



FY1303 Elektrisitet og magnetisme II, høst 2007

Laboratorieøvelse 2

Magnetisk hysteresese

Hensikt

Hensikten med oppgaver å gjøre seg kjent med opphavet til magnetiske felter og målinger av slike. Det innebærer måling av magnetfelt fra enkle strømførende systemer og sammenlikning av målingene med teoretisk forventede resultater. En vil videre bli kjent med magnetisering av materialer (ferromagnetisme) og litt av fysikken bak dette. Magnetfeltet i en transformator av bløtt jern vil bli målt i en elektrisk kobling på sekundærsiden, når primærsiden utsettes for vekselstrøm. Fra disse målingene bestemmes hysteresese kurven for jernet. Magnetfeltet i et polgap i jernet vil også bli målt og sammenliknet med forventede verdier.

Foroppgave

1. Beregn magnetfeltet fra en strømførende spole med kjent vindingstall.
2. Mål magnetfeltet fra denne spolen og kontroller om dette stemmer overens med teoretisk verdi. Bruk en Pasco datalogger med føler for magnetfelt og strøm. Bruk vekselstrøm med frekvens omtrent 1 Hz. (Strømstyrken må være mindre enn 1 Ampere og strømsensoren må være koblet på A inngangen. Bruk følsomhet x1 på magnetfeltmåleren, bruk enheten Tesla og tarer den først. Kontroller også i hvilken retning den måler og at innstillingen er i overensstemmelse med magnetfeltet du skal måle).
3. Sett inn et stykke bløtt jern halvveis inn i spolen og mål strømmen og magnetfelt på nytt. Forklar forskjellen.

Oppgave

1. Bestem hysteresesekurven for bløtt jern ved bruk av vekselstrøm.

Metode A - bestemmelse av B-feltet ved induksjon

Gjør dette ved å måle strømmen på primærsiden, som gir B_0 -feltet, og indusert spenning på sekundærsiden, som bestemmes av B -feltet.

Bruk Pasco data-loggesystemet, og finn B_0 - og B felt fra målte spenninger og bruk av *Calculator* i Pasco programpakken. Gjør dette for jernringen, jernringen utvidet med to jernstykker (også bløte) og tilslutt når det ene av disse er erstattet med et plastikk stykke (med samme magnetiske egenskaper som luft).

Diskuter den framkomne hysteresesekurven (bruk ca 7 Hz).

Lag først oppkoblingen av primær- og sekundærkretsene som er vist i figuren og la studentassistenten kontrollere oppkoblingen.

Metode B- direkte bruk av induksjonsloven

Bruk samme krets som over, mål strøm som under metode A og magnetfeltet (B) ved integrasjon av induert spenning på sekundærsiden.. Framstill magnetfeltet (B) mot B_0 ved bruk av vekselstrøm og to forskjellige frekvenser, 1 og 7 Hz. Sammenlikne denne hysteresekurven med tilsvarende ved bruk av *metode A*.

Innledning

Magnetfelter skyldes elektriske strømmer. En makroskopisk sirkulær strømsløyfe gir opphav til magnetfelter, som lar seg beregne ut fra Biot-Savarts lov. Dersom en setter sammen flere strømsløyfer, fås en spole, og strømmen fra alle sløyfene vil sette opp et magnetfelt i omgivelsene rundt de strømførende ledningene.

Elektroner i baner rundt atomkjernene er også mikroskopiske strømsløyfer som vil sette opp magnetfelter rundt seg. Ofte slukker denne magnetismen seg ut, enten fordi to elektroner går i samme bane og i motsatt retning, eller fordi naboatomer er tilfeldig orientert slik at magnetismen fra hver mikroskopisk strømsløyfe utslukker hverandre. Et ytre magnetfelt fra en makroskopisk strømsløyfe kan få de mikroskopiske strømsløyferne til å endre orientering, slik at magnetfeltene fra dem adderes til det ytre feltet (magnetisering).

Alle de tre ytterste elektronene i jern går i samme retning (parallelle spinn). Det gjør at jern, når alle jernatomene ligger parallelt, skulle gi spesielt sterke magnetfelter. At enkeltatomene omgir seg med sterke magnetfelter gjør at atomene slår seg sammen i små områder (domener) hvor de ligger parallelt ordnet og feltet fra dette området blir sterkt. Det slukkes ut fra nabodomener, fordi domenene er tilfeldig orientert i forhold til hverandre. Domenene lar seg ordne av ytre felter, men det er litt merkelig at endelig magnetisering av materialet er avhengig av fasongen på jernstykket (f.eks. stav- og hesteskomagnet). Dette forklares av Maxwell II lov, som sier at divergensen til B -feltet er null.

