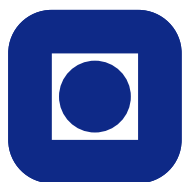


Oppgave 4      Lab i TFY4120

## Magnetisk felt og fluks

Institutt for fysikk, NTNU



## 1.1 Innledning

Kontroll av statiske og tidsavhengige magnetfelt er viktig i vitenskap og teknologi. I de fleste tilfellene er det ønskelig å generere et felt av en bestemt styrke og med en bestemt orientering. Dette skjer i praksis ved å sende en konstant strøm gjennom et spolesystem. En aktuell problemstilling av motsatt type er å skjerme ute et magnetfelt, f.eks. jordfeltet.

Et magnetisk felt som varierer i tid genererer alltid en et varierende elektrisk felt, og motsatt. Magnetisme og elektrisitet er altså gjensidig avhengige fenomener. Denne avhengigheten kan beskrives med *Maxwells ligninger* [1, 3] som vil bli presentert etter hvert i teksten (likningene B.1.1, B.1.2, B.2.3, og B.3.4).

I denne oppgaven skal du få erfaring med å måle statiske magnetfelt med en *Hall-probe*. Dette instrumentet er eksempel på et *magnetometer*. Tidsavhengige felt skal undersøkes ved å studere variasjonen til en induisert spenning med et oscilloskop. I tillegg skal du se hvordan magnetiske effekter kan brukes til å bygge en elektrisk motor.

## 1.2 Forhåndsoppgaver

1. I en del elektriske apparater som barbermaskiner, hårføner og lignende kan strømmen komme opp i størrelsesorden 1 A. Anslå (grovt) størrelsesordenen på magnetfeltet som en person utsettes for når han/hun beveger seg i nærheten av (f.eks. 10 cm fra) en rett leder med strøm 1 A. Sammenlign med jordfeltet. Tips: Bruk likning B.3.6.
2. Magnetfeltet fra en kort spole med  $N$  viklinger kan langt fra spolen sees på som summen av magnetfeltet fra  $N$  strømsløyfer. La  $R$  være gjennomsnittsradius for spolen. Det kan vises av likning B.3.8 at feltet langs spoleaksen tilnærmet kan skrives

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2R} \left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^{-3/2}. \quad (1.2.1)$$

Det er antatt at  $x$  er avstanden fra spolens sentrum, og at denne er mye større enn lengden av spolen. Plott feltstyrken fra spolen som funksjon av avstanden fra den, for  $N = 200$ ,  $R = 10,5$  cm) og  $x$  opptil 30 cm. Det kan lønne seg å muliggjøre inntegning av eksperimentelle målinger i samme graf, eller å plote det på dator som kan tas med på labben.

## 1.3 Obs før du starter med laboratorieoppgavene

Det legges vekt på forståelse av grunnleggende prinsipper. Forsøk å jobbe rolig og metodisk. Vi forventer at du sitter ut hele labtida som for denne oppgaven er 4 timer. Det er ikke et krav om at alle oppgaver skal utføres.

- Bruk garderobehyllene. Sett ryggsekker til side. Spising og drikking er dessverre ikke tillatt inne på laben.
- Utstyret og instrumentene du skal bruke, må du behandle forsiktig.
- Det er livsfarlig og absolutt ikke tillatt å plugge labledninger i nett-kontakter.
- Strømmen til motorspolene, statorer og rotor er må holdes under 0,9 A. Bruk strømbegrensingsmuligheten på strømforsyningene. Ikke la spolestrømmen gå i lengre tid, spesielt ikke når motoren står i ro.
- Rydd opp etter deg før du går. Slå av alle instrumenter. Sett alt utstyret tilbake i samsvar med fotografiet på labplassen.

## 1.4 Laboratorieoppgaver

### 1.4.1 Måling av magnetiske felt

Sett deg inn i bruk av magnetometeret. Bruk den flate proben. Nullstill instrumentet jevnlig ved bruk av nullfeltkammeret. Mål strøfeltet noen steder rundt arbeidsplassen din. Prøv å rotere proben for å finne retningen med størst utslag. Kommenter resultatet.

Bruk utlagte kompass og finn ut hvilken vei proben må holdes for at den skal gi et positivt utslag på magnetometeret når feltlinjene du måler har positiv retning. Prøv å finne retningen og størrelsen til jordas magnetiske felt.

