

## **Introduksjon til labøvelser for FYS1120 - Elektromagnetisme, UiO, høsten 2014**

### **Laboratorierommet**

Alle labøvelser foregår på FV225.

### **Veilederstabben**

Veilederstabben består i år av Alex Read (leder), Frank Bello, Vanja Morisbak, Per Even Sandholt, Trine Tveten, og Lasse Vines. En laboratorieøvelse er ikke en eksamsituasjon. Om du har et spørsmål, diskuter det først i arbeidsgruppen, men ikke nol med å be en veileder om hjelp. Det er også helt i orden å kommunisere med de andre arbeidsgruppene.

### **Seint oppmøte eller fravær**

Studentene som møter opp til en laboratorieøvelse mer enn 30 minutter etter at labtimene starter blir bedt om å komme tilbake en annen dag. Hvis man av forskjellige grunner går glipp av en labøvelse, kontakt hovedveilederen så snart som mulig, og lag en avtale om å møte opp på en annen dag.

### **Hvilken øvelse?**

Sjekk tabellen på kursets hjemmeside for å se i hvilken rekkefølge du skal gjennomføre de tre labøvelsene - ikke alle har rekkefølge 1, 2, 3.

### **Print ut selv!**

Print ut oppgaven selv før du kommer på labben.

### **PRELAB-oppgavene**

PRELAB-oppgavene for gjeldende øvelse, som er innbakt i øvelsesteksten, **skal løses før oppmøte på laboratorietimene**:

- studentene skal møte opp med papir-versjon av sine svar;
  - en veileder sjekker at alle som er tilstede har en prelab-besvarelse å vise til;
  - uten prelab-besvarelse blir studenten bortvist (første gang dette skjer får studenten lov til å møte opp en annen dag);
  - studenter som stiller uten prelab-besvarelse mer enn én gang får ikke labøvelsene godkjent (fører til at studenten ikke kan ta eksamen);
- gruppene skal diskutere sine svar i begynnelsen av labtimene
  - en veileder skal høre hvordan det gikk og diskutere med grupper som eventuelt har spørsmål.

Det er helt i orden å samarbeide og å kontakte labveilederne om dere står fast med et spørsmål (veilederne kan finnes ved <http://fys.uio.no/personer>). Labstabben har ikke faste kontortider så det er best å sende spørsmål som e-post eller be om en avtale for å møtes. Dere kan også gjerne stikke innom labben en av dagene før dere selv skal gjøre øvelsen.

### **Målet: Godkjent labrapport på stedet**

Det praktiske hovedmålet er at alle som deltar på en laboratoriøvelse skal forlate labrommet innen normert tid med en godkjent labrapport. Ikke dra før dere har fått en liten underskrift på rapporten og har sett at veilederen har registrert for alle i gruppen at øvelsen ble godkjent.

### **Gruppearbeid**

Dere skal jobbe i små grupper på 2-3 personer (grupper på 4 eller flere studenter blir delt opp av veilederne) og skrive en fellesrapport per gruppe. Rapporten skal gjennomgås av en veileder sammen med alle i gruppen og godkjennes av en veileder. Dere skal diskutere forhåndsoppgavene (PRELAB) mellom dere og si fra til veilederen om dere er uenige eller hadde problemer med noen av disse oppgavene.

### **Labrapporten**

Labrapporten skal være godt laget, men vi forventer ikke lange, kjempepene rapporter på stedet. Målet er å skrive noe som kan gjemmes i en skuff noen uker eller måneder, og når den tas ut senere skal det gå an å lese og forstå hva rapporten handler

om. Den skal være forholdsvis selvstendig, men det er ikke nødvendig at absolutt alle detaljene i øvelsesteksten kopieres inn i rapporten (ta allikevel med korte, konsise oppsummeringer av metode, viktige formeler, og skisser som er nødvendige for å kunne forstå utstyrets bruk eller geometri). Rapporten skal inneholde NOE tekst om

- øvelsens hensikt
- utstyret som ble brukt
- metode (dvs. hvordan utstyret og formlene ble brukt)
- viktige observasjoner (f.eks. problemer, avvik fra forventninger, osv. - det er viktig å være ærlig og innrømme vanskeligheter i stedet for å prøve å dekke over. Noen ganger gjør man feil eller utstyret svikter, og dette er enklere å oppdage og eventuelt rette på om rapporten er godt skrevet.)
- konklusjon
  - f.eks. at forsøket bekreftet teorien – eller kanskje ikke!
  - f.eks. at 2 eller flere målinger av samme størrelse er i overensstemmelse - eller kanskje ikke!

Siden rapporten skrives kjapt i laboratorietimene lønner det seg å lage en plan for hva rapporten skal inneholde før dere møter opp på labtimene. Dere velger om dere skriver for hånd eller bruker et dataprogram (f.eks. LaTeX, Word) - velg formen som dere mener er mest tidseffektiv for å lage det som i praksis er et første utkast. Ikke være redd for åstryke ut og starte på nytt: innholdet og strukturen er mye, mye viktigere enn utseendet, men det skal selvfølgelig gå an for veileder å lese rapporten uten assistanse fra studentgruppen.

Ting vi ofte kommenterer (gjør det heller riktig på første forsøk!):

- Figurer skal ha aksetitler (med benevning) og en liten figurtekst (selv om figuren er diskutert i teksten).
- Størrelser i tabeller skal ha benevning og tabellen skal ha en liten tabelltekst (selv om tabellen er diskutert i teksten).
- Det skal henvises til alle figurer og tabeller fra rapportteksten.
- Hovedformelene som brukes i datatolkning skal med i rapporten.
- Oppgavenummer og -tittel, gjennomføringsdato og hvem som er i arbeidsgruppen skal stå på første side.

