Kühlt man den metallischen Leiter auf die Temperatur von flüssigem Helium ab ( $T_{fl.He} = 4.2 K$ ), dann ist die Widerstandsabnahme von 300 K auf 4,2 K etwa 1000. Um Gase zu verflüssigen benötigt man eine Verflüssigungsanlage oder eine Kältemaschine, die nach dem Prinzip von Joule-Thomson arbeitet. Diese haben einen relativ niedrigen Wirkungsgrad. Um die ohmsche Verlustleistung  $P_0(T)$  bei einer Kryotemperatur  $T$  (z.B. fl.N<sub>2</sub>) abzuführen, ist die folgende Leistung  $P_k$  nötig:

$$P_k(T) = P_0(T) \cdot \left( \frac{300 \text{ K} - T}{T} \cdot \frac{100}{Ca\%} \right) \tag{1}$$

Dabei ist  $Ca\%$  der prozentuale Anteil des Carnot-Wirkungsgrades einer kommerziellen Kältemaschine. Bei Maschinen mittlerer Leistung (etwa um 100 kW) beträgt  $Ca\%$  ca. 20%. Bei kleinen Maschinen (etwa um 1 kW) ist  $Ca\%$  ca. 10%. Wir berechnen den Leistungsaufwand um ein Material bei Raumtemperatur 300 K und ohmsche Verlustleistung  $P_0$  bei der Temperatur  $T$  gekühlt zu halten:

- **fl.He** Temperatur ( $T = 4.2 \text{ K}$ )  $P_k(T) = 352 \cdot P_0(4.2 \text{ K})$
- **fl.H<sub>2</sub>** Temperatur ( $T = 21 \text{ K}$ )  $P_k(T) = 66 \cdot P_0(21 \text{ K})$

Man muss von Fall zu Fall abklären ob es sinnvoll ist eine Maschine oder ein Übertragungskabel im abgekühlten Zustand zu betreiben.

### 1.5 Magnetische Eigenschaften

Wird ein Supraleiter in ein externes Magnetfeld gebracht, so wird das Feld aus dem Volumen des Supraleiters verdrängt, das heisst, SL verhalten sich wie Diamagnete. Der Supraleiter entwickelt in einer dünnen Schicht (ca. 500 Å) an der Oberfläche Abschirmströme, die das Eindringen des Magnetfeldes in den SL-Körper verhindern. Befindet sich ein supraleitender Körper bei  $T > T_c$  in einem externen Magnetfeld, so verhält sich der Körper wie ein Paramagnet und das Magnetfeld durchdringt ihn. Kühlt man den Körper auf  $T < T_c$  ab, so wird das Magnetfeld wiederum aus dem SL verdrängt. Abbildung 3 veranschaulicht dieses Phänomen. Der experimentelle Nachweis der Feldverdrängung wurde erstmals von MEISSNER (1928) erbracht.

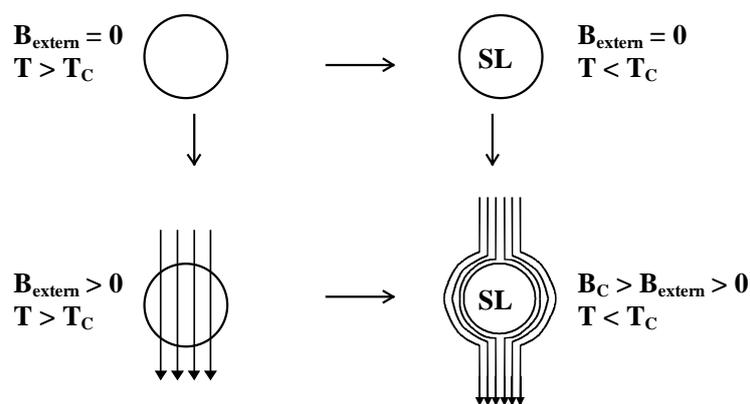


Abbildung 3: Meissner Effekt

### 1.6 Anwendungen in der Praxis

Die Anwendungen von Supraleitern sind vielseitig. Die detaillierte Betrachtung sprengt den Umfang des Praktikums, weshalb wir an dieser Stelle nur eine Übersicht abgeben

und ein Beispiel einer supraleitenden Übertragungsleitung das AmpaCity Projekt vorstellen (Sektion 1 vom Anhang).

Die Übersicht ist angelehnt an das Kapitel 7 aus W. BUCKELS Supraleitung, Grundlagen und Anwendungen, in dem Interessierte gerne die Details nachlesen können.

- Supraleitende Magnetspulen
  - Kernspinresonanz (NMR)
  - Kernspintomographie (MRI)
  - Teilchenbeschleuniger (Bsp. LHC CERN)
  - Kernfusion (Bsp. ITER)
  - Motoren, Generatoren und Transformatoren
  - Magnetschwebebahn (Maglev)
- Supraleitende Kabel und Bänder
- Supraleitende Resonatoren und Filter
- Supraleiter als Detektoren (SQUID)
- Supraleiter in der Mikroelektronik



2. Wie viel flüssiger Stickstoff wird benötigt um die Spule von 300 K auf 77 K runterzukühlen? Die Wärmeverluste an die Umgebung können vernachlässigt werden. Der Füllfaktor vom Kupferdraht (Querschnitt ist rund, sprich es hat etwas Luft zwischen den Wicklungen) muss in der Rechnung berücksichtigt werden. Das Runterkühlen des Hartpapier Spulenkörpers kann vernachlässigt werden, da Hartpapier eine viel kleinere Wärmekapazität als Kupfer aufweist. (Hinweis: Benutzen sie die Tabellen im Anhang und die Dimensionen der Spule auf Abbildung 4)

---



---



---



---



---



---



---



---

## 1.2 Aufgaben zum Versuch

1. Mit den gemessenen Werten von  $U(T)$  bei konstant gehaltenem Strom bestimmen Sie das Widerstandsverhältnis  $R_T/R_{300\text{K}}$  und daraus  $\rho_T/\rho_{300\text{K}}$  und verifizieren Sie somit Ihre Rechnung im Theorieteil.
2. Messen Sie mit der Hallprobe (Gaussmeter) die Werte der magnetischen Induktion  $B$  in verschiedenen Punkten (siehe Abbildung 4) und vergleichen Sie anschliessend die Werte mit den in Matlab(file: BzSpule\_myname.m) berechneten.