**Vær forsiktig med instrumentet, spesielt probene!** Dersom batteriene begynner å bli svake, kan det lønne seg å benytte nettspenning som kilde her. Magnetometeret må ha vært på i 15 minutter for å oppnå minst mulig usikkerhet i målingene.

For større nøyaktighet kan du dreie proben  $180^\circ$  og ta en måling til. Du vil få én positiv og én negativ verdi, f.eks. 0,04 mT og  $-0,05$  mT, og kan bruke gjennomsnittet av absoluttverdiene til disse som måleverdien.

### 1.4.2 Magnetfeltet rundt en spole

Send en strøm på 1.00 A gjennom den store utlagte spolen. Bruk lavmotstandsutgangen. Husk å notere strømmen og spenningen du bruker i journalen. Mål magnetfeltet rundt spolen og lag en enkel skisse av feltet (ved hjelp av feltlinjer) i et plan som skjærer gjennom midten av spolen (f.eks. parallelt med bordflaten).

Mål feltstyrken langs akse som går gjennom sentrum av spolen og står normalt på spoleplanet i ulike avstander fra spolen. Mål avstanden  $x$  med en tre- eller plastlinjal. Plott resultatene dine i en graf med usikkerhetsstolper (anslag) for både  $B$  og  $x$ . Plott også de teoretiske feltverdiene regnet ut vha. likning 1.2.1 i forhåndsoppgaven. Får du overensstemmelse innenfor usikkerheten?

### 1.4.3 Indusert spenning i spole

Sett deg tilstrekkelig inn i bruk av oscilloskopet og funksjonsgeneratoren. Bruk en overgang fra bananplugg til coax-kabel for å måle spenningen ut fra funksjonsgeneratoren med oscilloskopet. Bruk kanal 1 til dette, da denne brukes til trigging av oscilloskopet. Merk at overgangene har en spesifikk plug for jord (merket GND). Skru ned utgangsspenningen fra funksjonsgeneratoren (AMPLITUDE) før du slår den på og av. Trykk på AUTOSET-knappen for å justere akser og trigging automatisk.

Forsikre deg om at funksjonsgeneratoren er koblet til den store spolen (bruk low  $\Omega$ -utgangen) og koble oscilloskopet til en av de små spolene (de er montert på firkantede staver, og har antall varv notert på dem). Skru ned utgangsspenningen fra funksjonsgeneratoren (*amplitude*) før du slår den på og av. Bruk både sinus- og trekantspenning i den store spolen. Skru på oscilloskopet og trykk på autoset-knappen for å observere den induserte spenningen i den lille spolen.

Finn ut hvordan spolene må holdes relativt til hverandre for maksimal indusert spenning, plott indusert spenning som funksjon av vinkel. Kontroller at forholdet mellom amplituden til de induserte spenningene i de to små spolene stemmer med forholdet mellom antall viklinger. Mål også frekvensen til den induserte spenningen, og kommenter verdien.

### 1.4.4 Magnetfeltet med og uten jernkjerne

Koble funksjonsgeneratoren til en av de firkantede spolene ved bruk av lavmotstandsutgangene, og send en strøm på 50 Hz gjennom den. Mål feltet

ved posisjoner fra enden av spolen til 10 cm (bruk AC instillingen på Hallproben). Sett så den rette jernkjernen inni spolen med den ene kanten lengs med kanten på spolen og repeter målingene. Plott resultatene i samme graf. Hva er opprinnelsen til avvikene?

#### 1.4.5 Indusert spenning i spole med jernkjerne

Strømmen gjennom spolen vil skape et varierende magnetfelt. Koble oscilloskopet til den andre firkantede spolen, og undersøk spenningen som induseres i denne når de to spolene holdes inntil hverandre.

Finn ut hvilken rotasjon av spolen og hvilken frekvens som gir maksimal indusert spenning. Mål indusert spenning som funksjon av frekvens, doubler frekvensen fra 6.25 Hz (6.25, 12.5, 25...) til ca 100 000 Hz (signalen blir forvrengt ved lave og høye frekvenser det kan hjelpe å senke amplituden på innsignalen).