### Labarbeidsrutiner - sikkerhet

Det er ikke tillatt å spise eller drikke på labben. Siden vi jobber flere timer i strekk, er det lov (og lurt) å ta noen pauser underveis.

Utstyret skal brukes forsiktig:

- Bruker man helt vanlig sunn fornuft er det ikke noe farlig for mennesker på FYS1120-labben.
- Koble aldri et amperemeter direkte til en strømkilde – det **skal** være en motstand i slike kretser (f.eks. en lyspære). Amperemeteret blir ikke skadet, men det er kjedelig å bytte sikringer for ofte.
- Slå av spennings- og strømforsyninger når de ikke er i bruk. **NB! Slå dem av bare etter at spenningen og strømmen er satt ned til null.** Da unngår etterfølgende gruppe overraskelser.
- Slå av (skru ned strømmen først) elektromagneter når de ikke er i bruk, siden de kan bli litt varme om de står for lenge på.
- Hold PC'er, klokker, bankkort langt vekk fra magnetene, spesielt de sterke permanente magnetene - f.eks. harddisker kan bli momentant ødelagt av å bli magnetisert.

Hvis det skulle skje en ulykke finnes en liste med nødtelefonnummer på veggen nær telefonen, som vanlig for all virksomhet på UiO.

### Utskrifter

Skriver fys10, som skriver bare ensidig, er på labrommet (FV225). Skriver fys6 er på tredje etasje rett ovenfor inngangsdøren til FV225. De må legges til for hver bruker som logger seg inn på en av PCene på labrommet. Bruk e.g. \\print.uio.no\fys10 på Windows XP og ellers \\winprint64\fys10 på nytere versjoner av Windows.

## Hva kreves av en god labrapport?

Når vi i dette kurset legger noe vekt på utforming av labrapporten er det fordi vi ønsker å innarbeide rutiner som du vil ha nytte av også i andre kurs og i skriving av rapporter senere i studiet og i jobbsammenheng. I en journal eller rapport er det ikke bare resultatene som vi er interessert i, men like mye fremgangsmåte, presentasjon av resultater, og, ikke minst, vurderinger av disse. Vi ønsker også at rapporten skal kunne leses uten man har øvelsesteksten liggende ved siden av seg.

Vi ønsker at det i forbindelse med hver enkelt deloppgave finnes følgende:

1. En ”programerklæring” som forteller hva som er hensikten med oppgaven.
2. En **kort og konsis** beskrivelse av hvordan oppgaven er gjennomført og hvordan oppkoblinger og målinger ble gjort. Det kan også med fordel kopiere inn eller tegne figurer som viser oppkobling eller geometri.
3. Presentasjon av måledata og resultater.
4. Vurdering og diskusjon av resultatene. Sammenligning mellom måleresultater og teori og om mulig en vurdering av usikkerhet i resultatet

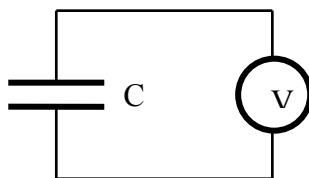
Når det gjelder presentasjon av målinger og andre resultater ønsker vi:

1. At alle figurer og tabeller er nummerert og har en tekst som forteller hva figuren/ tabellen viser eller inneholder.
2. At alle figurer og tabeller er pene og oversiktlige. Det må velges hensiktsmessig skala på aksene, og grafiske fremstillinger skal ha aksetekster, enheter, store og tydelige avmerkinger av målepunkter, gjerne med en symbolforklaring i teksten.
3. At måledata også gis i tabellform i tillegg til grafiske fremstillinger (dersom det ikke uttrykkelig er sagt i oppgaveteksten at dette ikke er nødvendig eller at datamengden er såpass stor at det gir ingen mening).
4. At det kommer klart frem hvilke formeler som er brukt i beregninger.
5. At alle tall som oppgis også har benevning (untatt selvfølgelig forholdstall).
6. At alle tall som blir brukt i beregninger kan finnes eksplisitt i journal- eller øvelsestekst.
7. At målte og beregnede tall oppgis med det antall gjeldende sifre som datagrunnlaget gir dekning for
8. At man påpeker viktige observasjoner med ord.

## FYS 1120: Labøvelse 1 – Grunnleggende elektromagnetisk måleteknikk

I denne øvelsen skal vi studere hvordan voltmetre og amperemetre påvirker kretsene de kobles til og hvordan deres egenskaper dermed kan undersøkes. Vi skal se hvordan vi mäter indre resistans til en spenningskilde (her en termogenerator basert på et Peltier-element) og hvordan vi skal unngå målefeil når vi mäter veldig små resistanser. Til slutt skal vi bruke veldig enkelt utstyr for å lage et følsomt instrument som kan mäle jordens (nokså lille) magnetfelt.

### 1. Indre resistans i et voltmeter.



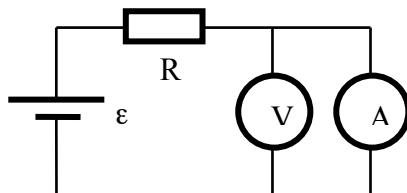
Ved potensialmålinger med et voltmeter regner vi som regel at den indre resistansen i voltmeteret er svært høy, dvs. at det ikke går noe strøm av betydning gjennom voltmeteret. Det er likevel viktig å vite hva den faktiske verdien av voltmeterets indre resistans er for å kunne vurdere om denne tilnærmingen kan brukes eller ikke i et konkret tilfelle. Vi skal derfor se på en metode for å bestemme indre resistans.

