

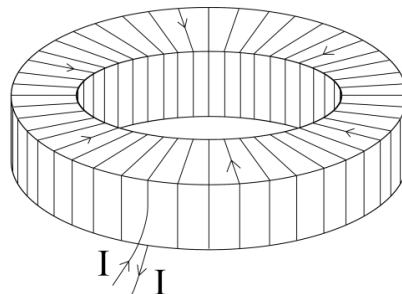
TOROIDENS MAGNETFÄLT

1 Inledning

En sluten strömslinga ger upphov till ett magnetfält kring sig. Då flera strömslingor fogas samman efter varandra, bildas en solenoid.. Genom att böja solenoiden så att den formar en ring som i figur 1 bildas en toroid. Enligt Ampères lag

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S \quad (1)$$

är banintegralen av den magnetiska flödestätheten över en sluten bana (där $d\vec{l}$ är en infinitesimalt liten del av banan) lika stor som strömmen I_S genom den yta som kurvan innesluter multiplicerat med permeabiliteten i vakuum μ_0 ($\mu_{luft} \approx \mu_0$).



Figur 1. Schematisk bild över en toroid. Vid praktiska tillämpningar är ledning runt toroiden oftast tätare snurrad än i exempelfiguren.

Betrakta en toroid med N stycken strömslingor i vilka strömmen I går. På grund av symmetri bildar magnetfältets fältlinjer koncentriska cirklar med toroiden som i figur 2, d.v.s. de cirkelformade fältlinjerna har samma mittpunkt som toroiden. Integrationsbanan väljs som i figuren så att den går genom samtliga av toroidens strömslingor på ett avstånd r från toroidens mittpunkt. Magnetfältet i banintegralen är då konstant. Strömmen som går genom ytan som innesluts av banan är då

$$I_S = NI, \quad (2)$$

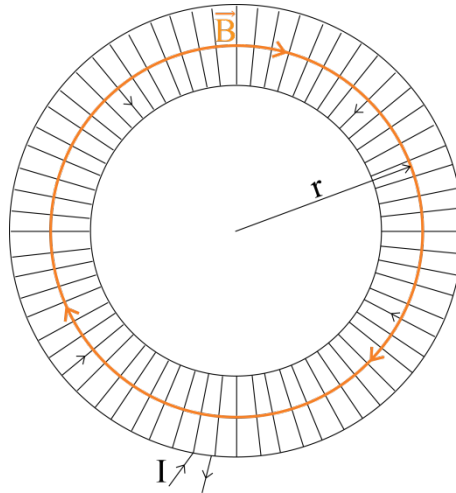
där I är strömmen i toroiden. Eftersom magnetfältet är likriktad med den valda banan fås

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B(2\pi r), \quad (3)$$

och den magnetiska flödestätheten blir då

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}. \quad (4)$$

Magnetfältet inuti toroiden är således inte homogent. Störst är fältet vid toroidens inre kant för att sedan avta mot den yttre kanten. Fältet är omvänt proportionellt mot avståndet från toroidens mittpunkt, Ifall toroidens radie är stor jämfört med strömslingornas radie är fältet inuti toroiden dock nästintill homogent.



Figur 2. Bestämning av toroidens magnetfält. Med den i figuren valda strömriktningen är magnetfältet i toroiden riktat medsols.

Genom en integrationsbana utanför toroiden med samma mittpunkt som toroiden, går N stycken strömledningar med ström i en viss riktning genom ytan innesluten av integrationsbanan, genom banan går även lika många ledningar med ström i motsatt riktning. Den totala strömmen som korsar banan blir således noll. Magnetfältet utanför en tätt lindad toroid är lika stort för varje punkt på en godtyckligt, med toroiden koncentrisk, vald bana. Ampers lag ger således

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B(2\pi r) = \mu_0 I_S = 0, \quad (5)$$

varvid $B = 0$. Genom att integrera över en bana vald innanför toroiden, fås den magnetiska flödestätheten på motsvarande sätt att bli noll innanför toroiden. För en tätt lindad toroid avviker magnetfältet alltså från noll endast innanför toroidens strömslingor.

Toroidens magnetfält mäts med hjälp av en mycket liten sondspole. Sondspolen kan flyttas i riktning med torusens radie både inuti och utanför toroiden. Genom sondspolen med arean A och varvtalet N_s går ett magnetiskt flöde

$$\Phi = AB = A \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}. \quad (6)$$

Detta föränderliga magnetiska flöde ger upphov till en inducerad spänning i sondspolen

$$e = -N_s \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{N_s A \mu_0 N}{2\pi r} 2\pi f i \cos(2\pi f t), \quad (7)$$

där f är frekvensen för spänningen i toroiden och i strömmens amplitud. Med hjälp av effektivvärdena fås för den inducerades spänningen i sondspolen:

$$V = 2\pi f N_s A \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} = 2\pi f N_s A B. \quad (8)$$