## Hinweis zur Rechnung

Die im Matlab verwendete Formel berechnet die magnetische Flussdichteverteilung einer mehrlagigen Spule entlang der Rotationsachse.

$$B(z) = \frac{N \cdot I \cdot \mu}{2 \cdot (r_i - r_a)} \cdot \left( \left( z + \frac{L}{2} \right) \cdot \ln \left( \frac{r_a + \sqrt{r_a^2 + \left( z + \frac{L}{2} \right)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + \left( z + \frac{L}{2} \right)^2}} \right) - \left( z - \frac{L}{2} \right) \cdot \ln \left( \frac{r_a + \sqrt{r_a^2 + \left( z - \frac{L}{2} \right)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + \left( z - \frac{L}{2} \right)^2}} \right) \right) \quad (2)$$

### 1.3 Messprotokoll Versuch 1

1. Zeichnen Sie das Schema der Anordnung um den Widerstand der Spule zu messen. Verwenden Sie die folgenden Komponenten: Spannungsquelle, Voltmeter, Amperemeter, Spule.

2. Stellen Sie die Strombegrenzung der Spannungsquelle auf 190 mA (Knopf CC Set gedrückt halten und Strom auf 190 mA einstellen)
3. Verdrahten Sie den Aufbau und lassen Sie diesen kontrollieren
4. Messen Sie mit dem Volt- und Amperemeter (Nicht an der Stromquelle) bei Zimmertemperatur die Spannung (15 V einstellen) und den Strom und tragen Sie die Messwerte hier ein.

$$U = \dots\dots\dots \quad I = \dots\dots\dots \quad \Rightarrow R = \dots\dots\dots$$

5. Stellen Sie die Spule zum Kühlen (es dauert ca. 20min bis die Spule ganz abgekühlt ist). Sie können währenddessen ein Multimeter auf der Ohm Einstellung anschliessen um zu beobachten wie der Widerstand sinkt.
6. *B*-Feldmessung:
  - (a) Installieren Sie die **axiale Feldsonde** (runder Querschnitt) am Teslameter "Magnet-Physik FH54" (grauer Koffer) und klemmen Sie diese ans Stativ.
  - (b) Platzieren Sie die Spitze der Sonde möglichst mittig innerhalb der Spule (Punkt B in der Abbildung der Spule). Dies ist der Nullpunkt der Messung.
  - (c) Tragen Sie die Messwerte in der Tabelle und im Matlab-File V1SpuleTemplate.m ein. Dieses finden Sie auf dem Computer auf der sich schon im Laufwerk befindlichen CD. Kopieren Sie das File vor dem Öffnen auf den Desktop, da sie sonst nicht speichern können.

Distanz [cm]	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
B-Feld										

7. Messen Sie den Widerstand bei 77 K. Die Magnetfeldmessungen werden bei dieser Temperatur nicht durchgeführt um die Sonde nicht zu beschädigen.

$$R = \dots\dots\dots \quad R_{300\text{K}}/R_{77\text{K}} = \dots\dots\dots$$

8. Entsprechen die Resultate Ihren Erwartungen?

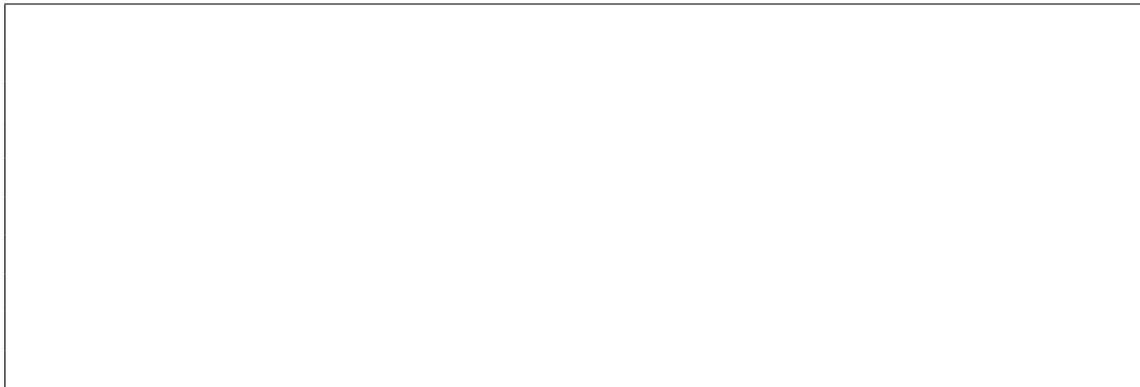
## 2 Versuch 2: Verschwinden des elektrischen Widerstandes (Tape)

Kühlen Sie ein  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  Band auf fl. $\text{N}_2$  Temperatur. Messen Sie den Widerstand und beobachten Sie dessen Zusammenfallen beim Abkühlen.

**Info:**  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , nach Stöchiometrie auch Bi-2223, ist ein supraleitendes Oxid und gehört zur Materialklasse der Kuperate (siehe Tabelle 3). Diese gehören zu den SL mit den höchsten bekannten Übergangstemperaturen.

### 2.1 Messprotokoll Versuch 2

1. Überlegen Sie sich wie Sie den Widerstand der gekühlten Supraleiterschleife am besten messen.
2. Zeichnen Sie das Schema der Anordnung. Komponenten: Hochstromquelle, Supraleiterbox, Mikrovoltmeter.



3. Bauen Sie den Versuch auf und lassen Sie diesen vor dem Einschalten kontrollieren
4. Machen Sie Messungen bei Raumtemperatur:
  - (a) Kontrollieren Sie vor dem Einschalten der Stromquelle, dass der Stromausgang auf  $\leq 2\text{ A}$  eingestellt ist.
  - (b) Legen Sie 1 A und 2 A an und messen Sie die Spannung um den Widerstand der Schleife zu bestimmen. **Im nicht Supraleitenden Zustand nie mehr als 2 A anlegen, der Supraleiter wird sonst zerstört!** Berechnung des Widerstands:

---

---

- (c) Verhält sich der Streifen im Warmen Zustand wie erwartet?