**Oppgave 1.1:** En kondensator med kjent kapasitans  $C$  skal lades opp ved hjelp av et batteri (ikke vist på figuren). Kondensatoren utlades så gjennom et voltmeter ( $V$ ). Potensialforskjellen  $U = U_0 e^{-t/\tau}$  over kondensatoren avleses samtidig som funksjon av tid på det samme voltmeteret under utladningen (ta 2-3 målinger per minutt i 6-7 minutter). Tegn inn måleresultatet på millimeter-papir ( $\ln U$  versus  $t$ ) og bestem tidskonstanten  $\tau$  fra grafen. Bruk deretter definisjonen  $\tau = RC$  til å bestemme voltmeterets indre resistans  $R$ .

**PRELAB-Oppgave 1:** Spenningen over en oppladet kondensator med  $C=1 \mu\text{F}$  som er koblet til inngangen på et voltmeter halveres på 20 sekunder. Hva er indre resistansen til voltmeteret?

**Oppgave 1.2:** Lag dere merke til hvor fort kondensatoren ble ladet opp? Hvorfor går det så mye fortare enn utladningen gjennom voltmeteret?

### 2. Indre resistans i et amperemeter



Tilsvarande regner man ofte den indre resistansen i et

amperemeter som ubetydelig, slik at man ikke trenger å ta hensyn til noe spenningsfall over amperemeteret når man mäter strømmen i en krets. Vi skal her se på en metode for å finne den faktiske verdien av den indre resistansen i et amperemeter.

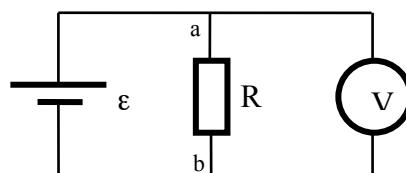
**Oppgave 2.1:** En motstand  $R$  kobles i serie med amperemetret og strømmen  $I$  gjennom amperemeteret og potensialforskjellen  $U$  over amperemeteret, måles og legges i en tabell. Velg følgende verdier for  $R$ :

$R [\Omega]$	500	700	1000	1200	1500

**PRELAB-Oppgave 2:** Lag et MATLAB-skript basert på MATLAB-metodene polyfit og polyval som tilpasser en linje til et sett med datapunkter  $x,y$  og viser punktene og den tilpassede linjen på en figur. Dette skriptet kan også brukes i labøvelse 3 (Hall-effekt).

**Oppgave 2.2:** Lag en figur som viser måleresultatene ( $I$  langs  $x$ -aksen og  $U$  langs  $y$ -aksen). Punktene bør, i følge teorien, ligge på en rett linje gjennom origo slik at  $U = R_i I$ . Bestem amperemeterets indre resistans  $R_i$  ut fra linjens stigningstall. NB! Den indre resistansen  $R_i$  avhenger av amperemeterets måleområdet som benyttes.

### 3. Indre resistans i et termoelement (Peltier-element)



I en krets sammensatt av to forskjellige metaller eller halvledere vil en strøm føre til oppvarming eller avkjøling av kontakten, avhengig av strømmens retning. Denne Peltier-effekten skyldes at ladningsbærerne som går gjennom kontaktflaten, passerer et potensialsprang og derfor mottar eller avgir energi. En del av temperaturendringen skyldes også oppvarming pga. resistansen. Avgitt energi finnes igjen som varme og mottatt energi vil medføre nedkjøling av omgivelsene. Hvis man istedet for strøm utsetter man et Peltier-element for en temperaturforskjell over kontakten, genereres det en elektrospenning som kan drive en krets (Seebeck-effekten). Den indre resistansen begrenser effektiviteten til Peltier-elementer som termogenerator eller kjølelement.

**Oppgave 3.1:** Utforsk Peltier-elementet ved å koble den til (1) et voltmeter og se hva små temperaturforskjeller fører til og (2) en strømkilde med maks strøm  $0.5\text{A}$  og kjenn på de to sidene.

**Oppgave 3.2:** Generatoren  $\epsilon$  (et Peltier-element plasert mellom en kobbersylinder og en metallkopp fylt

med varmt vann) kobles til en motstandsboks (R på figuren). For hvert valg av resistansen R i tabellen måles potensialforskjellen  $U_{ab}$  med et voltmeter med stor indre resistans:

$R [\Omega]$	1	1,5	2,5	4	10

Strømmen  $I_R$  gjennom motstandsboksen er gitt ved:

$$I_R = \frac{U_{ab}}{R}.$$

Strømmen I gjennom generatoren er gitt ved

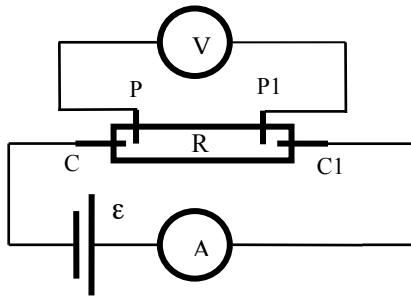
$$I = I_R + I_V,$$

der  $I_V$  er strømmen gjennom voltmeteret. Siden voltmeters indre resistans er mye større blir  $I_V \ll I_R$ , slik at vi med god tilnærming kan skrive

$$I = I_R = \frac{U_{ab}}{R}.$$

**Oppgave 3.3:** Potensialforskjellen  $U_{ab}$  fremstilles grafisk som funksjon av strømmen I på millimeterpapir. Punktene forventes da å ligge på en rett linje som kan skrives som  $U_{ab} = \epsilon - R_i I$ , der  $\epsilon$  er generatorens elektromotoriske spenning og  $R_i$  er generatorens indre resistans. Er forventningene innfridd? Bruk grafen til å bestemme  $R_i$  og  $\epsilon$ .