Teori

Magnetfeltet på et sted i et materiale (B) setter seg sammen av to deler: en som skyldes elektriske strømmer utenfra (B_0), og en som skyldes at materien blir magnetisert (B_m) av de ytre strømmene (B_m):

$$B = B_0 + B_m$$

Eksperimenter viser at for de fleste magnetiske stoffer er B_m proporsjonal med det ytre feltet B_0 .

$$B_m = \chi \cdot B_0$$

χ , proporsjonalitetskonstanten, kalles den magnetiske suceptibiliteten (mottakeligheten) til vedkommende stoff. For ferromagnetiske materialer er χ en funksjon av B_0 (en sigmoid kurve). Små felter klarer ikke å magnetisere jernet, og dessuten, ved store felter B_0 blir ikke materien ytterligere magnetisert ved økninger i B_0 . Dette uttrykkes slik:

$$\chi = \chi(B_0)$$

Herav følger:

$$B = B_0 + \chi(B_0) \cdot B_0 = (1 + \chi(B_0)) \cdot B_0 = \mu_r \cdot B_0, \quad \text{der; } \mu_r = 1 + \chi(B_0)$$

kalles den relative permeabiliteten til stoffet. I ferromagnetiske stoffer er den relative permeabiliteten stor (størrelsesorden 1000), og som kurven nedenfor viser, er det en ikke-lineær sammenheng mellom B og B_0 .

Bruk av vekselstrøm

I mange anvendelser, slike som i motorer og transformatorer, blir jernet utsatt for B-felter som veksler mellom å være positive og negative (ved bruk av vekselstrøm). En kan tenke seg at det tar litt tid for materialet å ordne alle sine magnetiske mikrokrystallitter slik at B_m får den endelige verdien som hører sammen med en bestemt B_0 . Dette gjør at, ved bruk av vekselstrøm, en får den såkalte hysteresekurven (se nedenfor).