Sett nå de to firkantede spolene på den buede jernkjernen som i figur 1.4.1. Hva skjer nå med den induserte spenningen? Mål feltet ved endene av jernkjernen. Hvor stort er det, og hvordan er det rettet? Slutt så den magnetiske løkken ved å bruke den rette jernkjernen. Hva skjer med spenningen, og hvorfor? Mål igjen indusert spenning som funksjon av frekvens ved de samme målepunktene som tidligere. Plott resultatene på logaritmisk papir og kommenter.

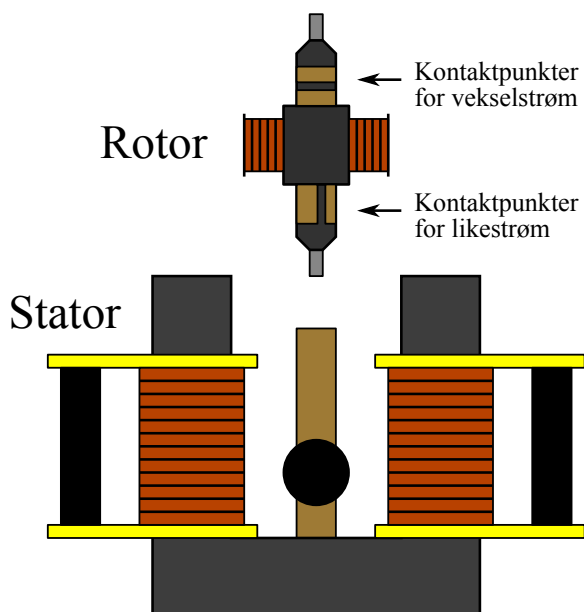
#### 1.4.6 Elektromotorer

Lag en oppkobling for en elektrisk likestrømsmotor (asynkron modus). Rotoren må her være snudd slik figur 1.4.1 viser. Benytt to likespenningskilder, én for statoren og én for rotoren.

For å holde strømmen under 0,9 A på spenningskildene er det enklest å bruke strømbegrensning på spenningskilden slik at denne blir spenningsstyrt. Dette gjøres på følgende måte:

1. Forsikre deg om at OUTPUT er stilt til riktig kanal.
2. Skru strøm til minimum og spenning til maksimum.
3. Sett displayet til å måle strøm (og behold det slik).
4. Juster strømmen opp til 0,9 A.
5. Bruk så spenningsknotten til å styre strømstyrken.

Målet med oppkoblingen er å danne en sørpol og nordpol på hver side av statoren. Rotorens polaritet skal reverseres når den roterer. Skaff deg en



Figur 1.4.1: En elektromotor bestående av en stator og en rotor.

oversikt over strøm- og feltretninger (magnetometeret kan brukes her), og tegn et enkelt koblingsdiagram. Forklar kort virkemåten, diskuter spesielt rotasjonsretning og hastighet. Teorien fra seksjon B.4 kan være til hjelp her.

Forsøk til slutt å lage en tilsvarende vekselstrømsmotor (synkron modus). Likespenningskildene skal fortsatt brukes for å sette opp et permanent magnetfelt, men rotoren må snus opp-ned og få vekselspanning fra funksjonsgeneratoren. Merk at det kan være vanskelig å få denne motoren i gang, og at frekvensen bør stilles lavt (ca. 10 Hz) til å begynne med.

# Bibliografi

- [1] H. D. Young & R. A. Freedman: *University Physics*, 13. utg., Addison–Wesley, San Francisco 2011, chapters 27 and 28.  
*(Merk at denne boka er lærebok i TFY4102 og TFY4180 Fysikk.)*
- [2] P. A. Tipler & G. Mosca: *Physics*, 6. utg., Freeman, New York 2008.  
*(Merk at denne boka er lærebok i TFY4104, TFY4106, TFY4120 og TFY4125 Fysikk.)*
- [3] D. S. Griffiths: *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, New Jersey 1999, chapters 5 and 7.

