

einem guten Leiter (Kupfer) und einem im Normalzustand schlechten Leiter (Blei) illustrieren sollen. Blei wird unterhalb einer Temperatur $T_C < 7,2$ K schlagartig supraleitend.

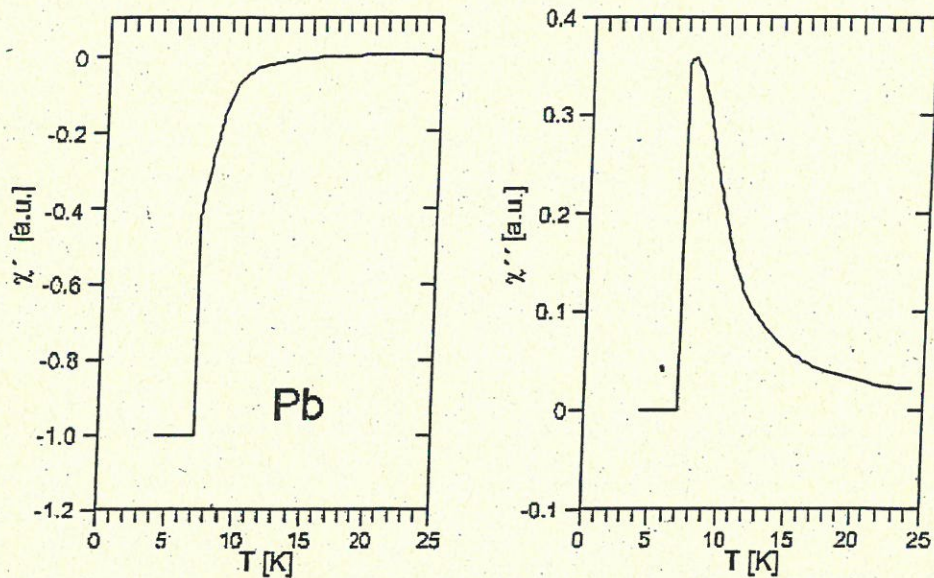


Abb. 5 : Messung an einer Bleikugel mit $T_C = 7.2$. Die Ausgangsspannung des Lock-In-Verstärkers wurde in SI-Suszeptibilität umgerechnet. Durch eine solche Messung kann die Empfindlichkeit der Meßanordnung kalibriert werden. An χ'' erkennt man die ideale Leitfähigkeit unterhalb T_C . Hier werden alle elektrischen Verluste durch den supraleitenden Strom kurzgeschlossen.

4. Versuchsaufbau

4.1 Das Verfahren der AC-Suszeptibilität

Das Meßverfahren der AC-Suszeptibilität erlaubt die magnetische Untersuchung von Proben mit hoher Empfindlichkeit bei relativ geringem Aufwand. In haushaltsüblichen Leitungssuchern wird ein ähnliches Prinzip angewendet.

Das Hartshorn-Spulensystem besteht aus einer Primär- und zwei Sekundärspulen, welche übereinander auf einen nichtmagnetischen Spulenkörper gewickelt sind.

Die äußere Primärwicklung mit $N_{\text{prim}} = 2116$ Windungen wird von einem konstanten Wechselstrom durchflossen und erzeugt ein im Zentrum der Spule sehr homogenes magnetisches Wechselfeld \vec{H} . Das Feld wirkt auf zwei innere Sekundär-Wicklungen („Pick-up-Spulen“), die jeweils die gleiche Windungszahl $N_{\text{sek}} = 512$, jedoch entgegengesetzten Windungssinn besitzen. Sie sind in Serie geschaltet, so daß die Summe der Induktionsspannungen Null ergibt, wenn sich in beiden sekundären Spulen dasselbe Material befindet. Diese Anordnung ergibt eine Brückenschaltung, analog zur Wheatstonschen Brücke. Ein zusätzlicher Wickelabgriff ermöglicht mittels ohmschen Potentiometer einen Feinabgleich des Nullpunktes. Ein Differenzverstärker mißt die Ausgangsspannung symmetrisch zum Nullpotential.

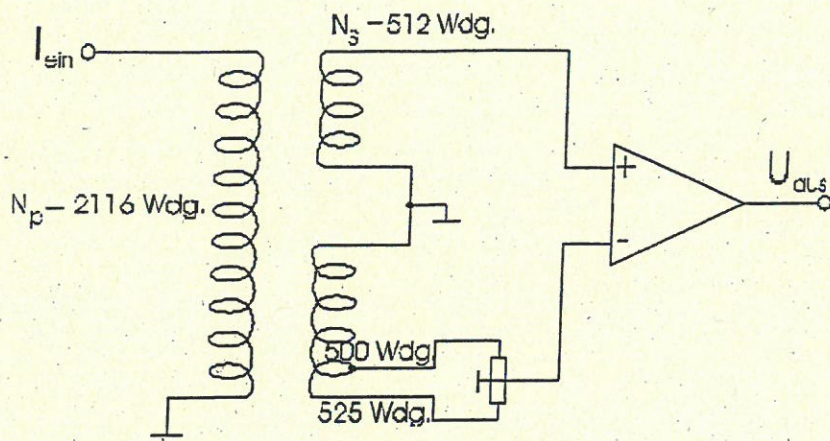


Abb. 6: Schaltplan der Hartshorn-Brückenschaltung.