5. Führen Sie jetzt die Messungen bei 77 K durch:
- (a) Stellen Sie den Lüfter so, dass die Anschlüsse des Nanovoltmeter im Luftstrom sind; dies soll ein Einfrieren der Kontakte verhindern.
  - (b) Kühlen Sie den HTSL-Streifen auf 77 K
  - (c) Nullen Sie das Mikrovoltmeter vor Anfang Ihrer Messreihe indem Sie "Zero Check" aktivieren und dann auf "Zero Calibrate" drücken. Gehen Sie anschliessend wieder aus dem "Zero Check" Modus raus.
  - (d) Starten Sie bei 1A, erhöhen Sie den Strom Schrittweise und beobachten Sie wie sich die Spannung verändert. Ab dem kritischen Strom  $I_c$  bewirkt ein höherer Strom  $I > I_c$  einen merklichen Spannungsanstieg.  
Bei welcher Spannung (Kriterium) resp. Strom (Ablese an der Stromquelle) liegt diese Grenze?
  - (e) Tragen Sie die Messwerte ins Matlab-File V2SupraleiterstreifenTemplate.m ein.  
(Sie können die Messwerte auch vorerst in der Tabelle auf der nächsten Seite aufschreiben und später übertragen)  
Das Matlab-File finden Sie auf dem Computer bei Versuch 1 auf der sich schon im Laufwerk befindlichen CD. Kopieren Sie das File auf den Desktop, da sie sonst nicht speichern können.
  - (f) Positionieren Sie nun den Magneten über dem Supraleiter und wiederholen Sie ihre Messungen 2 mal für unterschiedliche Distanzen im Bereich von 0-20 mm.  
Benutzen Sie hierfür die bereitgelegte Magnethalterung mit Messskala.  
Stellen Sie die Spannungsskala vor jeder Messserie auf Null und beeilen Sie sich bei den Messungen, ansonsten werden die Resultate verfälscht.
  - (g) Stellen Sie den Strom **nach den Versuchen** auf 0 A.
6. Berechnen Sie den Widerstand für einige  $I < I_c$  Messwerte und definieren Sie eine obere Grenze des Widerstands gegeben durch die Messgenauigkeit. Was sind die Erkenntnisse aus diesem Versuch?

---

---

---



### 3 Versuch 3: Verschwinden des elektrischen Widerstandes (Ring)

Kühlen Sie einen supraleitenden Ring auf  $4.2\text{K}$  Temperatur. Induzieren Sie mit Hilfe eines Permanentmagneten einen Strom in den Ring. Leiten Sie daraus eine Obergrenze für den Widerstand des Supraleiters ab.

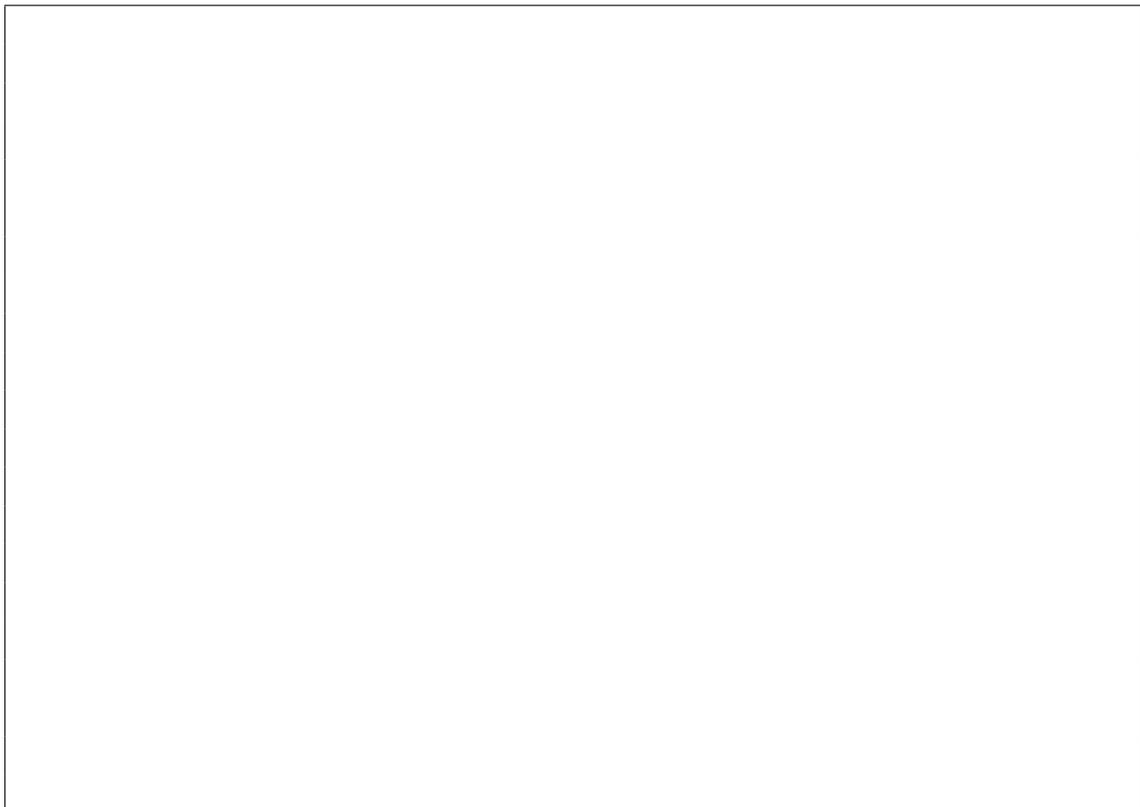
#### 3.1 Berechnungen (Vorbereitung)

1. Es soll ein Widerstandswert für den supraleitenden Ring berechnet werden. Der Strom im supraleitenden Ring nimmt exponentiell ab; Benützen Sie hierfür die unten stehende Formel. An welches passive Bauteil erinnert Sie diese Formel?

Machen Sie eine Skizze des Abklingens und zeichnen Sie folgende Größen ein:  $I_1$  (Strom zur Zeit  $t = 0$ ),  $I_2$  (Strom zur Zeit  $t = \Delta t$ ),  $\Delta I$  und  $\Delta t$ .

Überlegen Sie sich nun wie Sie diese Formel mit den vorhin erwähnten Größen nach  $R$  auflösen können.

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3)$$



2. Der supraleitende Ring besteht aus einer Schleife supraleitenden Drahtes  $r_D = 1$  mm. Der Schleifenradius ist  $r_S = 22$  mm. Berechnen Sie die Induktivität des Rings mit der folgenden Formel.

$$L = \mu_0 \cdot r_S \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot r_S}{r_D} \right) - 1.75 \right) \quad (4)$$

---

---

### 3.2 Messprotokoll Versuch 3

Nun Messen wir die fehlenden Werte, damit wir den Widerstand mit der hergeleiteten Formel berechnen können.

#### Vorgehen:

1. Überlegen Sie sich wie und was Sie messen Wollen!
2. Verbinden Sie das Oszilloskop mit Koaxialkabel am Teslameter Magnet-Physik **FH54**". Verwenden Sie die **transversale Feldsonde** (Sonde mit grauem Schutz). Sonde und Gerät müssen mindestens 5 Minuten warm laufen, da sonst der temperaturbedingte Drift das Messresultat beeinflusst. Schauen Sie das die Anzeige Null anzeigt, ansonsten machen Sie einen Nullabgleich.
3. Die transversale Sonde wird von unten her zwischen dem Deckel, auf dem die Kiste steht und Kistenboden platziert. Schliessen Sie den Lüfter an und positionieren Sie ihn so, dass er in den Schlitz bläst, so dass sich die Sonde im Luftzug befindet. Dies soll die Sonden auf auf konstanter Temperatur halten, denn zu tiefe Temperaturen können die Sonde beschädigen.
4. Stellen Sie das Oszilloskop ein (fragen Sie den Assistent zuerst ob es bereits eingestellt ist).
  - Single Shot
  - Triggern auf fallende Flanke
  - Kopplung DC 1 M $\Omega$
  - Finden Sie die Nulllinie
  - Setzen Sie das Triggerlevel
5. Geben Sie den Supraleiterring in die Kiste, setzen Sie den Teflonstempel in den Ring und richten Sie die Sonde so aus, dass sie direkt unter dem Zentrum des Ringes ist.
6. Induzieren Sie nun mit dem Magnetstempel einen Strom in den Ring und messen Sie dessen B-Feld. Können Sie ein sekundäres Magnetfeld messen (der erste Spitzenwert ist das primäre Magnetfeld des Magnetstempels)?