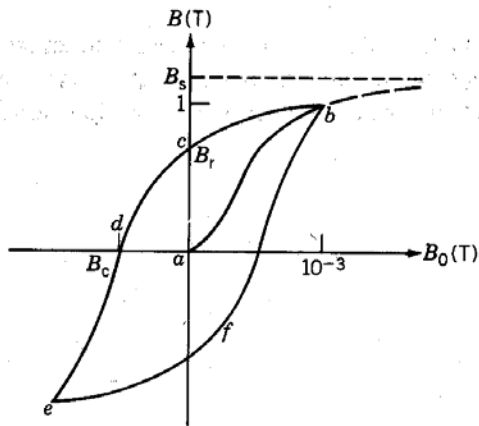


Fig.1. B-felt som funksjon av B_0 -felt i jern

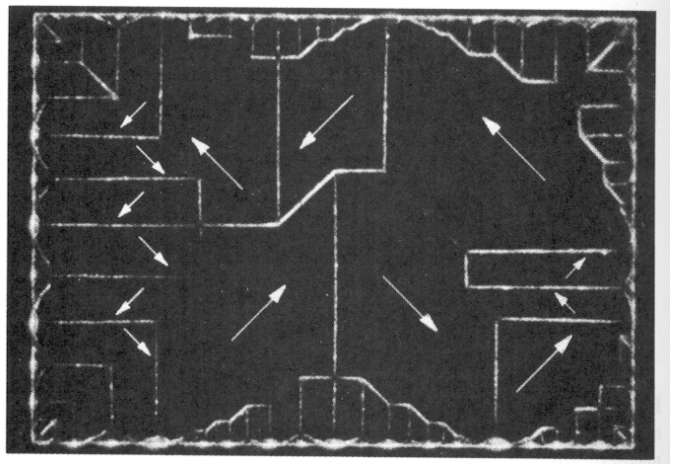


Fig.2. Magnetiske domener i ferromagnetisk materiale

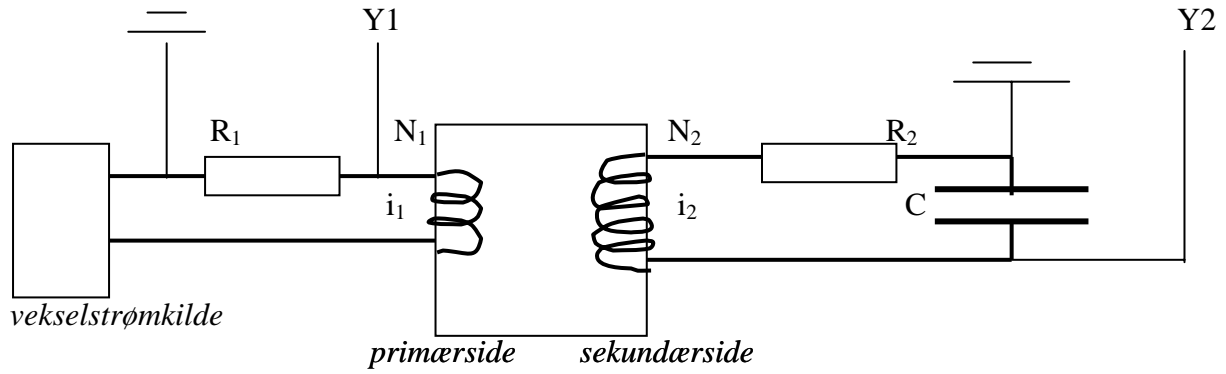
Apparaturoppstillingen er vist i figurskissen under. En vekselstrømskilde leverer strøm til primærsiden av en transformator. Over en Ohmsk motstand er strøm og spenning alltid proporsjonale, så ved å måle spenningen V_1 over motstanden R_1 finner en strømmen på primærsiden som:

$$i_1(t) = \frac{V_1(t)}{R_1}$$

Ohms lov

Mål R_1 med et universalinstrument.

På sekundærsiden av transformatoren er det en RC krets, og regning vil vise at under visse eksperimentelle forutsetninger, er spenningen over kapasitansen et mål for magnetfeltet i jernkjernen.

Krets for måling av H og B felt i magnetisk materiale

Følgende konstanter og størrelser for apparaturen er oppgitt:

Antall primærviklinger:	$N_1 = 400$
Antall sekundærviklinger:	$N_2 = 400$
Tverrsnittsareal av jernkjernen:	$A = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Midlere vei i jernet:	$l = (2 \cdot 0.064 + 2 \cdot 0.082) \text{ m} = 0.292 \text{ m}$
Motstand på sek. side:	$R_2 = 8.2 \cdot 10^4 \Omega$
Kapasitans på sek. side:	$C = 4.7 \mu\text{F}$
Motstand på prim. side:	$R_1 = 1.4 \Omega \ll R_2$ (måles med AVO meter)

Relasjoner mellom størrelser

Primærsiden: I følge Ampères lov; $\oint B_0 \cdot dl = \mu_0 \cdot I$,

er sammenhengen mellom strømstyrke i primær- og sekundærkretsen, i_1 og i_2 , og magnetfeltet uten jernkjerne (B_0) gitt ved:

$$B_0 \cdot l = \mu_0 \cdot (N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2),$$

som omskrevet gir:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2}{l} \approx \mu_0 \frac{N_1 \cdot i_1}{l},$$

siden $i_2 \ll i_1$ i vår oppstilling (se senere, motstanden på sekundærsiden er mye større). l er lengden av integrasjonsveien for B_0 feltet, som regnes like stort rundt på integrasjonsveien. Den magnetiske permeabilitet er;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Henry} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{magnetiske permeabilitet}$$

I ett av våre oppsett (*metode A*) blir strømmen i_1 målt som spenningsfallet (V_1) over en motstand dividert med motstanden (R_1), slik at:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N_1 \cdot i_1}{l} = \mu_0 \frac{N_1 \cdot V_1}{l \cdot R_1}$$

Denne likningen sier at når $V_1(t)$, spenningen over R_1 på primærsiden er kjent, kan B_0 -feltet finnes ved å multiplisere V_1 (som blir målt ved datalogging) med konstanten:

$$\mu_0 \frac{N_1}{l \cdot R_1} \quad (\text{faktor } P)$$

Alle størrelsene som inngår er bestemt av kretsen. Beregn denne faktoren i f.eks. Excel, se eksempelet i Appendix.

