

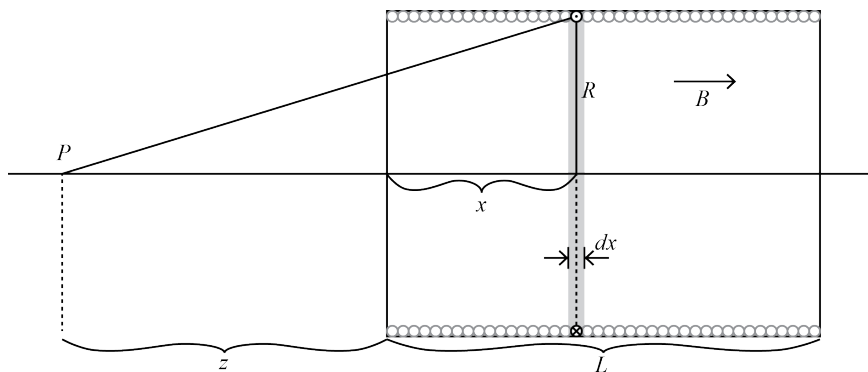
# SOLENOIDENS MAGNETFÄLT

## 1 Inledning

Betrakta en sluten cirkulär strömslinga (ström  $I$ ) med radien  $R$ . Från Biot-Savarts lag kan den magnetiska flödestätheten på strömslingans mittaxel på avståndet  $r$  härledas: [1]

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(r^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

där  $\mu_0$  är permeabiliteten i vakuum.



**Figur 1.** Härledning av magnetfältet kring en solenoid.

En solenoid består av flera strömslingor med samma radie som placerats efter varandra. Anta att ledningens radie är liten jämfört med solenoidens radie, att antalet strömslingor  $N$  är stort och strömslingornas densitet per längdenhet är  $N/L$ . På en sträcka  $dx$  på ett avstånd  $x$  från solenoidens ena ända finns då  $(N/L)dx$  stycken strömslingor i enlighet med situationen illustrerad i figur 1. Denna bit av solenoiden orsakar i punkt  $P$  på ett avstånd  $z$  från solenoiden (Obs!  $z$  är negativ inne i solenoiden) ett magnetfält enligt ekvation (1):

$$dB = \frac{\mu_0 I N}{L} \frac{R^2 dx}{2((z+x)^2 + R^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Magnetfältet på solenoidens mittaxel i punkt  $P$  fås genom att integrera ekvation (2) över hela solenoiden

$$\begin{aligned} B(z) &= \int_{\text{solenoid}} dB \\ &= \int_0^L \frac{\mu_0 I N}{L} \frac{R^2 dx}{2((z+x)^2 + R^2)^{3/2}} \\ &= \frac{\mu_0 I N R^2}{2L} \int_0^L \frac{dx}{((z+x)^2 + R^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (3)$$

Genom substitutionen  $u = z + x$  blir integralen lättare att lösa:

$$\int \frac{du}{(u^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{u}{R^2 \sqrt{u^2 + R^2}} \quad (4)$$

Magnetfältet kring solenoiden blir således

$$\begin{aligned}
 B(z) &= \frac{\mu_0 I N R^2}{2L} \int_{u=z}^{u=z+L} \frac{du}{(u^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \\
 &= \frac{\mu_0 I N}{2L} \left( \frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + R^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Från ekvation (5) kan man bestämma magnetiska flödestätheten på avståndet  $z$  från solenoidens framkant. För magnetiska flödestätheten vid solenoidens mitt ( $z = -L/2$ ) fås

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2\sqrt{\frac{L^2}{4} + R^2}}. \tag{6}$$