#### 4. Firepunktsmåling av resistans

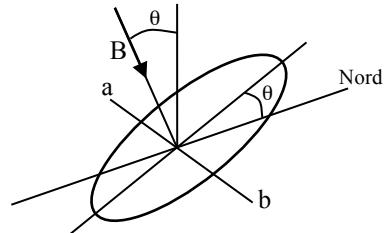


Ved måling av veldig små resistansverdier vil vi få inn kontaktresistansen ved tilkoblingen til motstanden som feilkilde. Vi kan løse dette problemet ved å måle potensial-forskjellen over motstanden i andre tilkoblingspunkter enn de vi bruker til å sende strøm gjennom motstanden. Resistansen i tilkoblingspunktene for voltmeteret betyr ikke noe siden denne resistansen er mye lavere enn den indre resistansen i voltmeteret.

**Oppgave 4:** Mål resistansen til to motstander som har lav resistans (kobber og aluminium). Bruk koblingen som er vist i figuren over. Strømmen gjennom prøven skal ikke overstige 2 A. Legg merke til at motstanden har fire kontakter: C og C1 for "current", og P og P1 for "potential". Bekreft at resistansen er uavhengig av strømmens verdi. Anslå hvor stor feil vi gjør ved eventuelt ikke å bruke firepunktsmåling, ved å gjøre en topunktsmåling og så sammenlikne resultatene.

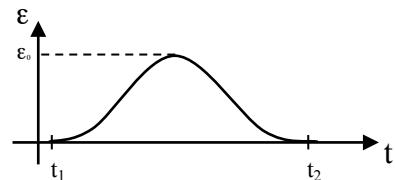
#### 5. Jordas magnetfelt

Når vi skal måle den jordmagnetiske fluksstettheten  $B$ , trenger vi et følsomt instrument. Vi skal bruke en spole med stort areal og mange vindinger og utnytte Faradays induksjonslov.



Geometrien i forsøket er vist skjematiske i figuren over. Spolen holdes slik at feltet står normalt på spoleflaten. Vinkelen  $\theta$  mellom en loddrett linje og feltet  $B$  måles med en *inklinator*.

Spolen (jordinduktoren) kobles til et mikrovoltmeter med viser. Så dreies spolen 180° om en horisontal vest-øst akse ab. (Du trenger et kompass når du skal orientere stativet med spolen). Under bevegelsen induseres en ems  $\epsilon$  i spolen. "Spenningspulsens" tidsforløp er antydet i figuren under.



Den magnetiske fluksen gjennom spolen betegnes med  $\Phi$ . Vi integrerer Faradays induksjonslov

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

og får

$$\Phi(t_2) - \Phi(t_1) = - \int_{t_1}^{t_2} \epsilon(t) dt.$$

Spolen har areal  $A$  og vindingstall  $N$ . Vi orienterer spoleflaten slik at  $\Phi(t_1) = NAB$ , slik at

$$2NAB = \int_{t_1}^{t_2} \epsilon(t) dt.$$

**PRELAB-Oppgave 3:** Finn et uttrykk for  $B$  dersom vi dreier spolen med konstant vinkelhastighet  $\omega$  og mäter den maksimale verdien  $\epsilon_0$  for  $\epsilon(t)$ . Hva er forholdet mellom  $\omega$  og  $t_2 - t_1$ ?

**Oppgave 5: Mål tiden og spenningstoppen 6-10 ganger.** Regn ut et gjennomsnitt for  $B$ .<sup>1</sup> Hvorfor kan vi ikke bruke gjennomsnitter for  $\epsilon_0$  og  $t_2 - t_1$  når vi skal finne gjennomsnittet i  $B$ ?

---

<sup>1</sup> NB! Denne fremgangsmåten kan bare gi en tilnærmet riktig verdi for fluksstettheten  $B$ . For å få en mer nøyaktig verdi må vi bruke en spennings-integrator.

## FYS 1120: Labøvelse 2 – Magnetisering

I denne øvelsen skal vi undersøke om vismut er en dia- eller paramagnetisk material. I slike materialer blir magnetiseringen  $\vec{M}$  en lineær funksjon av den magnetiske feltstyrken  $\vec{H}$ , dvs.  $\vec{M} = \chi \vec{H}$ , der proporsjonalitetskonstanten  $\chi$  er materialets magnetiske susceptibilitet. Diamagnetiske materialer har  $\chi < 0$ , paramagnetiske har  $\chi > 0$ .

Vi skal også, vha. en såkalt "Rowland-ring" studere et ferromagnetisk material. I slike materialer gjelder fremdeles  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ , men sammenhengen mellom  $\vec{M}$  og  $\vec{H}$  er ikke lineær og i tillegg er magnetiseringen ikke helt reversibel prosess, dvs. at magnetiseringen avhenger også av den magnetiske historien til materialet. Denne historieavhengigheten kalles hysteresen. At  $\vec{M}$  kan være stor i fravær av påtrykt felt ( $\vec{H} = 0$ ) skiller ferromagnetismen fra para- og diamagnetismen.

### 1. Måling av magnetisk susceptibilitet

Apparaturen er skissert i figur 1. Prøven (her vismut) som skal undersøkes er utformet som en langstrakt sylinderisk stav. Denne henges i det inhomogenefeltet mellom polene til en elektromagnet. Kraften som virker på prøven måles ved hjelp av en balansevekt.