Johannes Bremer 1999

Revidert 18.03.03: HFH,EOL,KAS

Revidert 05.02.04: AKB,JAH,KAS

Revidert 12.02.06: AKB,JAH,KAS

Revidert 28.06.07: AKB,KAS

Revidert 24.01.12: SW,BS,KAS

Revidert 13.09.12: SW,EW Revidert 10.09.12: EW





# Tillegg A

## Apparatur

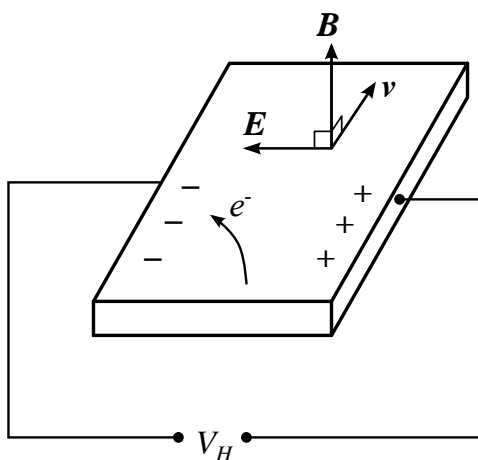
### A.1 Magnetometeret

Det er utviklet mange typer magnetometre som er mer eller mindre følsomme. I våre målinger skal vi benytte en *Hall-probe*. Instrumentet består essensielt av en strømkilde som sender en konstant strøm gjennom en halvleder. Halvlederen har et areal på noen  $\text{mm}^2$ , og har et bestemt antall  $n$  frie elektroner per volumenhet. Proben plasseres i magnetfeltet som skal måles. Når elektronene med ladning  $e$  beveger seg med hastighet  $\mathbf{v}$  i et magnetfelt  $\mathbf{B}$  blir de bøyd av til den ene siden av lederen. Avbøyningen fører til at det blir flere elektroner på avbøyningssiden. Det bygges dermed opp et elektrisk felt  $\mathbf{E}$  som står vinkelrett på både magnetfeltet og retningen til den elektriske strømmen (se figur A.1.1). Dette kalles *Hall-effekten* [1]. Når det elektriske feltet er sterkt nok til å hindre flere elektroner i å bevege seg til siden inntre det en likevekt.

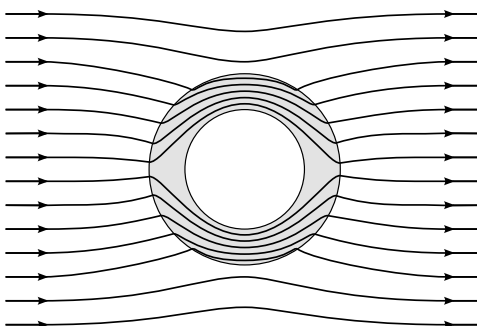
Spenningen  $V_H$  som det magnetiske feltet setter opp kalles *Hall-spenningen* og kan beregnes ved å sette  $\mathbf{F} = 0$  i likning B.4.9. Gjennom en kalibreringsprosess kan sammenhengen mellom målt hallspenning og magnetfelt etableres, og feltet kan leses av direkte i enhetene tesla eller gauss.

Selve målesonden til en Hall-probe kan være enten plan- eller sylinderformet. I det første tilfellet måles komponenten av  $\mathbf{B}$  som står normalt på planet, mens i det andre tilfellet måles komponenten langs sylinderaksen. Målinger av magnetfelt brukes f.eks. i forbindelse med leting etter jernmalm, der alle tre feltkomponentene må finnes.

Hall-proben må kalibreres slik at spenningen nulles ut i et rom med null magnetfelt. Til dette brukes et nullfeltkammer, som er vist i figur A.1.2. Kammeret har vegger bestående av *my-metall*, som har en høy magnetisk permeabilitet  $\mu$ . Dette fører til at de magnetiske feltlinjene avbøyes så sterkt



Figur A.1.1: Hall-probe. Den krumme pilen viser avbøyningsretningen til elektronene.



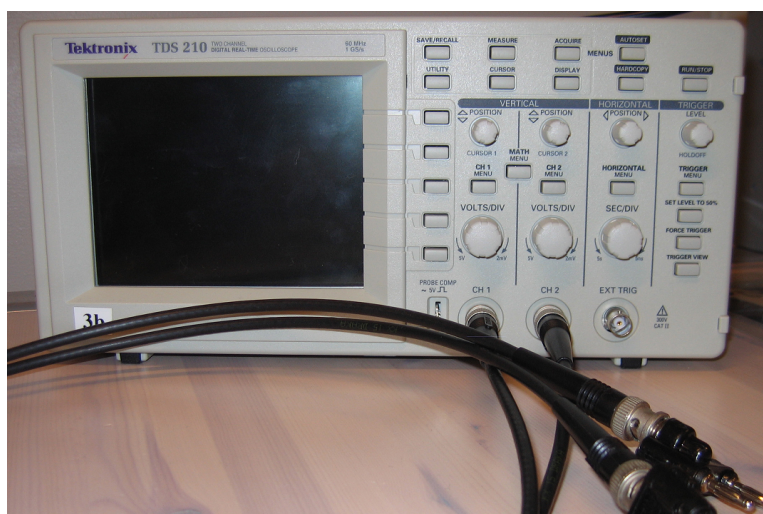
Figur A.1.2: Hvordan feltlinjene ser ut rundt og inni veggene til nullfeltkammeret.