7. Füllen Sie nun fl.N<sub>2</sub> in den Behälter und kühlen Sie den Supraleiterrings unter seine kritische Temperatur  $T_c$  ab (ca. 5min).
8. Induzieren Sie mit dem Magnetstempel wider einen Strom in den Ring und messen Sie dessen B-Feld (Achtung: Es gibt nun etwas Widerstand). Setzen sie dazu den Magnetstab in den Teflonstempel und drücken Sie ihn bis zum Boden. Ziehen Sie den Magnetstab rasch heraus. Die Messung dauert ca. 10-15 Minuten. Achten Sie darauf, dass der Beginn der Messung nicht aus dem linken Rand hinausläuft, sonst müssen Sie diese nochmals von vorne wiederholen!
9. Starten Sie die Messung (Messzeit ca. 15 Minuten). Machen Sie sich in der Zwischenzeit weiter Gedanken, wie Sie die Messwerte nutzen und welche Messwerte Sie für die weitere Berechnung brauchen. Wie kommen Sie auf den Grenzwert des Widerstands?
10. Setzen Sie die gemessenen Werte in die Formel vom Theorieteil ein und berechnen Sie den Widerstand. Kann ihr Ergebnis stimmen?

---

---

---

---

---

---

## 4 Versuch 4: Meissner-Effekt

Achtung: Dies ist der wohl gefährlichste Versuch, weil das fl.N<sub>2</sub> immer wieder in den Versuchsbehälter nachgefüllt werden muss. Behandeln Sie das fl.N<sub>2</sub> mit dem nötigen Respekt und schauen Sie darauf die Kanne mit fl.N<sub>2</sub> nicht umzustossen!

### Erster Teil:

1. Nehmen Sie die grosse Supraleitertablette und legen Sie diese in den bereitstehenden blauen Styroporbehälter.
2. Legen Sie einen Permanentmagneten auf die Supraleitertablette.
3. Füllen Sie nun **vorsichtig** fl.N<sub>2</sub> in den Behälter, sodass die Supraleitertablette gerade noch nicht bedeckt ist.

Nach kurzer Zeit hat sich der Supraleiter stark abgekühlt. Was beobachten Sie? Nehmen sie dazu Abbildung 5 zu Hilfe.

---

---

---

### Zweiter Teil:

Entfernen Sie den Permanentmagneten und probieren Sie nach kurzer Zeit ihn wieder auf die Supraleitertablette zu legen

Was beobachten Sie? Nehmen sie dazu Abbildung 5 zu Hilfe.

---

---

---

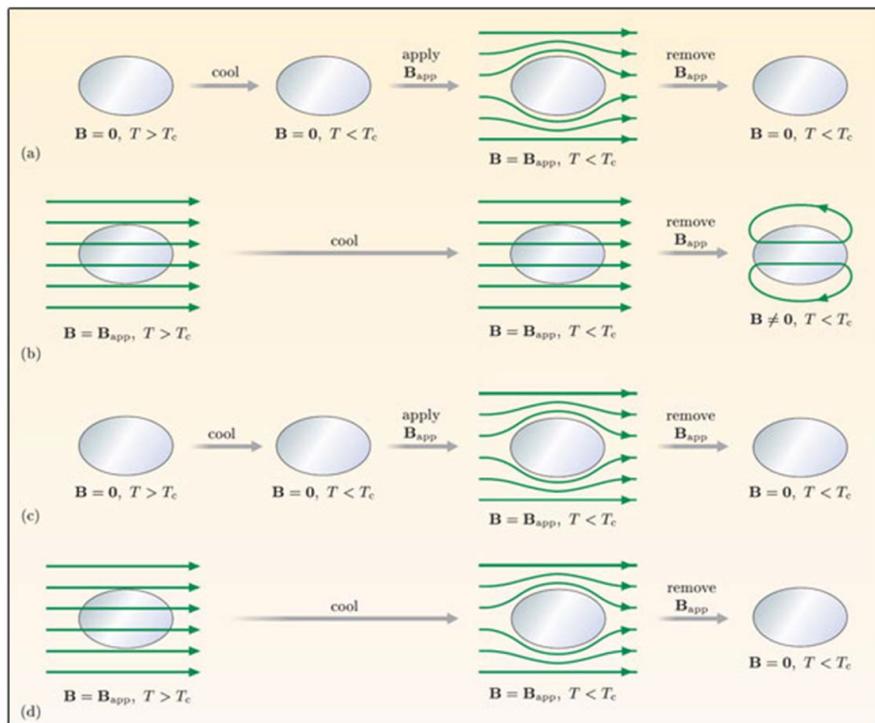


Abbildung 5: Magnetisches Verhalten eines normalen Leiters (a), (b) und eines Supraleiters (c), (d)

## Teil III

# Anhang (für interessierte)

## 1 Anwendung: Projekt AmpaCity

In den letzten Jahren sind die Produktionsverfahren von Hochtemperatur Supraleitern so weit fortgeschritten, dass es technisch möglich ist, Supraleiter in industriellem Massstab zu fertigen. Vorzeigeprojekte sollen die Vorteile von HTS-Übertragungsleitungen und die Durchführbarkeit aufzeigen. Das Vorzeigeprojekt in Europa heisst AmpaCity. In der Innenstadt von Essen werden durch ein Mittelspannungs-HTS-Kabel zwei Umspannwerke verbunden. Das dreiphasig konzentrisch aufgebaute supraleitende Mittelspannungskabel soll ein ca. 1 km langes 110 kV Hochspannungskabel ersetzen.