Om solenoiden är lång jämfört med dess radie ( $L \gg R$ ), närmar sig flödestätheten från ekvation (6) flödestätheten för en oändligt lång solenoid

$$B = \frac{\mu_0 I N}{L} = \mu_0 n I, \tag{7}$$

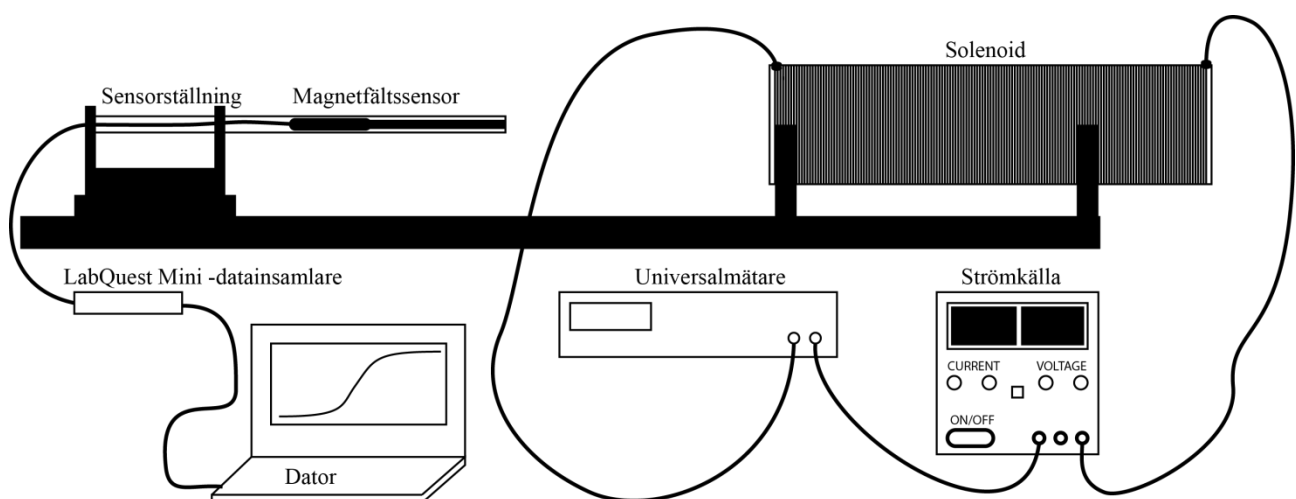
där  $n = \frac{N}{L}$  är varvdensiteten.

## 2 Målsättningar

Efter att ha utfört laboratoriearbetet

- kan studeranden beskriva formen på magnetfältet utanför och innanför en solenoid.
- har studeranden övat på att grafiskt presentera mätdata
- kan studeranden räkna ut styrkan på magnetfältet på solenoidens mittaxel

## 3 Apparatur



Figur 2. Apparaturen som används i arbetet.

I figur 2 är apparaturer som används i arbetet illustrerad. Solenoiden som används i arbetet vilar på plaststöd placerade på en optisk skena. En strömkälla försörjer solenoiden med en ström på 0,5 A. För att kunna mäta strömmen har en universalmätare kopplats i serie med solenoiden och strömkällan. **Obs! Välj universalmätarens mätområde och -koppling så att 0,5 A är inkluderat! I annat fall kan universalmätarens säkring gå sönder.** Den magnetiska flödestätheten mäts med en magnetfältssensor. Sensorn är placerad på solenoidens mittaxel, inne i det genomskinliga röret, som är på en ställning som rör sig på skenor. Sensorn mäter den komponent av magnetfältet som är vinkelrätt mot den vita punkten på spetsen av sensorn. Sensorns utslag är positivt då magnetfältets fältlinjer pekar i samma riktning som sensorn (d.v.s. bort från sensorn). Sensorn är kopplad till LabQuest Mini-datainsamlaren som i sin tur är ansluten till datorns USB-port.

Dessutom behövs:

- Rullmått
- Kompass

Annan nödvändig information om apparaturen:

- Solenoidens varvtal:  $N = 120$
- Magnetfältssensorns avstånd från kanten på ställningen:  $b = 26,5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$

## 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. Hur påverkar strömmen i solenoiden styrkan i den magnetiska flödestätheten på solenoidens mittaxel?
2. Hur bestäms magnetfältets riktning i solenoiden då strömmens riktning är känd?
3. I arbetet mäts den magnetiska flödestätheten  $B$  i solenoidens mitt som funktion av strömmen i solenoiden  $I$ . Till detta anpassas ekvationen för en linje ( $y = kx + b$ ). Vilken är riktningskoefficienten  $k$  för denna linje enligt ekvation (6)? Ge ekvationen för  $k$  och lös ut permeabiliteten i vakuum  $\mu_0$  ur denna ekvation.