at kammeret blir tilnærmet magnetfeltfritt. For å kalibrere magnetometrene som brukes i øvelsen, stiller man funksjonsvelgeren på ZERO, trykker på AUTO-knappen og venter til nullstillingen er ferdig. Deretter stiller man til MEASURE og kan utføre målinger.

## A.2 Oscilloskopet

Et oscilloskop brukes til å kontinuerlig måle spenningen over en elektrisk krets. Dette er spesielt nyttig når man jobber med vekselstrøm, der et enkelt signal blir repetert med en viss frekvens. Alle oscilloskop har en mulighet for *triggering*, som er å alltid plassere det repeterende signalet på samme sted på displayet, for å unngå at signalet flytter seg for fort til å bli observert.

I denne øvelsen brukes et digitalt oscilloskop som i figur A.2.3. Signalene kobles til inngangene for kanal 1 og 2 med coax-kabler. AUTOSET-knappen bru-



Figur A.2.3: Det digitale oscilloskopet som brukes på laben.

kes til automatisk triggering, og VOLTS/DIV og SEC/DIV-knottene brukes til å skalere aksene. For å gjøre kvantitative målinger, trykk på MEASURE-knappen og velg frekvens eller peak-to-peak-amplitude for kanalen du ønsker å måle på med knappene til høyre for displayet.



# Tillegg B

## Teoretisk grunnlag

### B.1 Magnetisk fluks

Et magnetfelt beskrives med vektorfeltet  $\mathbf{B}$ . Dette vektorfeltet kalles magnetisk flukstetthet, og måles i tesla,  $T = Vs/m^2$ . Det kan sammenlignes med et felt for partikkelflukstetthet,  $\mathbf{J} = n\mathbf{v}$ , der  $n$  er tettheten av partikler og  $v$  er hastigheten til partiklene. Antall partikler som strømmer gjennom et flateareal med normalvektor  $\mathbf{A}$  (areal  $|\mathbf{A}|$ ) er gitt ved skalarproduktet  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{A} = n\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$  og kalles *partikkelfluksen*. Hvis det ikke finnes kilder eller sluk for partiklene, må like mange gå inn i et lukket volum som ut av volumet.

I analogi med dette kan en definere en fluks  $\Phi_{\mathbf{B}}$  for magnetfeltet  $\mathbf{B}$ . Hittil har ikke magnetiske monopoler blitt eksperimentelt påvist. Det finnes dermed ingen kilder eller sluk for magnetiske felt, så like mange magnetiske feltlinjer må gå inn og ut av et gitt volum. Dette kan uttrykkes via Gauss lov for magnetisme,

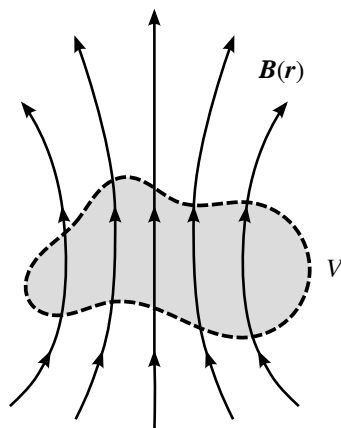
$$\Phi_{\mathbf{B}} = \oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0, \quad (\text{B.1.1})$$

der  $d\mathbf{A}$  er et infinitesimalt overflateelement på volumet.

Figur B.1.1 viser skjematisk at den magnetiske fluksen blir null når man integrerer over en lukket overflate. Dette betyr at magnetiske feltlinjer alltid må være lukkede. Dette er i kontrast til det elektriske feltet  $\mathbf{E}$ , der Gauss lov sier

$$\Phi_{\mathbf{E}} = \oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad (\text{B.1.2})$$

hvor  $Q$  er den totale ladningen inni volumet det integreres rundt og  $\epsilon_0$  er den elektriske permittiviteten til vakuum.