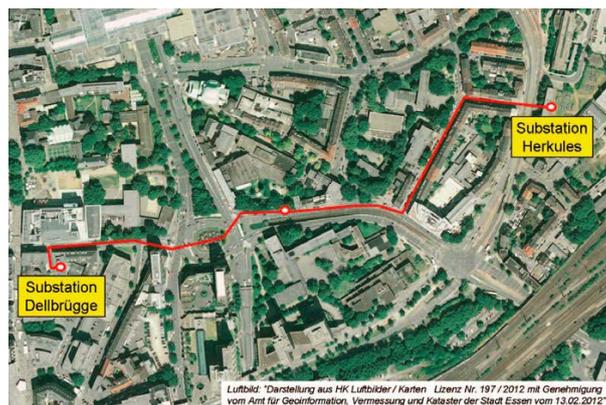


Abbildung 6: Geplante Strecke der HTS-Übertragungsleitung im Zentrum von Essen

Dabei wird erstmals ein Supraleiterkabel mit einem supraleitenden Strombegrenzer (HTS-FCL) kombiniert. Dieser soll das Kabel im Falle eines Kurzschlusses vor zu hohen Strömen schützen.

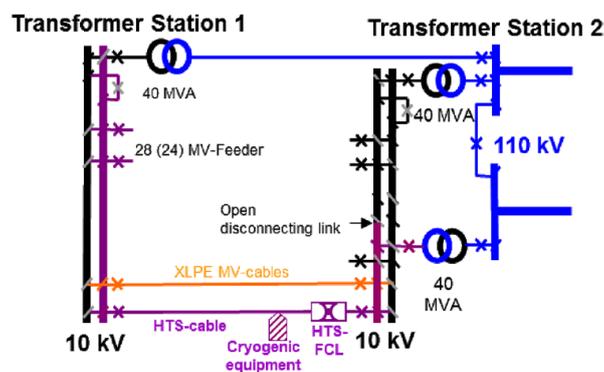


Abbildung 7: Schema Installation des HTS-Kabels

## 1.1 Kenndaten HTSL-Kabel:

- Übertragungsleistung: 40 MVA
- Nennspannung: 10 kV AC (3-Phasensystem)
- Nennstrom: 2.3 kA
- Länge: ca. 1 km

## 1.2 Kabelaufbau und Endverschluss

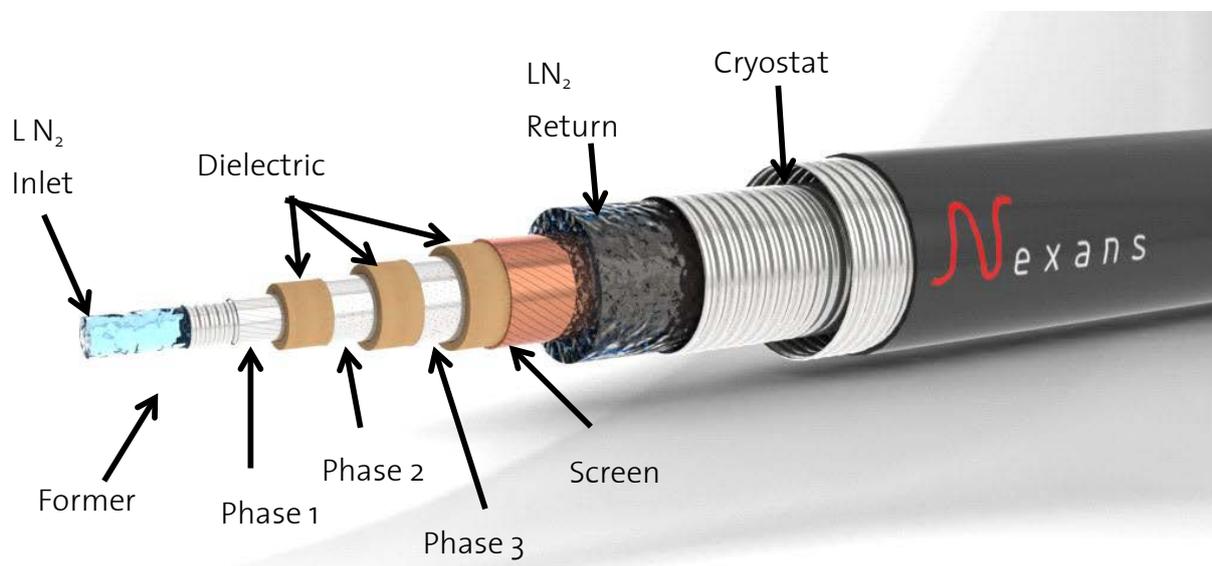


Abbildung 8: Konzentrisch designtes HTS-Kabel

Abbildung 8 zeigt die Struktur eines Supraleitenden Kabels mit konzentrischem Design. Ein rostfrei gerilltes Rohr führt den flüssigen Stickstoff (**Inlet**) und dient zugleich als Kabelführung (**Former**). Die drei verschiedenen Phasenleiter sind auf der Kabelführung verseilt und durch isolierende Schichten getrennt. Der Neutralleiter ist die äusserste Leiterschicht (**Screen**). Zwischen dem Neutralleiter und dem inneren gerillten Rohr des Kabels Kryostat (**Cryostat**) fliesst der flüssige Stickstoff zurück. Der Kabel Kryostat bestehend aus zwei gerillten, konzentrisch angeordneten Rohren bildet die äussere Oberfläche. Um sich die Grösse des 10 kV 2.3 kA Kabels zu verdeutlichen: Der Durchmesser des Neutralleiters ist zwischen 55–65 mm, der der äusseren Röhre des Kryostaten 120–130 mm. Um die supraleitenden Leiter zu bilden haben sich 4 mm breite und extrem flache „Strips“ aus erster Generation **BSCCO** und zweite Generation **YBCO** Supraleiter bewährt. Die Leiter zweiter Generation versprechen dabei ein attraktives Preis-Leistungsverhältnis.