## 5 Mätningar

Alla mätresultat och svaren på förhandsuppgifterna antecknas på svarsblanketten. Användning av blyertspenna rekommenderas. Svarsblanketten returneras slutligen åt assistenten.

### 5.1. Förberedelser

1. Placera solenoiden i den optiska skenans högra ända så att den första koppartråden sammanfaller med stödet till vänster under solenoiden. Avläs från stödets kant, läget för solenoidens framkant från skenans skala. Anteckna värdet på svarsblanketten.
2. Mät längden och diametern på solenoiden med ett rullmått och anteckna värdena på svarsblanketten.
3. Koppla magnetfältssensorn på den optiska skenan till LabQuest Mini – datainsamlarens kanal CH1 och anslut datainsamlaren till datorns USB-port. Öppna från Mittauspohjat-mappen LoggerPro-mätmodellen Solenoidin magneettikenttä.cml.

4. Nollställ magnetfältssensorn genom att välja: Experiment → Zero. Testa sedan sensorn genom att trycka på ”Collect”-knappen, som inleder en mätning. Magnetfältssensorns mätvärde bör nu fluktuera en aning kring noll.
5. Koppla strömkällan, solenoiden och universalmätaren i serie enligt figur 2. **Välj mätområdet och kopplingen noggrant så att mätaren tål strömmen 0,5 A.** Ställ universalmätaren på strömmätning. Be assistenten kontrollera kopplingen. Vrid alla knappar på strömkällan motsols till deras ytterläge och anslut strömkällans ledning till eluttaget. Öka spänningen en aning, öka sedan sakta strömmen till 0,5 A. Anteckna strömmens värde på svarsblanketten.

## 5.2 Solenoidens magnetfält

1. **Gör en hypotes:** Hur betar sig den magnetiska flödestätheten mätt av magnetfältssensorn då sensorn förflyttas längs med skenan mot solenoiden? Beakta strömmens riktning! Sensorn är från laboranten sett på solenoidens vänstra sida och strömmen i solenoiden går, sett från sensorn, medsols. Magnetfältssensorns mätvärde är positivt då de magnetiska fältlinjerna pekar i samma riktning som sensorn (d.v.s. bort från sensorn). Rita en graf på svarsblanketten och motivera ditt svar fysikaliskt.
2. **Testa hypotesen:** För sensorn till den motsatta ändan av skenan sett från solenoiden. Starta mätningen och skjut på sensorn genom att röra på sensorställningen under tio sekunder ända tills sensorn är i mitten av solenoiden. Hur betar sig den magnetiska flödestätheten? Skriv upp/rita upp dina observationer på svarsblanketten. Om din hypotes avvek från mätresultatet, fundera varför.
3. Gå tillbaka till Data Collection – fönstret innan de egentliga mätningarna påbörjas. Välj ”Events with Entry” som metod för att spara data. Om du vill kan du namnge koordinataxlarna för positionen och den använda enheten.
4. Ställ ställningen med magnetfältssensorn i motsatta ändan av skenan sett från solenoiden.
5. Starta mätningen genom att trycka på ”Collect”. Tryck på ”Keep” och mata in i datorfältet positionen på sensorställningens högre ända avläst från den optiska skenans skala. Datorn antecknar den magnetiska flödestätheten vid varje mätpunkt.
6. Skjut fram sensorställningen 5 cm mot solenoiden och upprepa mätningen.
7. Upprepa punkterna 5 och 6 så att avståndet mellan mätpunkterna till att börja med är 5 cm. När den magnetiska flödestätheten börjar förändras märkbart, då sensorn närmar sig solenoiden, väljer du mätpunkterna tätare så att punkterna till slut befinner sig på 1 cm:s avstånd från varandra. Flytta sensorn framåt och gör mätningar tills sensorställningen rör solenoidens stöd. Iaktta värdet vid den nedre kanten på mätprogrammets fönster och skriv upp felet för de magnetiska flödestätheterna på basis av värdets fluktuation. Gör samtidigt en uppskattning av felet på positionen för den främre kanten på sensorställningen. Avsluta mätningen
8. Godkänn mätningen genom att trycka på Ctrl+L. Spara mätresultatet som en Logger Pro:n cml-fil och t.ex. i textformat. Spara resultaten i Mittausdata-mappen, eller på Opiskelijat-nätskivan.