Sekundærsiden: Den induerte elektromotoriske spenningen på sekundærsiden er:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{induksjonsloven}$$

der den magnetiske fluksen er: $\Phi = B \cdot A$. A er tverrsnittsarealet av jernet. Vi vil vise at det er en nær sammenheng mellom spenningen over kondensatoren på sekundærsiden (V_C) og B -feltet:

For sekundærsiden gir Kirchhoffs 2 lov:

$$\varepsilon_2 = R_2 \cdot I_2 + \frac{Q}{C} \quad (\text{summen av spenningsfall er lik null}) \quad \text{Kirchhoffs 2. lov}$$

For en passelig frekvens på vekselspenningen vil den kapasitive motstanden være mye mindre enn den Ohmske motstanden:

$$\frac{1}{\omega \cdot C} \ll R_2, \quad (\text{se oppgaven om vekselstrøm})$$

slik at det siste leddet kan negligeres (sjekk dette når det brukes en frekvens på ca 10 Hz;

$$\frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{6.28 \cdot 10 \cdot 4.7 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{1}{300 \cdot 10^{-6}} \approx 3 \cdot 10^3, \quad \text{og } R_2 = 10^5).$$

På en annen side, når ω økes, minker dette strømmen på primærsiden).

Dermed blir:

$$i_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2}$$

Spenningsfallet over kondensatoren blir dermed:

$$V_C = \frac{Q}{C} = \frac{\int i_2 \cdot dt}{C} = \frac{\int \varepsilon_2 \cdot dt}{R_2 \cdot C} = \frac{-N_2}{R_2 \cdot C} \cdot \int d\Phi = \frac{-N_2}{R_2 \cdot C} \cdot \Phi = -\frac{N_2 \cdot A}{R_2 \cdot C} \cdot B$$

Spenningen over kondensatoren (V_C) og B blir proporsjonale størrelser. Proporsjonalitetsfaktoren

$$\frac{R_2 \cdot C}{N_2 \cdot A} \quad (\text{faktor } S)$$

kan finnes ved innsetting av oppgitte størrelser fra kretsen (Bruk f.eks Excel, se Appendix). Når den målte spenningen, som også blir logget, multipliseres med denne faktoren, fås B -feltet. Gjør dette ved bruk av *Calculator* i Pasco programmet. Gjør en grafisk framstilling B som funksjon av B_0 og kommenter resultatet. Dette vil gi hysteresekurven, eller den relative permeabiliteten til materialet.

Bruk av Induksjonsloven, metode B

Ifølge induksjonsloven har vi for spenningen på sekundærsiden: $\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$,

som videre gir: $d\Phi = -\frac{1}{N_2} \cdot \varepsilon_2 \cdot dt$, som integrert gir: $B \cdot A = \Phi = \frac{1}{N_2} \int_0^t \varepsilon_2 \cdot dt$,

som gir tilslutt gir følgende uttrykk for B -feltet:

$$B = \Phi = \frac{1}{N_2 \cdot A} \int_0^t \varepsilon_2 \cdot dt$$

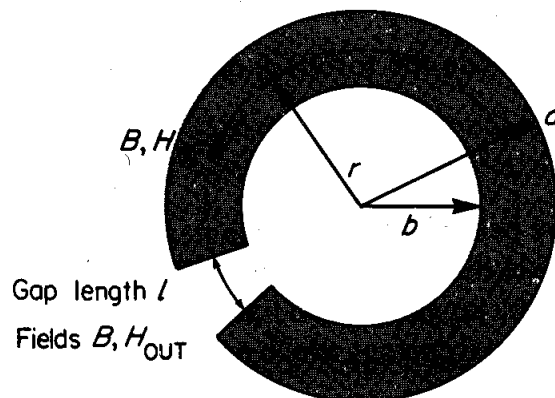
Spenningen over spolen på sekundærsiden måles direkte med en spenningsensor, som har høy indre motstand. Dermed blir strømmen i sekundærspolen liten, og det er bare primærsiden som bidrar med magnetiseringsstrøm, som ved bruk av metode A.

Start loggingen av signalene ved bruk av betingelsen om spenningen på primærsiden overskride 0 Volt, dette gjøres fordi bruken av integrasjon vil medføre en ellers ubestemt integrasjonskonstant.