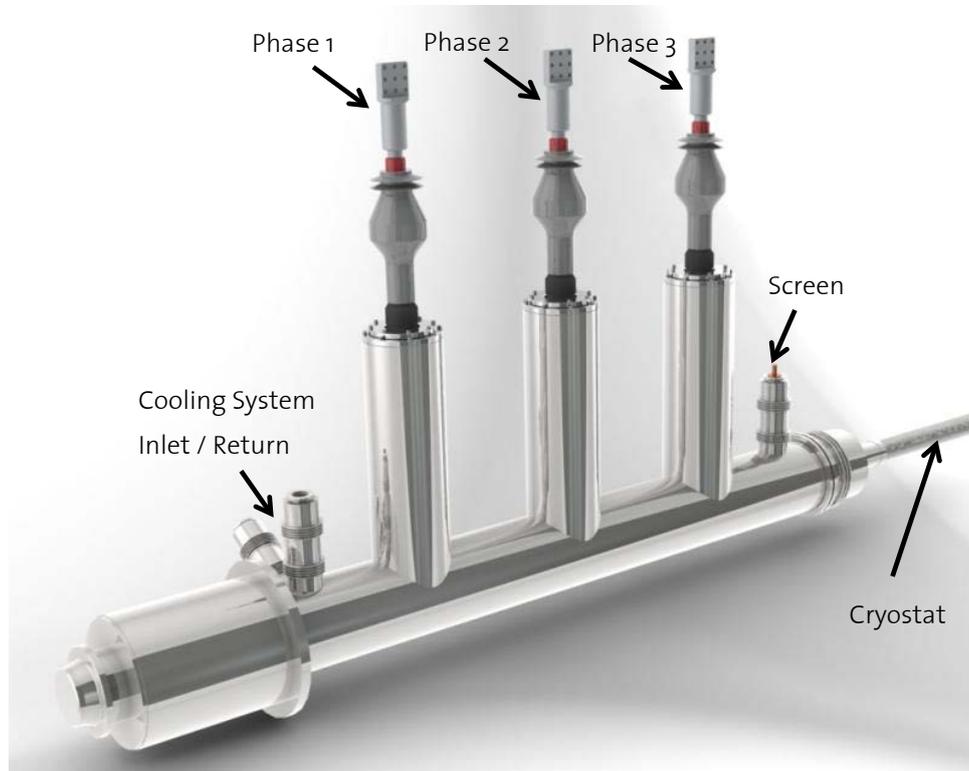
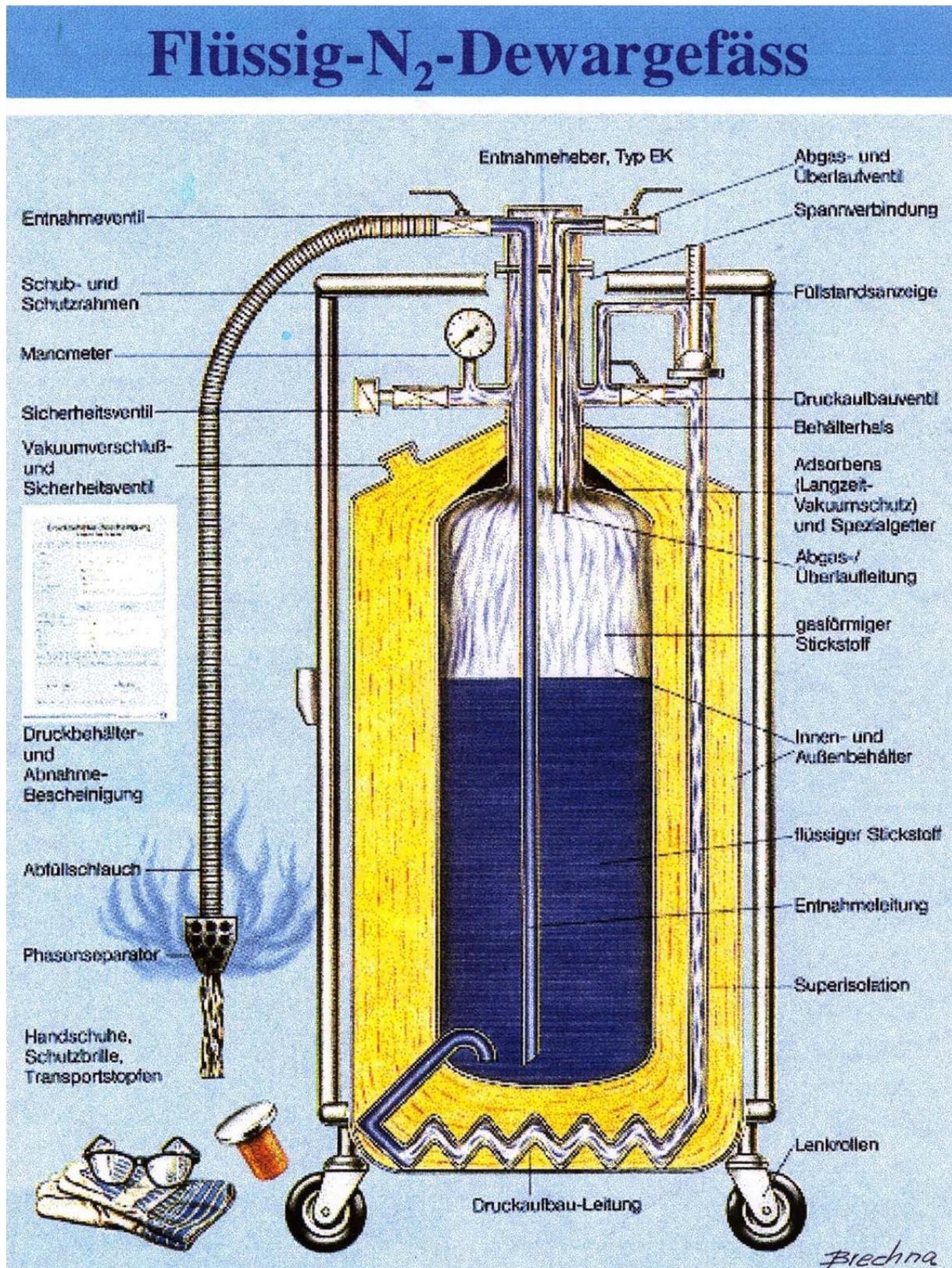