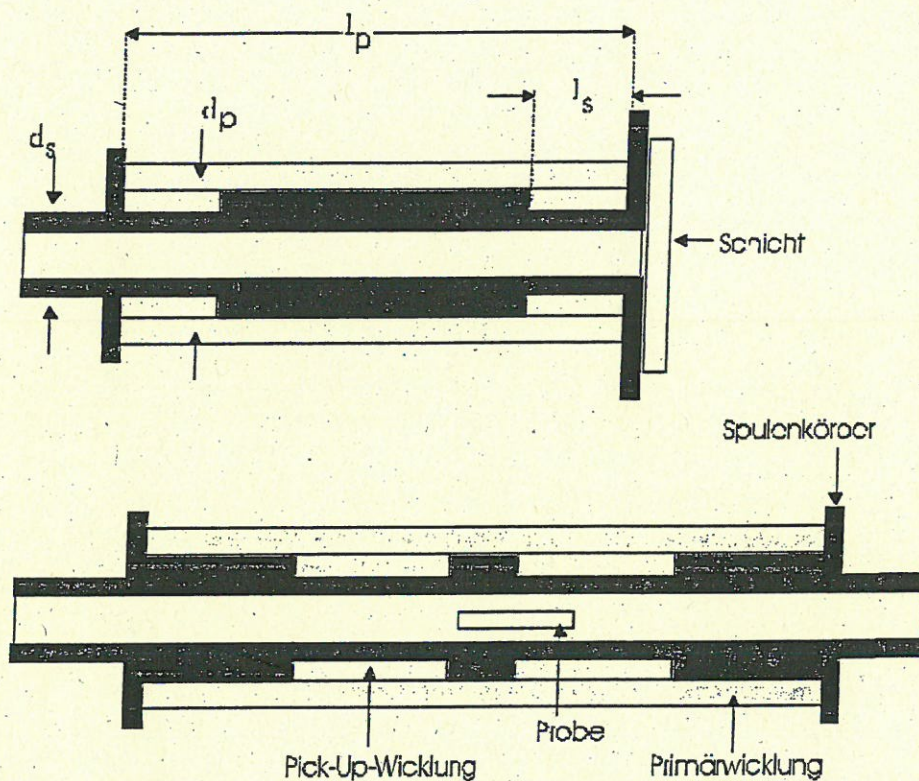


Abb. 7: Schnittbilder der Spulenanordnungen für die AC-Suszeptibilität, oben für dünne Schichten, unten für Einkristalle und Bulk-Proben.

Für verschiedene Probengeometrien (Kugel, Stäbchen, Schicht) benötigt man verschiedene Spulentypen. Für das Praktikum steht die untere Spule zur Verfügung. Die Geometriedaten sind : $l_p = 50 \text{ mm}$, $l_s = 5 \text{ mm}$, $d_p = 7 \text{ mm}$, $d_s = 5 \text{ mm}$. Der Kupferdraht der Wicklungen besitzt eine Stärke von $80 \mu\text{m}$ plus ca. $10 \mu\text{m}$ Lack-Isolation.

Die Primärwicklung der Hartshorn-Brücke, durch die ein Wechselstrom $I_0(t) \sin(\omega t)$ fließt, erzeugt ein Magnetfeld $H(t)$:

$$H(t) = H_0 \sin(\omega t); \quad H_0 = \frac{I_0 N_{\text{prim}}}{l_p} \quad (5)$$

Das zweite Differential beschreibt eine Relaxation der Magnetisierung, diese soll hier jedoch nicht betrachtet werden. Damit ergibt sich die Ausgangsspannung der Hartshorn-Brücke zu :

$$U_a(t) = 2 \pi \mu_0 \frac{N_p N_s}{l_p l_s} I_0 v \frac{V_{\text{Probe}}}{1 - n_M} \cos(2 \pi v t) \frac{\partial M}{\partial H} \quad (12)$$

Dieses Wechselspannungssignal wird mittels des Lock-In-Verfahrens phasensensitiv ausgewertet.

Die Größe

$$\frac{\partial M}{\partial H} := \chi_{ac} = \chi' - i \chi'' \quad (13)$$

nennt man die komplexe Wechselstrom-Suszeptibilität. Der Realteil χ' ist in Phase mit dem erzeugenden Magnetfeld H und gibt die Abschirmung der Probe an. Bei diamagnetischen Proben ist diese Größe immer negativ und bei Supraleitern besitzt sie den Wert -1 . χ'' liefert einen Anteil der Magnetisierung, dessen Phase um $-\frac{\pi}{2}$ gegenüber dem Magnetfeld H verschoben ist. Dieses wird durch die komplexe Schreibweise symbolisiert. χ'' ist ein Maß für die Wirkleistung W , welche das Magnetfeld H in der Probe während jeder Periode dissipiert. Dieses erkennt man nach folgender Rechnung :

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{T} \int_0^T B(H) dH = \frac{\mu_0}{T} \int_0^T (M(H) + H(t)) \frac{dH}{dt} dt \\ \frac{dH}{dt} &= H_0 \omega \cos(\omega t); \quad M = \chi' H_0 \sin(\omega t) + \chi'' H_0 \cos(\omega t); \\ W &= \frac{\mu_0}{T} H_0^2 \omega \int (\chi' \sin(\omega t) \cos(\omega t) + \chi'' \cos^2(\omega t) + \sin(\omega t) \cos(\omega t)) dt \\ &= \frac{\mu_0}{2} \chi'' \omega H_0^2 \\ &\Rightarrow \chi'' \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Da die Wirkleistung positiv oder Null ist, muß auch χ'' immer größer oder gleich Null sein. Die statische Suszeptibilität $\chi_0 = \frac{M}{H}$ kann hier nicht gemessen werden. Sie ist nur bei Messungen in rein statischen Magnetfeldern H zugänglich, beispielsweise bei Messungen mit SQUID-Magnetometern. Außerdem sei hier noch daran erinnert, daß χ' und χ'' über die Kramers-Kronig-Relation miteinander verknüpft sind.