Magnetfeltet i gapet av en jernring

Vi vil regne ut magnetfeltet som oppstår i gapet av en jernring. Vi betrakter dette tilfellet som likt med vår rektangulære jernsløyfe med luftgap. Nedenfor er vist en jernring med radius r og luftgap med lengde l . Rundt jernringen er det viklet en strømførende leder. De strømførende viklingene (strømstyrke I , antall N) rundt jernringen magnetiserer jernet.

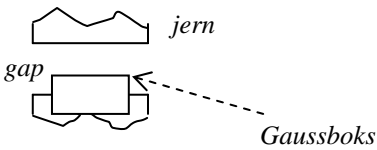
B_0 -feltet inne i jernet (B_0^{jern}) og i luftgapet (B_0^{gap}) er:



$$B_0^{jern} = \frac{B}{\mu_r}, \quad \text{og:} \quad B_0^{gap} = B$$

Disse uttrykkene kommer den tidligere innførte relasjonen: $B = \mu_r \cdot B_0$

Videre er B feltet i luftgapet er tilnærmet lik B feltet i jernet. Dette følger fra Maxwells II lov, som sier at fluksen gjennom en lukket flate er null;

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0.$$


I vårt tilfelle legger vi inn en lukket sylinder med akse parallelt med periferien til ringen og endeflater litt inne i jernet og i luftgapet litt utenfor jernet. Dermed må B feltet inne jernet være like stort som rett utenfor i luftgapet.

Når en påny bruker Amperes lov for en sirkulær sløyfe med radius r (som følger midten av ringen);

$$\oint \mathbf{B}_0 \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot N \cdot I \quad \text{Amperes lov}$$

får en:
$$\frac{B}{\mu_r} \cdot (2\pi \cdot r - l) + B \cdot l = \mu_0 \cdot N \cdot I, \quad \text{som gir:} \quad B = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{2\pi \cdot r - l + l \cdot \mu_r},$$

En ser at B feltet i gapet avhenger av lengden av gapet (l), den relative permeabiliteten (μ_r) til materialet og lengden av ringen (r).

En ser fra likningen over at når $l = 0$ (ikke noe luftgap), blir:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 N I}{2\pi r}$$

som stemmer overens med tidligere uttrykk for B ;
$$B = \mu_r B_0 = \mu_r \cdot \mu_0 \frac{N I}{L}$$

Forholdet mellom B- feltet med luftgap (B_{gap}) og uten luftgap (B_{lukket}) blir, med tallene brukt i eksempelet under:

$$\frac{B(\text{gap})}{B(\text{lukket})} = \frac{2\pi r}{2\pi \cdot r - l + \mu_r \cdot l} = \frac{1}{1 + \frac{(\mu_r - 1) \cdot l}{2\pi r}} \approx \frac{1}{1 + \frac{100 \cdot 1\text{cm}}{30\text{cm}}} \approx \frac{1}{4}$$

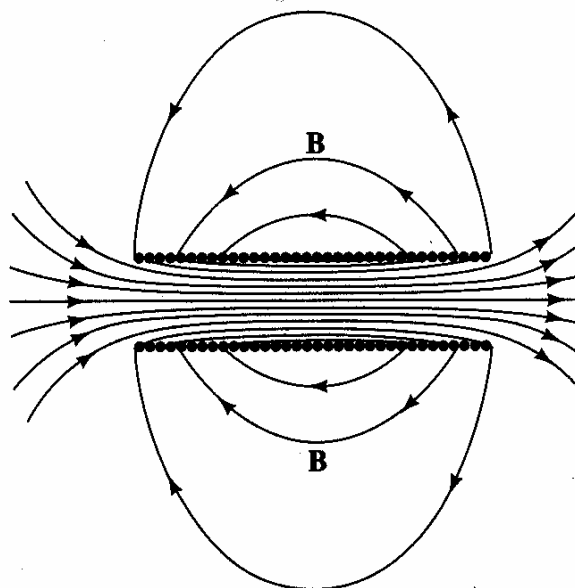
Magnetfeltet i gapet vil bli kraftig redusert med et forholdsvis lite polgap.

Foroppgave**Magnetfeltet i en spole**

I figuren nedenfor er vist en strømførende spole med tilhørende magnetfelt. Som kjent fra teorien er magnetfeltet inne i spolen:

$$B_0 = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L}, \quad (\text{magnetfeltet inne i en solenoide})$$

der N er antallet vindinger og L lengden av spolen.