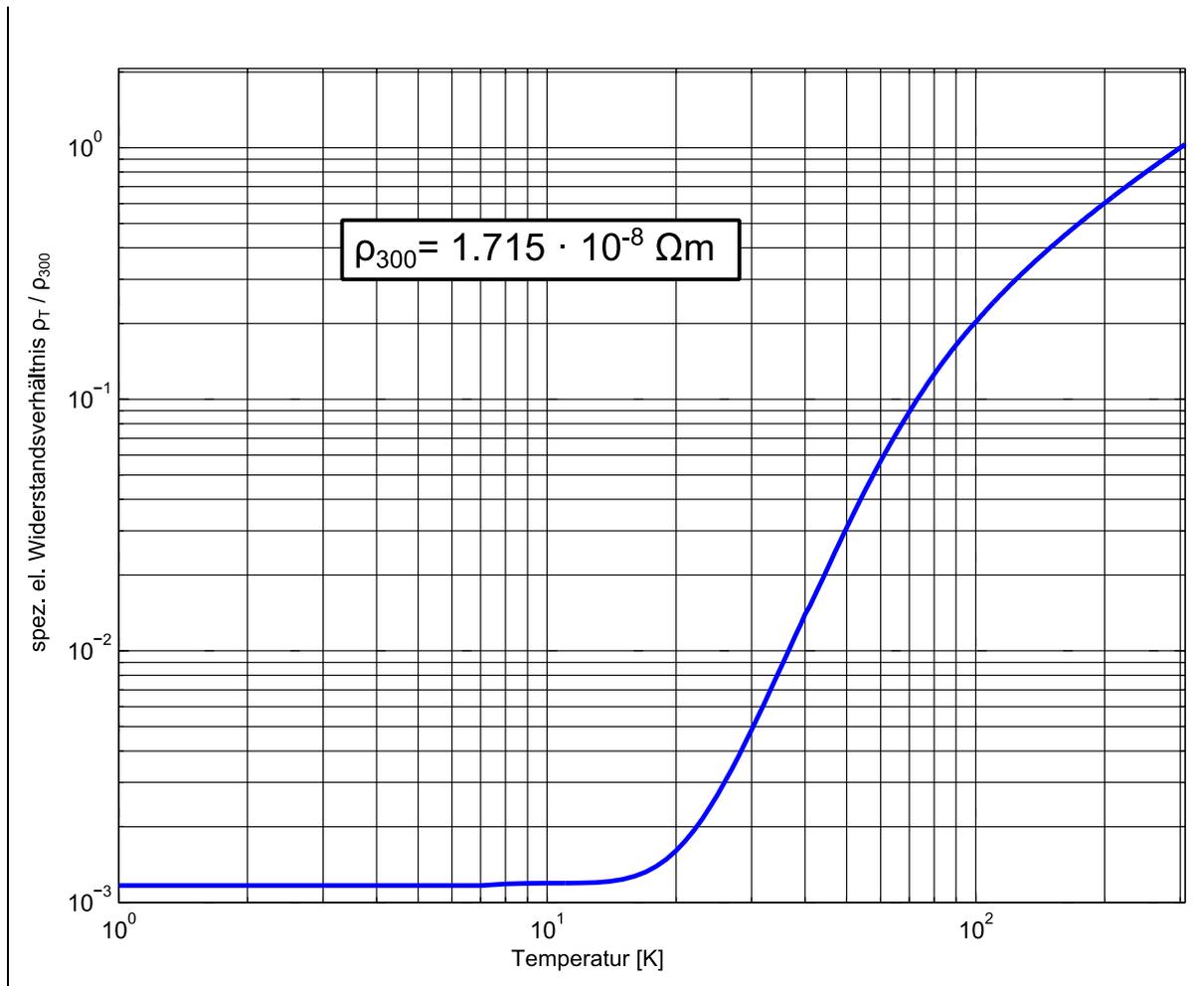
Abbildung 9: Abschluss HTS-Kabel

Der Kabelendverschluss bildet den Übergang vom Supraleiter zum normalen Hochspannungsnetz. Der Kabelendverschluss hat Anschlüsse für die drei Phasen und den Neutralleiter. Beim Kabelendverschluss befindet sich der Inlet und Return des flüssigen Stickstoffs der für den Kühlkreislauf benötigt wird.

## Anhang 1: Flüssig-N<sub>2</sub> Dewargefäß



## Anhang 2: Spezifischer Widerstand von Kupfer mit einem Reinheitsgrad von 99.999%

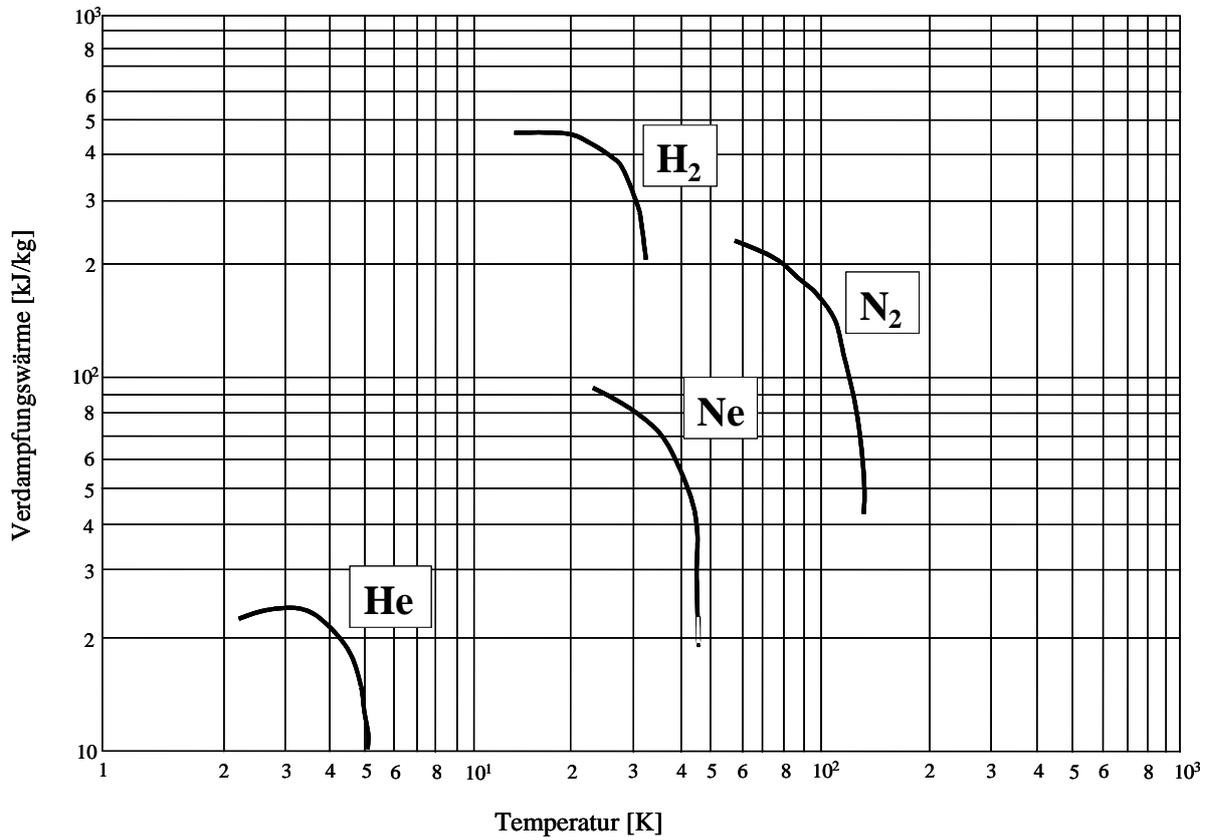


## Anhang 3: Spezifische Wärmekapazität und Enthalpie von Kupfer

Temp. K	$C_p$ J/(gK)	$H^*$ J/g
10	0,00086	0,0024
15	0,0027	0,0107
20	0,0077	0,034
25	0,016	0,09
30	0,027	0,195
40	0,06	0,61
50	0,099	1,4
60	0,137	2,58
70	0,173	4,13
80	0,205	6,02
90	0,232	8,22
100	0,254	10,6
120	0,288	16,1
140	0,313	22,1
160	0,332	28,5
180	0,346	35,3
200	0,356	42,4
220	0,364	49,6
240	0,371	56,9
260	0,376	64,4
280	0,381	72
300	0,386	79,6