Den magnetiska flödestätheten blir således

$$B = \frac{V}{2\pi f N_s A}. \quad (9)$$

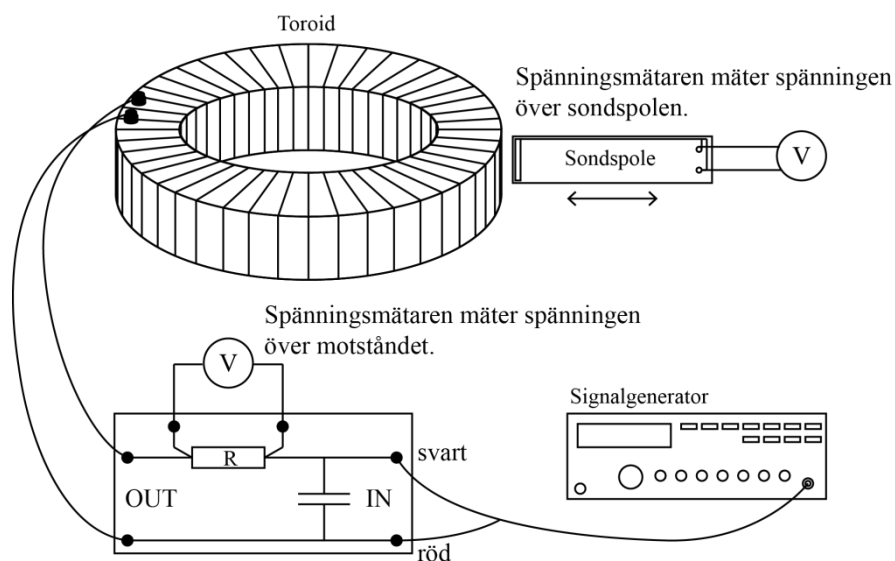
2 Målsättningar

Efter att ha utfört laboratoriearbetet

- kan studeranden beskriva formen på magnetfältet inuti och kring toroiden
- har studeranden experimentellt observerat hur ett föränderligt magnetiskt flöde inducerar en spänning över spolen
- har studeranden övat på att grafiskt presentera mätdata

3 Apparatur

3.1 Apparaturens delar

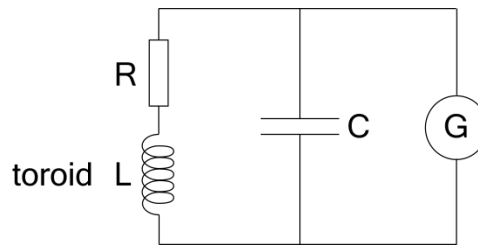


Figur 3. Mätningens kopplingsschema. Spänningsmätaren kopplas över motstånden då resonansfrekvensen söks, varefter man övergår till att mäta spänningen över sondspolen.

Dessutom behövs:

- rullmått
- skjutmått
- bananledning

I figur 3 är redskapen som behövs för att utföra arbetet illustrerade. Signalgeneratoren matar in växelspanning i resonanskretsen, som består av en kondensator, ett motstånd och en toroid (spole) i enlighet med figur 4. I en dylik resonanskrets beror strömmen av frekvensen och strömmen maximeras vid kretsens resonansfrekvens. Kondensatorns kapacitans har valts så att resonansfrekvensen är inom ett lämpligt område för mätningen. Vid resonansfrekvens går strömmen i resonansfrekvensen fram och tillbaka mellan spolen och kondensatorn så att energin turvis lagras som potentialenergi i kondensatorn och som energi i spolens magnetfält. Signalgeneratoren förhindrar dämpandet av resonansfrekvensens oscillation. Då man funnit kretsens resonansfrekvens genom att variera signalgenerators frekvens, bibehålls denna frekvens genom hela mätningen. Strömmen som går i toroiden ger upphov till ett magnetfält, som undersöks med hjälp av sondspolen.



Figur 4. Den parallella resonanskopplingen som består av toroiden, motståndet och kondensatorn.

Vid mätningarna skjuts sondspolen radiellt genom toroiden och universalmätaren mäter spänningen inducerad i sondspolen. Sondspolens avstånd från toroidens mittpunkt avläses samtidigt från skalan fäst på spolens ställning och antecknas.

Antalet varv i toroiden är $N = 100$, motsvarande värde för sondspolen är $N_S = 30$ varv. Resistansen för motståndet är $0,11 \Omega$ och dess fel $0,01 \Omega$.

4 Förhandsuppgifter

Bekanta dig med teorin som hör till arbetet i valfri fysiklärobok, t.ex. [1-3], läs igenom arbetsinstruktionen och besvara frågorna nedan på svarsblanketten.

1. Vilken är resonanskretsens roll i laborationens kopplingsschema?
2. Hur stor är den magnetiska flödestätheten innanför toroidens inre radie (i hålet)? Motivera ditt svar fysikaliskt.
3. Vad skulle den inducerade spänningen i sondspolen vara, om man i arbetet använde likström istället för växelström?
4. I detta arbete bestäms den magnetiska flödestätheten B från spänningen i sondspolen med hjälp av ekvation (9). Bestäm utgående från denna ekvation med hjälp av totaldifferentialen en feluppskattning för den magnetiska flödestätheten B . Beakta av variablerna sondspolens area A . (TIPS: I det här fallet är det lättare att beräkna det relativa felet.)

