

## FYS 1120: Oblig 2 – Magnetisme og magnetisering

### 1. Måling av magnetisk susceptibilitet

Apparaturen er skissert i Fig.2. Prøven (her vismut) som skal undersøkes bør være utformet som en langstrakt sylindrisk eller prismatisk stav. Denne henges i det inhomogene feltet mellom polene til en elektromagnet. Kraften som virker på prøven måles ved hjelp av en balansevekt.

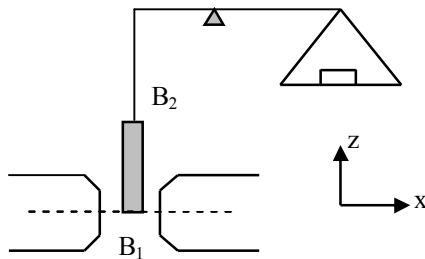


Fig.2. Apparatur for måling av magnetisk susceptibilitet

Vi orienterer koordinatsystemet som vist i figuren. La prøven ha et tverrsnitt  $A$  og susceptibilitet  $\chi$ . Hvis vi ser bort fra luftens susceptibilitet, kan vi finne  $z$ -komponenten til den magnetiske kraften som virker på prøven slik:

$$\begin{aligned} F_z &= \int dF_z = \int (\vec{M} \cdot \nabla) B_z dV \\ &= A \int_0^a (\vec{M} \cdot \nabla) B_z dz \\ &= \chi A \int_0^a H_x \frac{\partial B_z}{\partial x} dz \\ &= \frac{1}{\mu_0} \chi A \int_0^a B_x \frac{\partial B_x}{\partial z} dz \\ &= -\frac{1}{2\mu_0} \chi A (B_1^2 - B_2^2) \end{aligned}$$

Flukstettheten ( $x$ -komponenten) ved stavens nedre ende er  $B_1$  og ved den øvre enden  $B_2$ . En diamagnetisk stav vil skyves ut av feltet ( $F_z > 0$ ). En paramagnetisk stav vil trekkes inn i feltet ( $F_z < 0$ ).

#### Oppgave:

Bestem susceptibiliteten til vismut.

### 2. Måling av magnetisk fluks

Faradays induksjonslov sier at dersom den magnetiske fluksen  $\Phi$  gjennom en flate endres, så vil

det i en strømkrets som ligger rundt flaten oppstå en elektromotorisk spenning  $V_E$  gitt ved:

$$V_E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Slik at

$$V_E dt = -d\Phi$$

eller

$$\int_{t_1}^{t_2} V_E dt = -\int_{t_1}^{t_2} d\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$

Endringen i fluksen fra tiden  $t_1$  til tiden  $t_2$  er altså lik tidsintegralet av den induerte spenningen i tiden fra  $t_1$  til  $t_2$ . Tidsintegralet bestemmes ved hjelp av en elektronisk spenningsintegrator.

Integratoren gir et totalutslag  $\alpha$  som er proporsjonalt med tidsintegralet av spenningen  $V$  over inngangskontaktene. Følsomheten kan varieres med dempningsfaktoren  $D$ . Totalutslaget  $\alpha$  er produktet av dempningsfaktoren  $D$  og skalaavlesningen  $S$ . Vi har da:

$$\int_{t_1}^{t_2} V dt = k\alpha = kDS$$

Her er  $k$  en konstant som er karakteristisk for hvert instrument og må bestemmes ved en spesiell kalibrering (se det følgende). Verdien av  $D$  innstilles med en reguleringsknott, og  $S$  leses av på skalaen. Produktet av de tre størrelsene  $k$ ,  $D$  og  $S$  gir oss fluksforandringen gjennom den flaten som omslutes av den ledningen som er tilkopleet integratorens inngangskontakter.