$$H = \int_T^0 C_p dT = H(T) - H(0) \quad (5)$$

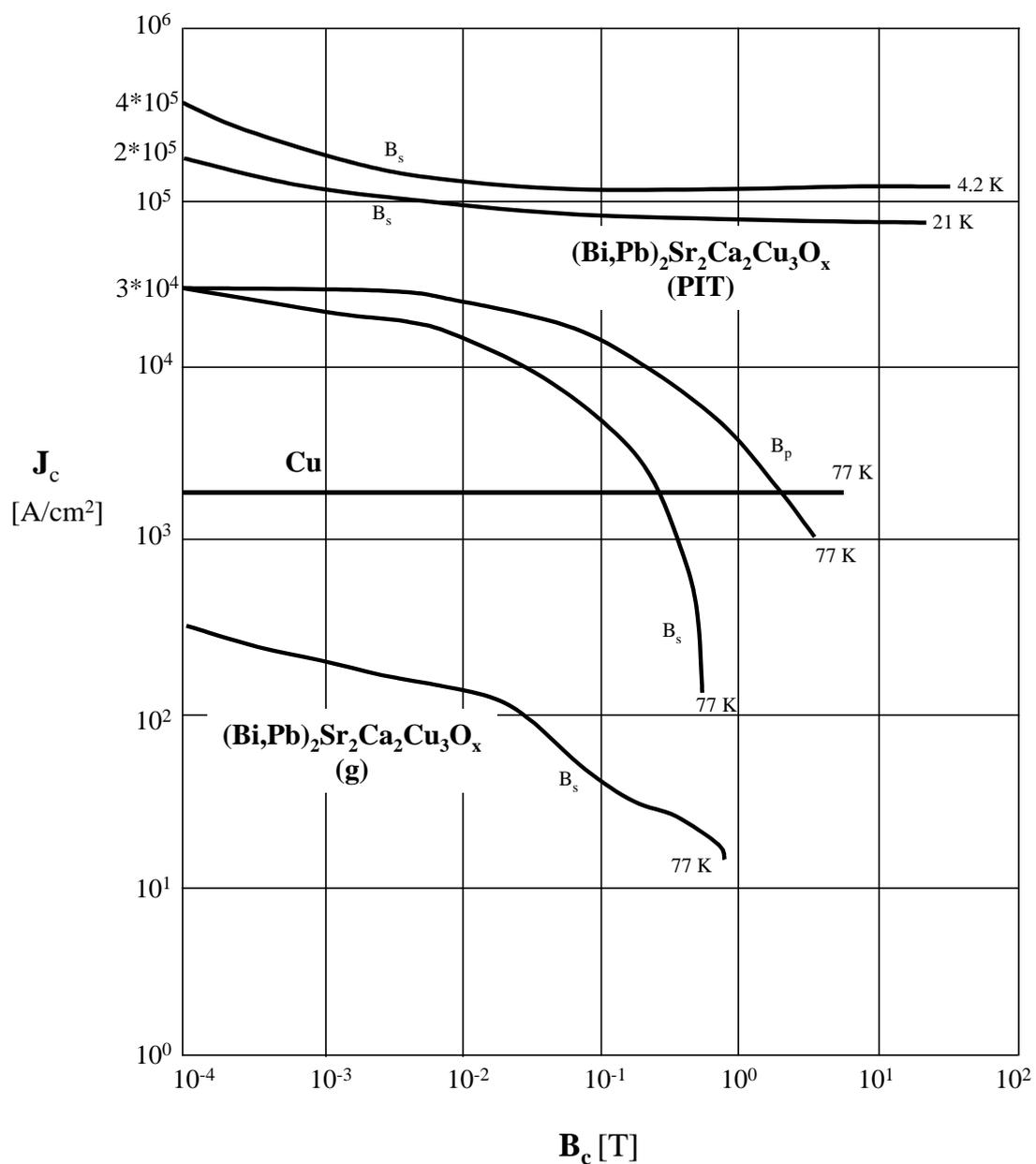
## Anhang 4: Enthalpie von Kryoflüssigkeiten



## Anhang 5: Kritische Stromdichte von HTSL in Abhängigkeit des Magnetfeldes

B Magnetische Induktion (s..senkrecht,p..parallel,c..kritisch)  
 J<sub>c</sub> Kritische Transportstromdichte im Supraleiter

PIT Pulver-im-Rohr-Verfahren  
 g gesintert



## Sicherheitsanweisungen zum Versuch

**Grundlagen** Tiefkalt verflüssigte Gase sind Gase, die auf eine Temperatur deutlich unterhalb ihrer Siedepunktes abgekühlt wurden (Kryo-Gas). Stickstoff z.B. hat eine Siedetemperatur von  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Hautkontakt mit solchen extrem kalten Substanzen kann zu Kälteverbrennungen führen! Des weiteren können Materialien, die für den Kontakt mit Kryo-Flüssigkeiten nicht geeignet sind aber dennoch in Kontakt kommen spröde werden (Bruchgefahr!) Beim Verdampfen von 1 Liter flüssigem Stickstoff entstehen 700 Liter ( $0.7\text{ m}^3$ ) Gas. Aufgrund dieser grossen Volumenzunahme dürfen Flüssiggase nur in geeigneten Druckbehältern oder offenen Gefässen aufbewahrt und transportiert werden. Kalter, gasförmiger Stickstoff (beim Übergang von der flüssigen in die Gasphase) ist schwerer als Luft und verdrängt daher den Sauerstoff aus geschlossenen Räumen (Erstickungsgefahr!).

**Umgang** Direkter kontakt mit flüssigen Stickstoff und mit kalten Bauteilen muss unbedingt vermieden werden. Bei der handhabung von flüssigem Stickstoff ist das Tragen von Schutzhandschuhen und Schutzbrille sowie das Studium der Sicherheitsanweisung Pflicht! Das Tragen von geschlossenen Schuhen ist empfohlen. Flüssiger Stickstoff darf nur mit den dafür vorgesehenen Behälter transportiert werden. Geeignete Behälter sind die 1l offenen Dewargefässe und die blauen Styroporboxen. Falls es zu Verletzungen kommt darf die Kleidung niemals vom verletzten Körperteil entfernt werden. Die Kältewunden dürfen nicht gerieben oder massiert werden. Gelangt flüssiger Stickstoff auf die Haut oder in die Augen, ist die betroffene Stelle sofort mit viel Wasser zu spülen.

Bei Unsicherheiten jeder Art ist unbedingt ein verantwortlicher Mitarbeiter des High Voltage Laboratory beizuziehen!