5 Mätningar

Alla mätresultat och svaren på förhandsuppgifterna antecknas på svarsblanketten. Användning av blyertspenna rekommenderas. Kontrollera alla kopplingar med assistenten innan strömmen slås på. Svarsblanketten returneras slutligen åt assistenten.

1. Mät toroidens yttre och inre diameter. Mät även bredden och höjden på sondspolen och anteckna värdena med tillhörande fel på svarsblanketten.
2. Koppla apparaturen enligt figur 3 så att spänningsmätaren är kopplad över motståndet.
3. Kontrollera att signalgeneratoren producerar sinusformad spänning och välj 10 kHz som frekvensområde. Ställ in signalgeneratorns utmatning på full effekt genom att vrida Amplitudströmbrytaren medsols. Ställ in spänningsmätaren på växelströmsområdet. Kontrollera att frekvensområdet för den använda spänningsmätaren räcker till.
4. Sök en frekvens för vilken spänningsmätarens utslag är som störst (intervallet 5 – 12 kHz) och skriv upp frekvensen och spänningsmätarens utslag på svarsblanketten. Beräkna från maximispänningen värdet för strömmen genom toroiden och anteckna värdet på svarsblanketten.

5. Koppla spänningsmätaren så att spänningen över sondspolen mäts.
6. **Gör en hypotes:** Skissera hur spänningen över sondspolen förändras då den skjuts i riktning med toroidens radie från utsidan på toroiden genom toroiden till toroidens mittpunkt. Rita en figur! Motivera ditt svar fysikaliskt.
7. **Testa din hypotes:** Skjut sondspolen på sina skenor fram och tillbaka och skriv upp/rita upp dina observationer på svarsblanketten. Uppmärksamma speciellt de punkter där spänningen ändras mest. Ifall din hypotes avviker från dina observationer, fundera varför.
8. Mät den inducerade spänningen över sondspolen som funktion av avståndet både på ut- och insidan av toroiden. Välj mätpunkterna med tätare mellanrum då sondspolen är nära toroidens kanter (t.ex. med 0.25 cm:s intervall) och glesare (t.ex. med 1 cm:s intervall) annars. Använd dig av måttskalan och linjen på plastskivan som indikerar avståndet r mellan sondspolens mitt och toroidens symmetriaxel (toroidens mittpunkt).
9. Koppla loss bananledningar från sondspolen. **Gör följande hypoteser och motivera dina svar fysikaliskt. Vad är**
 - a. spänningen om du snurrar en bananledning till en slinga runt toroidens rektangulära del (d.v.s. ledningen går över toroiden via mitthålet och sedan under toroiden, och mäter spänningen mellan ledningen ändor?
 - b. spänningen, om arean som ledningen bildar ändras genom att flytta på ledningen ändor?
 - c. strömmen som går i ledningen, då ledningen ändor kopplas ihop till en enhetlig slinga?
10. **Testa dina hypoteser.** Koppla universalmätaren enligt beskrivningarna ovan, gör mätningarna och skriv upp dina observationer på svarsblanketten. För att mäta strömmen måste universalmätarens koppling och skala ändras. Försäkra dig om att mätningen görs på AC-området. Obs. då du ändra på universalmätaren så att den mäter ström istället för spänning, motsvarar detta situationen i fall c) (kretsen är sluten). Fundera på möjliga orsaker ifall din hypotes avviker från dina observationer.

6 Behandling av resultaten

Anteckna resultaten på svarsblanketten. Bifoga grafer samt eventuella uträkningar gjorda på skilda papper till svarsblanketten.

1. Beräkna den magnetiska flödestätheten med tillhörande fel utgående från spänningen inducerad över sondspolen och ekvation (9). Rita den magnetiska flödestätheten B som funktion av avstånden r med tillhörande felmarginal i grafen.
2. Skriv ut din graf och bifoga utskriften till svarsblanketten.

7 Tankeställare

1. Hurdan är den magnetiska flödestätheten på basen av dina mätningar? När är den som störst och när är den som minst? Hur avviker den från fältet för en ideal tätt lindad toroid?
2. Jämför den magnetiska flödestätheten beräknad från mätningarna med motsvarande fält från simulationen inne i toroid slingan ($r \approx 10-20$ cm) samt utanför den ($r > 20$ cm). Överensstämmer storleken på de magnetiska flödestätheterna? Obs! Resultatet mätt inne i toroiden ($r \approx 10$ cm) och simulationen avviker från varandra eftersom simulationsplanet skär igenom den strömförande ledningen, vilket inte mätningen gör. Denna topp behöver således inte beaktas i jämförelsen.
3. Hurdana felkällor förekommer i arbetet? Föreslå förbättringar i mätanordningen.

Källor

- [1] D.C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics 4th edition, International edition, Pearson Education, Inc, 2009.
- [2] Hugh Young, Roger Freedman, A. Lewis Ford: University Physics with Modern Physics. International Edition. 13. upplagan. Pearson Education, 2011.
- [3] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Extended 9th edition, International Student Version, Wiley & Sons, Inc., 2011.