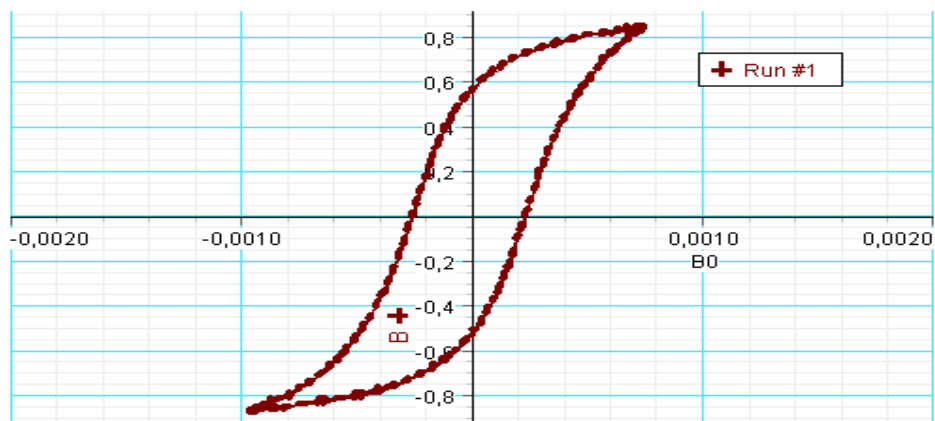
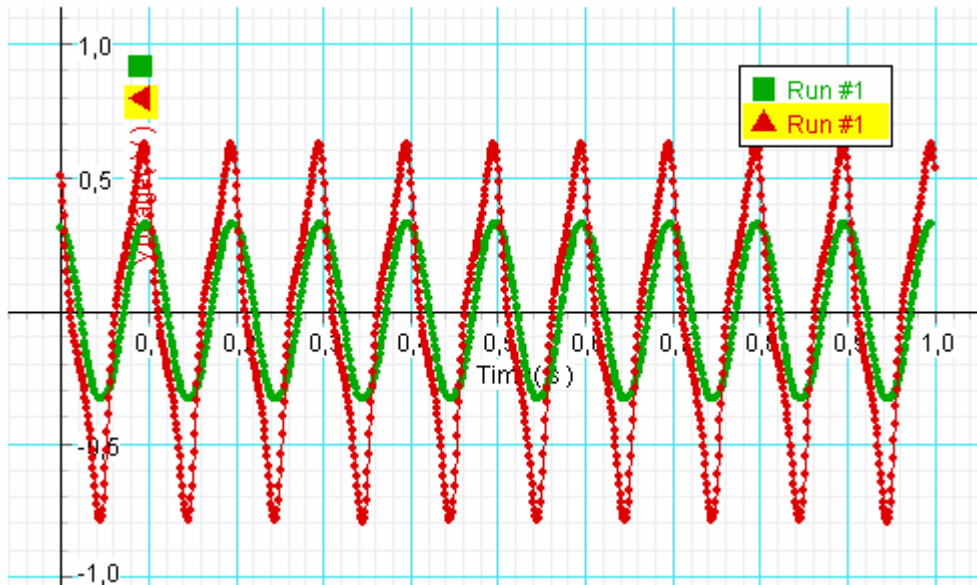
En strømførende spole med magnetfeltlinjer

Mål B feltet inne i spolen og strømmen gjennom spolen med Pasco følere. Kontroller at måling og forventet resultat er i overensstemmelse (bruk strømstyrker på mindre enn 1 Ampere). Kommenter resultatet. Nullstill føleren først utenfor magnetfeltet og pass på at magnetfeltet er vinkelrett på Hallelementet. Ikke regn med at Magnetfeltnåleren er helt kalibrert. Faktisk kan du bruke sammenlikningen til en kalibrering.

Eksempel på Excelregneark for beregning av faktorer

N1	400		
l	0,292		
R1	1,4		
my0	1,25664E-06		
FaktorP	0,001229586	FaktorP2	0,00172142
N2	400		
Areal	0,00036		
R2	80000		
C	0,0000047		
FaktorS	2,611111111		

Loggede signaler fra primær og sekundærsiden,
det mest avrundede signalet er fra sekundærsiden, det mest spisse fra primærsiden



Hysteresekurven, eller signalene fra over plottet mot hverandre.