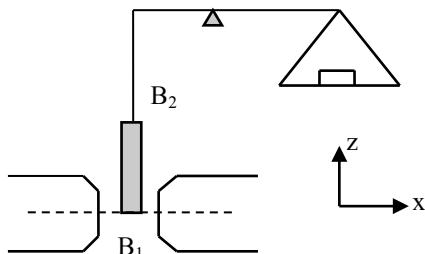


Fig.1. Apparatur for måling av magnetisk susceptibilitet

Vi orienterer koordinatsystemet som vist i figur 1. La prøven ha et tverrsnitt  $A$  og susceptibilitet  $\chi$ . Hvis vi ser bort fra luftens susceptibilitet, er den magnetiske kraften  $F_z$  som virker på prøven i  $z$ -retningen

$$F_z = -\frac{1}{2\mu_0}\chi A(B_1^2 - B_2^2).$$

For å bringe staven tilbake til høyden den hadde med  $B$ -feltet slått av, må balansevekten justeres for å gi en opphevende kraft  $\Delta mg$ . Flukstettheten (x-komponenten) ved stavens nedre ende er  $B_1$  og ved den øvre enden  $B_2$  (staven er lang nok til at  $B_2^2 \ll B_1^2$  er en veldig god approksimasjon).

**PRELAB-Oppgave 1:** Hva er forholdet mellom fortegnene på  $\chi$  og  $F_z$ , dvs. er det diamagnet eller paramagnet som vil skyves ut av  $B$ -feltet?

**Oppgave 1:** Bestem susceptibiliteten til vismut. Er vismut para- eller diamagnetisk? Begrunn svaret.

### 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

$$\int_{t_1}^{t_2} V_E dt = -\int_{t_1}^{t_2} d\Phi = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (1)$$

Endringen i fluksen fra tiden  $t_1$  til tiden  $t_2$  er altså lik tidsintegralet av den induserte spenningen i tiden fra  $t_1$  til  $t_2$ . Tidsintegralet bestemmes ved hjelp av en elektronisk spenningsintegrator. En spenningsintegrator gjør akkurat det som navnet sier – den integrerer en spenning (mht. tid), mao. den utfører venstre siden av formel (1) elektronisk.

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  $S$ , det vi faktisk leser av på integratoren. Vi har da at

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

der 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 omsluttet av den ledningen som er tilkoplet integratoren 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 skala-avles-

ningen ikke endrer seg med tiden når inngangen er kortsluttet (det må være ledende forbindelse mellom inngangskontaktene når driften justeres). For å redusere virkningen av nullpunktsdriften bør man gjøre målinger med utslag i begge retninger. Integratoren bør ikke slås av før hele eksperimentet er ferdig og den bør ikke stå for lenge uten ledende forbindelse mellom inngangskontaktene. Nullpunktsdriften bør kontrolleres fra tid til annen.

Før integratoren kan brukes til målinger må vi kalibere den ved å bestemme verdien av konstanten  $k$ . Dette gjøres ved å legge en konstant, kjent spennin  $V_0$  over inngangskontaktene og måle tiden  $t_0$  det tar å få et totalutslag  $\alpha = DS$ . Tidsintegralet er da  $V_0 t_0$  og  $k$  kan bestemmes av likningen  $kDS = V_0 t_0$ .

**NB! Kontroller at  $V_0 < 10 \text{ mV}$  (ellers går en sikring i integratoren).** Koplingsskjema er gitt i figur 2.

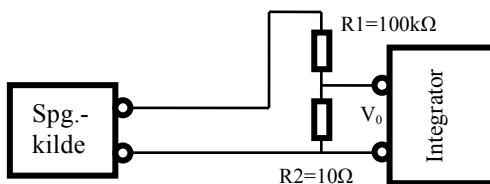


Fig.2: Koplingsskjema for kalibrering av spenningsintegrator

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

**Oppgave 2.1:** Bestem spenningsintegratoren kalibreringskonstant  $k$ .

**Oppgave 2.2:** Benytt så en liten spole til å måle fluksstettheten  $B$  mellom en permanent magnets poler (veilederne kjenner den nominelle verdien til  $B$ ). Spolen koples til spenningsintegratoren – dette sammensatte instrumentet kalles for et (magnetisk) fluksmeter. Integratoren nullstilles mens spolen holdes mellom polene. Så fjernes spolen fra magnetfeltet. Fluksstettheten beregnes ved hjelp av formelen

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

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

**PRELAB-Oppgave 2:** Vis at  $B = \frac{kDS}{NA}$  ut ifra likning (1).

### 3. Måling av magnetisk hysterese

Den irreversible, ikke-lineære sammenhengen mellom den magnetiske feltstyrken  $H$  og den magnetiske

fluksstettheten  $B$  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 feltstyrken 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.

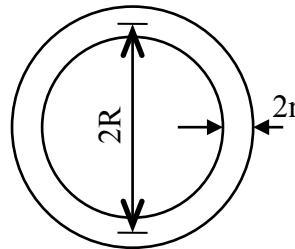


Fig. 3. Rowland-ring

Den magnetiske fluksstettheten  $B = \mu_0(H + M)$  bestemmes ved hjelp av en sekundærspole som bør ligge innenfor primærspolen. Sekundærspolen koples til en spenningsintegrator.

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

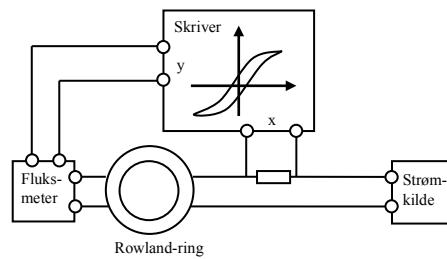


Fig.4. Apparat for registrering av hysteresekurver

Primærstrømmen passerer en liten motstand. Spenningen over motstanden styrer skriverens bevegelse i x-retningen. Den spenning som induseres 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

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

Enheterne på aksene kan bestemmes når følgende størrelser er kjent:

- Primærstrømmens maksimalverdi
- Spolenes vindingstall (N og n )

- Rowland-ringens dimensjoner ( $R$  og  $r$ )
- Fluksmeterets kalibreringskonstant  $k$  og dempningsfaktor  $D$
- Fluksmetersignalene  $S_1$  og  $S_2$  som svarer til verdiene  $+I_m$  og  $-I_m$  for primærstrømmen.