Integratoren har digital skala. Den kan nullstilles ved å trykke på "Reset"-knappen. Skalaen viser positive og negative verdier etter hvilken polaritet vi har på inngangsspenningen. På grunn av støy og termisk ubalanse vil integratoren vanligvis ha en viss nullpunkttsdrift, slik at den gir et visst utslag selv om spenningen er null. Nullpunkttsdriften kan reduseres ved å regulere "0-just"-kontrollen slik at skalaavlesningen ikke endrer seg med tiden når inngangen er kortslettet. For å redusere virkningen av nullpunkttsdriften bør man gjøre målinger med utslag i begge retninger. Integratoren bør ikke slås av før hele eksperimentet er ferdig og det bør alltid være ledende forbindelse mellom inngangskontaktene. Nullpunkttsdriften bør kontrolleres fra tid til annen.

Før integratoren kan brukes til målinger må vi kalibrere den ved å bestemme verdien av konstanten

$k$ . Dette gjøres ved å legge en konstant kjent spenning  $V_0$  over inngangskontaktene og måle tiden  $t_0$  det tar å få et totalutslag  $\alpha$ . Tidsintegralet er da  $V_0 t_0$  og  $k$  kan bestemmes av likningen  $kDS = V_0 t_0$ . NB! Kontroller at  $V_0 < 10$  mV (ellers går en sikring i integratoren). Koplingskjema er gitt i Fig.1.

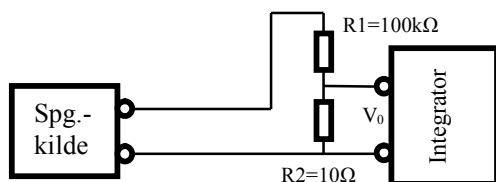


Fig.1: Koplingskjema for kalibrering av spenningsintegrator

Med å bytte om kablene koblet til spenningskilden kan vi snu polariteten og utføre målinger med utslag i begge retninger. Spenningsdeleren består av motstandene  $R_1=100$  k $\Omega$  og  $R_2=10$   $\Omega$ . Kalibreringskonstanten  $k$  måles i Vs eller Wb (weber), som er enheten for magnetisk fluks.

### Oppgave:

Bestem spenningsintegratorens kalibreringskonstant. Benytt så en liten spole til å måle flukstettheten  $B$  mellom magnetens poler. Spolen kobles til spenningsintegratoren. Integratoren nullstilles mens spolen holdes mellom polene. Så fjernes spolen fra magnetfeltet. Flukstettheten beregnes ved hjelp av formelen

$$B = \frac{kDS}{NA}$$

der  $S$  er fluksmeterutslaget og  $NA$  er produktet av spolens areal og vindingstall.

### 3. Måling av magnetisk hysteresese

Sammenhengen mellom den magnetiske feltstyrke  $H$  og den magnetiske flukstetthet  $B$  inne i et magnetisk materiale bestemmes på enkleste måte ved hjelp av en såkalt Rowland-ring. Det ferromagnetiske materialet som skal undersøkes er utformet som en ring med midlere radius  $R$  og tykkelse  $2r$ . En isolert koppertråd er viklet jevnt rundt ringen. Denne viklingen kalles primærspolen. Den magnetiske feltstyrke langs ringens akse er gitt ved

$$H = \frac{NI}{2\pi R}$$

der  $I$  er strømmen i primærspolen og  $N$  er antall viklinger. Hvis  $r \ll R$ , er  $H$  tilnærmet konstant inne i ringen.

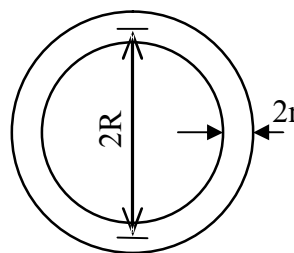


Fig. 3. Rowland-ring

Den magnetiske flukstettheten  $B$  bestemmes ved hjelp av en sekundærspole som bør ligge innenfor primærspolen. Sekundærspolen kobles til en spenningsintegrator.

En apparatur som kan benyttes til registrering av hysteresekurver er vist i Fig.4.