## 5.3 Formen på magnetfältet kring solenoiden

1. Öka strömmen som går genom solenoiden till 1,0 A och undersök magnetfältets riktning runt solenoiden med hjälp av kompassen. Anteckna magnetfältets riktning på svarsblanketten för punkter a, b och c. Kompassens röda nål pekar mot den magnetiska nordpolen.
  - a. Vartåt pekar magnetfältet vid solenoidens ändor?
  - b. Vid solenoidens hörn?
  - c. På sidorna?
2. Kontrollera slutligen vartåt kompassen pekar då magnetfältet kring solenoiden är noll och rita in även detta i samma figur.

## 5.4 Permeabiliteten i vakuum

1. För in magnetfältssensorn i solenoiden så att sensorns ända är mitt i solenoiden. Under mätningen hålls sensorn på plats medan storleken på strömmen  $I$  som går i solenoiden ändras från strömkällan.
2. Välj "Events with entry" som datainsamlingsmetod liksom vid föregående mätning. I datafältet antecknas denna gång storleken på strömmen genom solenoiden  $I$ , som avläses från universalmätaren.
3. Börja mätningen genom att trycka på "Collect" knappen.
4. Ändra på strömmens värde i intervallet 0–0,5 A. Mät den magnetiska flödestätheten  $B$  åtminstone för fem olika värden på strömmen genom att använda "Keep" knappen (Ctrl+k) och mata in universalmätarens värde i fältet som datorn föreslår.
5. Godkänn mätningen genom att trycka på Ctrl+L. Spara mätresultatet som en Logger Pro:n cml-fil och t.ex. i textformat. Spara resultaten i Mittausdata-mappen, eller på Opiskelijat-nätskivan.

## 6 Behandling av resultaten

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

### 6.1 Magnetfältet kring solenoiden

1. Beräkna sensorns avstånd från solenoidens framkant m.h.a. magnetfältssensorns avstånd från kanten på ställningen och avståndet mellan solenoiden och sensorställningens kant. Du kan anta att sensorn befinner sig längst till höger i röret på sensorställningen, dvs. på avståndet  $26,5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$  från sensorställningens kant. Uppskatta felmarginalen för sensorns position. Rita upp det uppmätta magnetfältet vid solenoidens mittaxel som funktion av avståndet  $z$ , där  $z$  är avståndet till solenoidens framkant.
2. Skriv ut din graf och bifoga den till svarsblanketten.

### 6.2 Permeabiliteten i vakuum

1. Rita grafen av den magnetiska flödestätheten  $B$  i solenoiden som funktion av strömmen  $I$ . Anpassa en rak linje till resultaten i grafen och bestäm linjens riktningskoefficient. Bestäm värdet på permeabiliteten i vakuum från riktningskoefficienten.
2. Skriv ut din graf och bifoga denna till din svarsblankett.

## 7 Tankeställare

1. Beräkna, för att jämföra, de teoretiska värdena för den magnetiska flödestätheten i mitten av solenoiden ( $z = -L/2$ ), samt vid solenoidens framkant. Motsvarar din uppmätta värden för den magnetiska flödestätheten dessa teoretiska värden?
2. Hurdana felkällor förekommer i arbetet?
3. Jämför permeabiliteten du bestämde i punkt 6.2 med litteratürvärdet på permeabiliteten i vakuum. Stämmer resultaten överens? Hur inverkar det att mätningarna gjorts i luft och inte i vakuum på resultatet?

## Källor

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