Figur B.1.1: Skisse av magnetiske feltlinjer. Like mange går inn i volumet  $V$  som ut av volumet.

## B.2 Magnetisk induksjon

Tidsvariasjoner i et magnetisk felt gir opphav til en elektromotorisk kraft  $\mathcal{E}$  i en leder. Dette kalles induksjon. Den elektromotoriske kraften, som har enhet V, kan uttrykkes ved linjeintegralet av det induserte elektriske feltet over en lukket krets. Faradays lov sier hvordan  $\mathcal{E}$  er relatert til den tidsderiverte av den magnetiske fluksen gjennom overflaten kretsen omspinner:

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{\mathbf{B}}}{dt}. \quad (\text{B.2.3})$$

Dette kan brukes til å regne ut f.eks. indusert spenning i en antenne som følge av det varierende magnetfeltet i radiobølger.

## B.3 Magnetostatikk

Magnetostatistke systemer har magnetfelt som ikke varierer med tiden. Ampères lov er et uttrykk for at elektriske ladninger i bevegelse alltid er ledsaget av et magnetisk felt. I vakuum gjelder<sup>1</sup>

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I, \quad (\text{B.3.4})$$

der  $I$  er total strøm innenfor integrasjonsveien til linjeintegralet og  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ . Det kan vises utifra Ampères lov at magnetfeltet fra en

<sup>1</sup>Maxwell påviste at ligning B.3.4 er ufullstendig ved raske tidsvariasjoner, f. eks. ved vekselstrøm med høye frekvenser. Et korreksjonsledd må innføres for å beskrive bl.a. utsendelse og absorpsjon av radiobølger.

generell strømlederkonfigurasjon kan beregnes med Biot-Savarts lov,

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}'}{|\mathbf{r}'|^3}, \quad (\text{B.3.5})$$

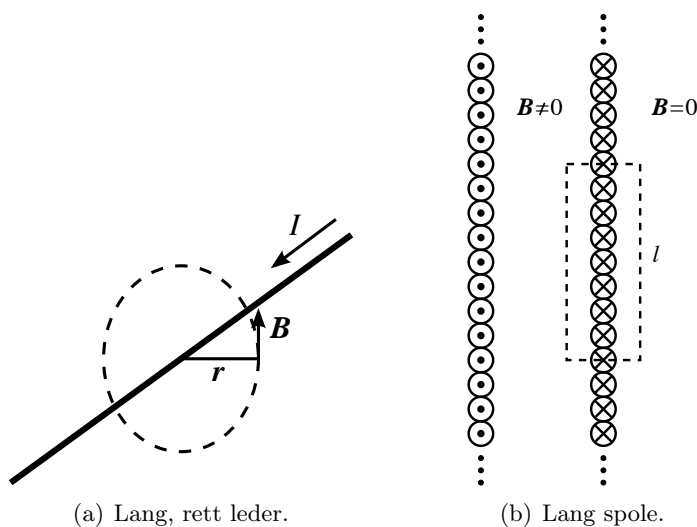
der  $\mathbf{r}'$  er en vektor som går fra strømledersegmentet  $d\mathbf{l}$  til punktet  $\mathbf{r}$  der magnetfeltet måles, og  $\times$  er vektorkryssproduktet.

### Magnetfeltet rundt vanlige strømlederkonfigurasjoner

La oss først tenke oss en lang (tilnærmet uendelig lang), rett leder i vakuum. Vektoren  $d\mathbf{l}$  vil peke langs strømretningen, og  $\mathbf{r}'$  vil peke ut fra ledere. Ved bruk av høyrehåndsregelen på ligning B.3.5, finner vi at magnetfeltet alltid er rettet i asimutal retning i forhold til ledere (i løkker rundt ledere). Ved å legge integrasjonsveien langs en sirkel (se figur B.2(a)) med radius  $r = |\mathbf{r}|$  rundt ledere, får vi  $2\pi r B = \mu_0 I$ , som gir oss

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\mathbf{e}}_\theta, \quad (\text{B.3.6})$$

der  $\hat{\mathbf{e}}_\theta$  er enhetsvektoren i asimutal retning.



Figur B.3.2: Integrasjonsveier for å beregne magnetfeltet rundt strømledere vha. ligning B.3.5.