Vi får

$$H_{maks} = \frac{NI_{maks}}{2\pi R}$$

og

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

der  $n$  er sekundærspolens vindingstall og der  $A = \pi r^2$  er ringens tverrsnitt.

Opptegning av hysteresekurver foregår slik:

- Strømmen varieres jevnt fra 0 til  $I_{maks}$
- Strømmen varieres jevnt fra  $I_{maks}$  til 0
- Strømmen varieres jevnt fra 0 til  $-I_{maks}$
- Strømmen varieres jevnt fra  $-I_m$  til 0

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

**PRELAB-Oppgave 3:** Hva blir stigningstallet  $dB/dH$  der  $M$  blir konstant for høye verdier av  $H$ ? Hvis tangenten til  $B$  vs.  $H$  for høye verdier av  $H$  er linjen  $B = B_0 + \mu_0 H$ , hva er den maksimale verdien av  $M$ ?

**Oppgave 3.1:** Benytt en Rowland-ring. Lag et sett hysteresekurver med primærstrømmer 0,5, 1, 2, 3, og 4 A på et millimeterark. Lag en graf av  $M$  versus  $H$  (den "normale magnetiseringsskurven") for de 5 punktene ( $H_{maks}$ ,  $B_{maks}$ ).

**Oppgave 3.2:** Benytt hysteresekurven for 4 A og bestem den remanent induksjonen  $B_r$  for jernringen (dvs.  $B$  for  $H = 0$ ). Kunne  $B_r$  økes betydelig om vi brukte større  $H_{maks}$ ? Begrunn svaret (kvalitativt).

### Appendiks. Magnetisk kraft på en sylinderisk stav<sup>1</sup>

We start from the expression for the potential energy of a magnetic point dipole located in a magnetic field  $\vec{B}$ . The energy is given by (see chapter 27)

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}.$$

The magnetization,  $\vec{M}$ , of a material is its magnetic dipole moment per volume, so in a small volume,  $dV$ , the magnetic moment is  $d\vec{\mu} = \vec{M}dV$ . The total magnetic energy of a volume  $V$  is found by integrating over all volume elements,

---

<sup>1</sup> T. H. Johansen, høsten 2013.

$$U = - \int_V \vec{M} \cdot \vec{B} dV$$

In a uniform magnetic field the energy is constant, so in order to experience a force the  $B$ -field must vary in space. The force is given by the gradient in the potential energy,  $\vec{F} = -\vec{\nabla}U$ , and the total force on the piece of material becomes

$$\vec{F} = \int_V (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} dV.$$

In many magnetic materials, the presence of an external field is actually what causes their magnetization. When their response is linear one writes

$$\mu_0 \vec{M} = \chi \vec{B},$$

where  $\chi$  is the magnetic susceptibility of the material. The force can then be written

$$\vec{F} = \frac{\chi}{\mu_0} \int_V (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} dV.$$

Considering the particular configuration in Part 1 of the exercise, the balance will measure the z-component of the force, i.e.

$$F_z = \frac{\chi}{\mu_0} \int_V (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) B_z dV, \quad (2)$$

where  $B_z$  is the vertical component of the applied field. Writing out the integrand, one gets

$$(\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) B_z = \left( B_x \frac{\partial}{\partial x} + B_y \frac{\partial}{\partial y} + B_z \frac{\partial}{\partial z} \right) B_z.$$

In the experimental configuration at hand the applied field at the location of the magnetized thin rod is oriented in the x-direction (provided it is placed in the centre of the pole gap). In that case (setting  $B_y = B_z = 0$ ) one has

$$(\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) B_z = B_z \frac{\partial}{\partial x} B_z = B_x \frac{\partial}{\partial z} B_x,$$

where the last step made use of  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$  (since there are no free currents). When inserted in Eq. (2), this gives

$$F_z = \frac{\chi}{\mu_0} \int_V B_x \frac{\partial}{\partial z} B_x dV = \frac{\chi}{2\mu_0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial B_x^2}{\partial z} A dz,$$

where  $A$  is the cross-sectional area of the rod. The integration limits correspond to the endpoints of the rod, where the field is horizontal and has values  $B_1$  and  $B_2$ . The final result then becomes

$$F_z = -\frac{\chi}{2\mu_0} A (B_1^2 - B_2^2).$$

The sign of the susceptibility determines the direction of the vertical force (note that if  $z_1 < z_2$  and  $B_1 > B_2$ , a positive force acts upward).

# FYS 1120: Labøvelse 3 – Hall-effekt

Hall-effekten ble oppdaget av amerikaneren Hall i 1879. Den viser seg ved at det i en strømleder i et magnetfelt oppstår en spenning (potensialforskjell) i lederen normalt på strømretningen og normalt på magnetfeltet. Den kan observeres i alle typer ledere. Vi vil undersøke og måle Hall-effekten i en halvleder i form av en tynn plate. Vi vil bekrefte at Hall-effekten altså kan benyttes til å lage et instrument for måling av magnetisk fluksstetthet  $B$ . Etterpå undersøker vi  $B$ -feltet utenfor en sylinderisk permanent magnet vha. en Hall-sonde.