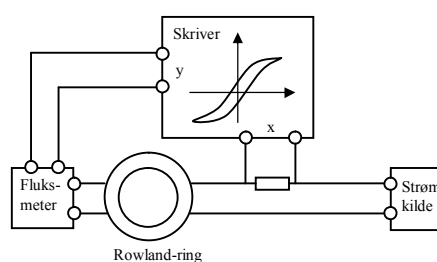


Fig.4. Apparat for registrering av hysteresekurver

Primærstrømmen passerer en liten motstand. Spenningen over motstanden styrer skriverens bevegelse i x-retningen. Den spenning som indukeres i sekundærspolen integreres i fluksmeteret. Fra dette går et signal til skriverens y-inngang. Når primærstrømmen varieres, vil skriveren tegne en kurve slik at

$$x \propto I \propto H$$

og

$$y \propto \int \varepsilon dt = \int d\Phi = \Delta\Phi \propto \Delta B$$

Enhetene på aksene kan bestemmes når følgende størrelser er kjent:

- Primærstrømmens maksimalverdi
- Spolens vindingstall ( $N$  og  $n$ )
- Rowland-ringens dimensjoner ( $R$  og  $r$ )
- Fluksmeterets kalibreringskonstant  $k$  og dempningsfaktor  $D$
- Fluksmeterens signalene  $S_1$  og  $S_2$  som svarer til verdiene  $+I_m$  og  $-I_m$  for primærstrømmen.

Vi får

$$H_{\max} = \frac{NI_m}{2\pi R}$$

og

$$B_{\max} = \frac{kD|S_1 - S_2|}{2nA}$$

der  $n$  er sekundærspolens vindingstall.

Opptegning av hysteresekurver foregår slik:

- Strømmen varieres jevnt fra 0 til  $I_m$
- Strømmen varieres jevnt fra  $I_m$  til 0
- Strømmen varieres jevnt fra 0 til  $-I_m$
- Strømmen varieres jevnt fra  $-I_m$  til 0

**Materialet bør sendes gjennom hysteresesløyfen flere ganger før kurven registreres på millimeter-papir.**

Ved endring av strømmen  $I$  i primærspolen, endres den magnetiske fluks  $\Phi$  i materialet. Det induseres en elektromotorisk spenning av størrelse

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt}$$

i primærspolen. Det arbeid som utføres av strømkilden i løpet av tiden  $dt$  for å opprettholde strømmen er

$$dW = -\varepsilon I dt = -NAI dB$$

der  $A$  er ringens tverrsnitt ( $\pi r^2$ ). Ved utnyttelse av sammenhengen mellom  $H$  og  $I$  fåes

$$dW = -VH dB$$

der  $V$  er ringens volum. Inne i materialet er

$$B = \mu_0(H + M)$$

der  $M$  er magnetiseringen. Vi ser at det arbeid som medgår til magnetisering av materialet er gitt ved

$$dW_m = -V\mu_0 H dM$$

Hysteresetapet ved ett omløp av hysteresekurven er

$$\Delta E = V \oint H dB$$

Denne energien omdannes til varme i det ferromagnetiske materialet.

#### **Oppgave: Magnetiseringskurve for jern**

Benytt en Rowland-ring. Lag et sett hysteresekurver med primærstrømmer 0,5, 1, 2, 3, og 4 A på **et** millimeter-arc. Lag en graf av  $M$  versus  $H$  (den "normale magnetiseringskurve") for de 5 punktene ( $H_{maks}$ ,  $B_{maks}$ ), dvs. punktet på hver kurve som er øverst til høyre.

#### **4. Numerisk oppgave**

Finn hysteresetapet i materialet for  $I = 4$  A ved bruken av MATLAB-programmet `hysterestap.m`. Start MATLAB og deretter start programmet ved å skrive "hysteresetap <ENTER>".

Følg veiledningen som gis når programmet startes. For hver verdi av  $H$  (velg minst 9 verdier fra  $H_{min}$  til  $H_{maks}$ ) skal  $B_o$  (øverste del av sløyfen) og  $B_n$  (nederste del av sløyfen) oppgis. **Merk at  $H$  skal oppgis i A/m og  $B$  i mT (ikke T).**