En leder kan også vikles opp til en spole med  $N$  viklinger fordelt over en lengde  $L$ . Dersom  $L$  er veldig stor, viser det seg at magnetfeltet langt fra endene er tilnærmet uniformt inne i spolen og tilnærmet null utenfor. Vi nytter dette som en tilnærming og legger integrasjonsveien som vist i figur B.2(b). Vi får da

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I N}{L} \hat{\mathbf{e}}_z, \quad (\text{B.3.7})$$

hvor  $\hat{\mathbf{e}}_z$  er enhetsvektoren i retningen til spolens akse.

Feltet fra en *kort* spole kan beregnes ved å summere bidragene fra mange enkelte strømsløyfer ( $N = 1$ ) lagt oppå hverandre. I en stor avstand fra en enkelt sløyfe i  $xy$ -planet kan magnetfeltet tilnærmes til

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{m}}{r^3}, \quad (\text{B.3.8})$$

der  $r = |\mathbf{r}|$  og  $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/|\mathbf{r}|$ . Her har vi også innført det *magnetiske dipolmomentet*, som kan uttrykkes ved  $\mathbf{m} = I\pi R^2 \hat{\mathbf{e}}_z$ , der  $R$  er radien til strømsløyfen.

En lang spole kan oppfattes som et tynt rør som transporterer magnetisk fluks langs røraksen. I “nordpolenden” spres feltlinjene symmetrisk utover i rommet, mens de samles i “sørpolenden” til spolen. En stavmagnet har et magnetfelt med samme form som det fra en spole med strøm gjennom. Jordas magnetfelt ligner også på dette feltet, som om en enorm stavmagnet var begravet i jordens indre. Dette forklarer hvorfor feltlinjene på høye breddegrader er nesten vertikale. Jordfeltet i Norge er ca. 0,05 mT (1 T tilsvarer  $10^4$  gauss). Magnetisk sørpol ligger i Hudson Bay-området i Canada.

## B.4 Kraft på ledere

En ladet partikkel i bevegelse i konstante elektriske og magnetiske felt utsettes for den såkalte Lorentz-kraften [1, 3],

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (\text{B.4.9})$$

der  $q$  er partikkelladningen. Derfor vil magnetfelt også utsette ledere med strøm gjennom for en kraft. Kraftpåvirkningen på et infinitesimalt strømssegment er

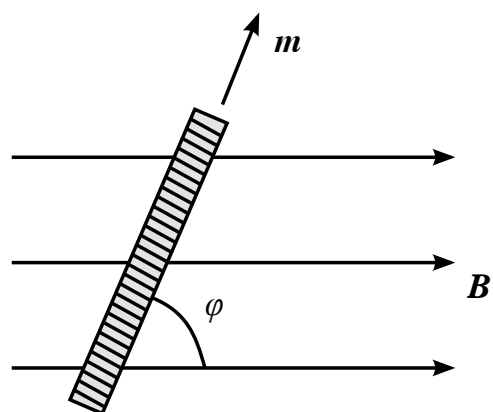
$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}. \quad (\text{B.4.10})$$

Total kraft på en leder kan finnes ved å integrere denne ligningen over hele lederen. Hvis vi har en spole i et homogent magnetfelt vil  $d\mathbf{l}$  peke i motsatt retning på motsatt side av spolen. Kraften vil dermed gi opphav til et dreiemoment  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$ , hvor  $\mathbf{m}$  er spolens dipolmoment. Husk at spolen vil rotere mot klokka rundt vektoren  $\boldsymbol{\tau}$ .

Som et enkelt eksempel ser vi på situasjonen i figur B.4.3. La vinkelen mellom spolen og feltretningen være  $\phi$ . Dreiemomentet på spolen blir  $\tau = NmB \sin \phi$ , der  $m = I\pi R^2$ . Feltet vil vri spolen slik at  $\mathbf{m}$  og  $\mathbf{B}$  blir parallelle.

Dette kan utnyttes til å omsette elektrisk energi til mekanisk energi. I *synkron* motorer varierer det ytre feltet syklisk på en slik måte at rotasjonen alltid er med (eller mot) urviseren. I *asynkron* motorer svitsjes isteden strømmen mellom å gå i to retninger slik at dreiemomentet også her har samme fortegn.





Figur B.4.3: Tynn spole i et magnetfelt. Dreiemomentvektoren peker inn i papirplanet.