## 1. Måling av Hall-effekten

Fig.1 viser en halvlederkrystall med bredde  $b$ , lengde  $L$  og tykkelse  $d$  i retning vinkelrett på papirets plan. En strøm  $I$  sendes gjennom den som vist på figuren. Halvlederen plasseres i et magnetfelt slik at fluksstettheten  $B$  står vinkelrett på papirets plan.

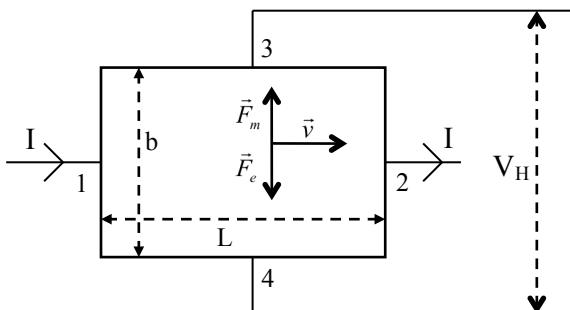


Fig. 1. Halvlederkrystall med parametere for beregning av Hall-spenningen.

La oss anta at strømmen  $I$  forårsakes av ladningsbærere med ladning  $q$  og gjennomsnittlig drifthastighet  $\vec{v}$ . En ladningsbærer vil da være påvirket av den magnetiske delen av Lorentzkraften  $\vec{F}_m$  på tvers av strømretningen

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Antar vi at denne kraften er rettet oppover som vist på figuren, vil ladningsbærerne derfor koncentreres mot øvre kant av halvlederen.

Denne ladningskonsentrasjonen er årsak til et elektrisk felt  $\vec{E}_H$  (Hall-feltet), slik at ladningen  $q$  blir påvirket av den elektriske delen av Lorentzkraften  $\vec{F}_e = q\vec{E}_H$  som vist på figuren. Ved likevekt vil den totale Lorentzkraften være null, dvs.  $\vec{F}_e + \vec{F}_m = 0$  eller

$$\vec{E}_H = -\vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Hall-feltet  $\vec{E}_H$  bestemmer man ved å måle den tilsvarende Hall-spenningen  $V_H$  som vist på Fig. 1. La oss anta at det bare er én type ladningsbærere med konsentrasjon  $N$  i krysstellen. Vi antar som på figuren at  $\vec{v}$  står vinkelrett på  $\vec{B}$  og ser bort fra fortegn. Da er  $|\vec{v} \times \vec{B}|$  i likn. (1) lik  $vB$ . Videre er

strømmen  $I$  proporsjonal med tverrsnittet  $bd$ , med konsentrasjonen  $N$ , med ladningen  $q$  og med hastigheten  $v$ :

$$I = bdNqv.$$

Dette gir for Hall-spenningen:

$$V_H = bE_H = bvB = \frac{IB}{Nqd}. \quad (2)$$

En ser således at Hall-spenningen er proporsjonal med fluksstettheten  $B$ . Bekrefter vi dette eksperimentelt kan altså Hall-effekten benyttes til å lage et instrument for måling av magnetisk fluksstetthet.

En størrelse som ofte benyttes er Hall-koeffisienten  $R_H$ . Med betegnelser som ovenfor er definisjonen  $R_H = \frac{V_H d}{IB}$ .

Av likn. (2) får vi derfor

$$R_H = \frac{1}{Nq}. \quad (3)$$

Dette betyr at for en ekstrinsisk leder med bare én type ladningsbærere kan en beregne konsentrasjon  $N$  når  $R_H$  er kjent.

**PRELAB-Oppgave 1:** Lag et MATLAB-skript basert på MATLAB metodene polyfit og polyval som tilpasser en linje til et sett med datapunkter  $x,y$  og viser punktene og den tilpassede linjen på en figur. Dette skriptet kan også brukes i labøvelse 1 (Grunnleggende elmag. måleteknikk).

**Oppgave 1.1 - Hall-effekt på p-Ge:** Bestem retningen til  $\vec{B}$  og retningen til strømmen gjennom prøven. Lag en skisse som viser Hall-spenningens polaritet. Mål  $V_H$  som funksjon av  $B$  ved konstant  $I$  (Veilederen stiller potmeteret slik at  $V_H = 0$  når  $B = 0$ ). Potmeterets innstilling er avhengig av  $I$ . NB!  $I_{\text{maks}} = 30 \text{ mA!}$

**Oppgave 1.2:** Beregn  $R_H$  (vha. stigningstallet for  $V_H$  vs.  $B$ ) og  $N$ . Mål spenningsfallet over Ge-prøven i strømretningen. Sammenlign ladningsbærernes gjennomsnittlige drifthastighet  $v$  med hastigheten til et elektron som starter i ro i et vakuum der elektronet er utsatt over den fulle prøvelengden  $L$  for det elektriske feltet som den eksterne spenningskilden setter opp i Ge-prøven.

**Oppgave 1.3 og 1.4 - Hall-effekt på n-Ge:** Oppgave 1.1 og 1.2 da capo!

**Oppgave 1.5:** Sammenlign resultatene for p-Ge og n-Ge. Hva slags ladningsbærere finnes det i disse to materialene?

## 2. Måling av magnetisering i en permanent magnet med Hall-sonde

Ta utgangspunkt i lærebokas<sup>1</sup> lign. (28.15), som gir formelen for magnetfeltet langs symmetriaksen for en sirkulær strømsløyfe med radius  $a$ ,

$$B_x(x) = \frac{\mu_0}{2} I \frac{a^2}{(x^2+a^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

der  $x$  representerer avstanden langs symmetriaksen. Dessuten, i kapittel 27, er magnetisk dipolmoment for en plan strømsløyfe med areal  $A$  definert som  $\mu = IA$ .

Når et materiale er permanent magnetisert er det fordi atomære strømsløyfer i materialet naturlig velger å forblí opplinjert i samme retning (ferromagnetisme). En slik situasjon er skissert i figur 2. Materialt sies å være magnetisert i retningen normalt på strømplanet.

I en sylinderisk magnet (se figurene 2 og 3) som er uniformt magnetisert med feltet rettet langs sylinderaksen, vil det derfor sirkulere en strøm på den krumme overflaten. Merk at berøring er ufarlig fordi strømmen ikke består av fritt bevegelige ladningsbærere. Denne overflatestrømmen har samme tetthet overalt, angitt som  $j = dI/dx$ , og representerer magnetiseringen av permanent-magneten.

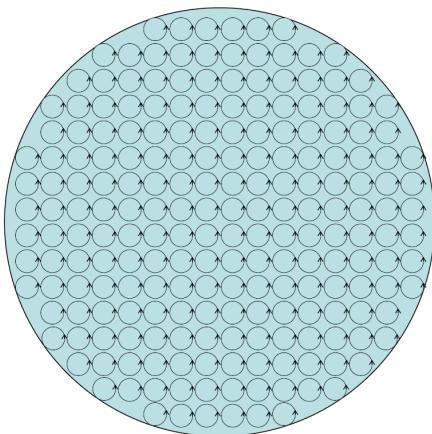


Fig. 2. Atomære strømmer i et uniformt magnetisert materiale. På makroskopisk skala er nettoresultat av alle strømsløyfene en strøm som sirkulerer rundt ytterkanten, mens i det indre kanselleres strømmene.

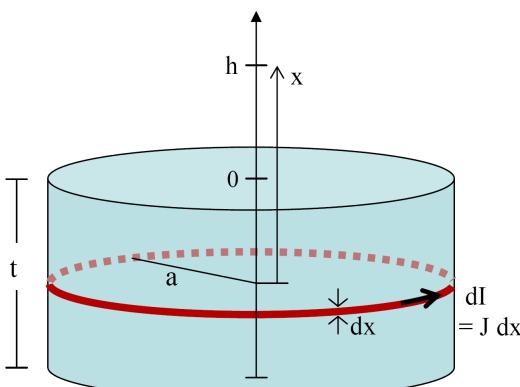


Fig. 3. Skisse av en sylinderisk permanent magnet med overflatestrømtetthet  $j$ .

**PRELAB-Oppgave 2.1:** Vis at  $\mathbf{j}$  er identisk med magnetiseringen,  $\mathbf{M}$ , definert som magnetisk moment per volumenhett.

Vi skal bestemme magnetiseringen i en sylinderisk permanent-magnet ved å måle feltet langs symmetriaksen. Vi trenger derfor å utlede en formel for magnetfeltet langs aksen som funksjon av avstanden  $h$  fra overflaten.

**PRELAB-Oppgave 2.2:** Vis ved å integrere opp overflatestrømmen, som illustrert i figur 3, at magnetfeltet kan skrives

$$B_x(h) = \frac{\mu_0}{2} j \left[ \frac{h+t}{\sqrt{(h+t)^2+a^2}} - \frac{h}{\sqrt{h^2+a^2}} \right]. \quad (5)$$

**PRELAB-Oppgave 2.3:** Lag et MATLAB-skript som viser  $B_x(h)$  i likning 5 sammenlignet med 5-6 datapunkter (som du finner opp selv for å teste koden). Bruk  $t=35\text{ mm}$  og  $a=20\text{ mm}$  når du tester koden din.

**PRELAB-Oppgave 2.4:** I følge formel 5, hva er B-feltet midt på topp (bunn)-flaten av magneten? Hva er svaret i grensen  $t \rightarrow \infty$ ? Hva er da B-feltet midt i sylinderen?

**Oppgave 2.1:** Mål  $a$ ,  $t$  og  $B_x(h)$  i et utvalg avstander fra overflaten (dvs. 5-10 punkter med  $h = 0 - 10\text{ cm}$ ). Bruk MATLAB-skriptet du utviklet i prelab-oppgaven for å lage en graf som viser datapunktene og sammenligning med den utelede formelen (5).

**Oppgave 2.2:** Hva blir verdien for  $\mu_0 j$ ? Dette er en størrelse som kalles remanent induksjon ( $B_r$ ), og er den sentrale parameteren som karakteriserer permanent-magneter. F.eks. magneter laget av NdFeB har remanent induksjon på ca. 1.2 T. Vi mäter  $B_r$  for en ringformet jernprøve i del 3 av Øvelse 2 (med en annen metode som utnytter Faradays induksjonslov).

## 3. Måle B-feltet fra en sylinderisk elektromagnet med Hall-sonde

Formelen (5) ble utledet ved å integrere opp B-feltet fra en sylinderisk overflatestrøm. Med en elektromagnet med luft innenfor spolene er det mulig å male B-feltet både utenfor og innenfor sylinderen.

**Oppgave 3:** Mål  $B_x(h)$  for den sylinderiske elektromagneten som er satt opp i et utvalg avstander fra overflaten (dvs. 5-10 punkter med  $h = 0 - 10\text{ cm}$ ) og et punkt midt i sylinderen, for  $I = 5\text{ A}$ . Lag en graf som viser datapunktene, og sammenlikn med den utelede formelen (5). Hvilket enkelt uttrykk for  $\mathbf{j}$  for elektromagneten brukte du (en funksjon av  $N$ ,  $I$ ,  $t$ )?

<sup>1</sup> H.D. Young and R.A. Freedman: University Physics, Pearson, volume 2.