

Het magnetisch veld van een elektromagneet

A.1 Doelstelling van de proef

In de magnetische kring van een elektromagneet bevindt zich een luchtspleet die als meetruimte fungeert. De invloed van de luchtspleet op het magnetisch veld wordt onderzocht.

A.2 Vereiste voorkennis

Magnetische inductie, magnetische flux, magnetisatie, permeabiliteit, ferromagnetisme, hysteresis, remanente magnetisatie

A.3 Literatuur

“Physics for scientists and engineers with Modern Physics” 5e ed. R.A. Serway, Saunders College Publ., Electricity and Magnetism: Sources of the Magnetic Field

D.C. Giancoli, “Physics for scientists and Engineers”, Pearson Ed. Inc.

B.1 Fysische achtergrond

B.1.1 Magnetische reluctantie

De magnetomotorische kracht K voor een magnetische kring wordt als volgt gedefinieerd:

$$K = NI = R\phi \quad (1)$$

met N het aantal windingen, I de elektrische stroom door de spoelen, R de reluctantie en ϕ de magnetische flux.

De **reluctantie** is in feite het magnetisch equivalent van de elektrische weerstand R uit de wet van Ohm ($V = RI$). De magnetische flux ϕ speelt hier dus de rol van de elektrische stroom I . De elektrische weerstand R van een blok materiaal als functie van zijn lengte L , doorsnede A en receptiviteit ρ wordt gegeven door $R = \rho L/A$ of door $R = L/\sigma A$ als we de conductiviteit gebruiken (met $\sigma = 1/\rho$). Gelijkaardig wordt de reluctantie van een materiaal gegeven door $R = L/\mu A$ met μ de permeabiliteit van het materiaal. Deze permeabiliteit komt dus overeen met de elektrische conductiviteit. Net zoals een goede geleider een grote conductiviteit en dus een lage weerstand heeft, heeft een **goed magnetisch materiaal een hoge permeabiliteit en dus een lage reluctantie**.

Bij de experimentele opstelling bevindt zich een luchtspleet tussen de poolstukken van de magneet (zie B.1.2 Meetopstelling). De lengte van deze luchtspleet kan veranderd worden (via de schroeven met het label R in figuur 3). Onderstel dat R_0 de reluctantie is wanneer de luchtspleet tot nul herleid is, A de doorsnede van de poolstukken en L de lengte van de luchtspleet, dan kan de reluctantie geschreven worden als:

$$R = R_0 + \frac{L}{A} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_p} \right) \quad (2)$$

μ_0 en μ_p zijn hier de permeabiliteit van de vrije ruimte en van de poolstukken respectievelijk. Vergelijking (2) betekent dat een deel van de poolreluctantie $L/A\mu_p$ door de luchtspleetreluctantie $L/A\mu_0$ vervangen werd. Hierbij wordt van de veronderstelling uitgegaan dat de doorsnede van de fluxbundel in de luchtspleet dezelfde is als in de polen.

De flux ϕ uit vergelijking (1) kan geschreven worden als:

$$\phi = \int_A B dA \quad (3)$$

met B de magnetische inductie. Als B constant is over het oppervlak dan is $\phi = BA$. Uit vergelijkingen (1) en (2) volgt dan:

$$NI = (R_0 + \frac{L}{A}(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_p})) BA \quad (4)$$

of

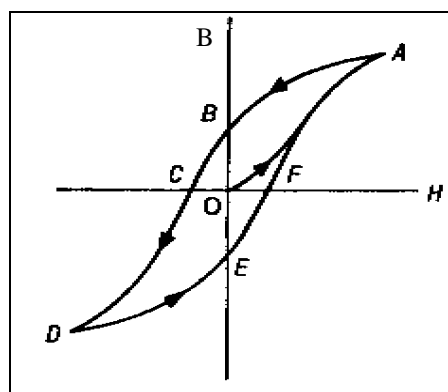
$$NI = (\alpha + L(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_p}))B \quad (5)$$

Vergelijking (5) geeft aan hoe B zal veranderen in functie van de stroom I en de lengte van de luchtspleet L . Op te merken valt nog dat α en μ_p op ferromagnetische materialen slaan en hun waarde dus afhankelijk zal zijn van de waarde van B .

B.1.2 Ferromagnetisme, hysteresis en remanente magnetisatie

Een belangrijke klasse van magnetische materialen zijn de ferromagnetische materialen. Hun voornaamste eigenschap is dat zij een permanente magnetisatie kunnen vertonen, die verklaard kan worden door aan te nemen dat de magnetische momenten van de atomen of moleculen zich door onderlinge wisselwerking richten. Deze wisselwerking kan tot gevolg hebben dat de spins spontaan onderling evenwijdig gericht worden in microscopische gebieden, namelijk domeinen.

Als de magnetisaties van alle domeinen in de richting van B staan is de **saturatiemagnetisatie** van het materiaal bereikt. Wordt het uitwendige veld weer uitgeschakeld, dan zal in het algemeen de totale magnetisatie niet meer tot nul afnemen. De oorspronkelijke willekeurige verdeling van de magnetisaties van de domeinen keert niet terug, de stof vertoont een **remanente magnetisatie**. Om de magnetisatie tot nul te reduceren moet een tegengesteld veld, het **coërcitieve veld**, worden aangebracht. Er is dus een irreversibel gedrag, dat **hysteresis** wordt genoemd. Dit wordt weergegeven in een **hysteresiskromme** (zie figuur 1), waarbij B uitgezet wordt in functie van de magnetische veldsterkte H .



Figuur 1: Hysteresiskromme (B in functie van H).

Als men begint met een gemagnetiseerd materiaal in veld nul, dan zal de magnetische inductie na inschakelen van het veld de kromme OA doorlopen. Deze wordt de aanloopkromme of maagdelijke kromme genoemd. Wordt daarna het veld weer uitgeschakeld dan volgt de magnetisatie lijn AB en bereikt in B de remanente magnetisatie of remanentie. Brengt men nu het veld in tegengestelde richting aan, dan wordt in C het coërcitieve veld bereikt. De magnetisatie keert nu van teken om en volgt CD . Laat men bij D het veld weer afnemen en schakelt men om, dan loopt de magnetisatie langs de kromme $DEFA$ terug. Na terugkeer in A is een volledige hysteresislus beschreven.

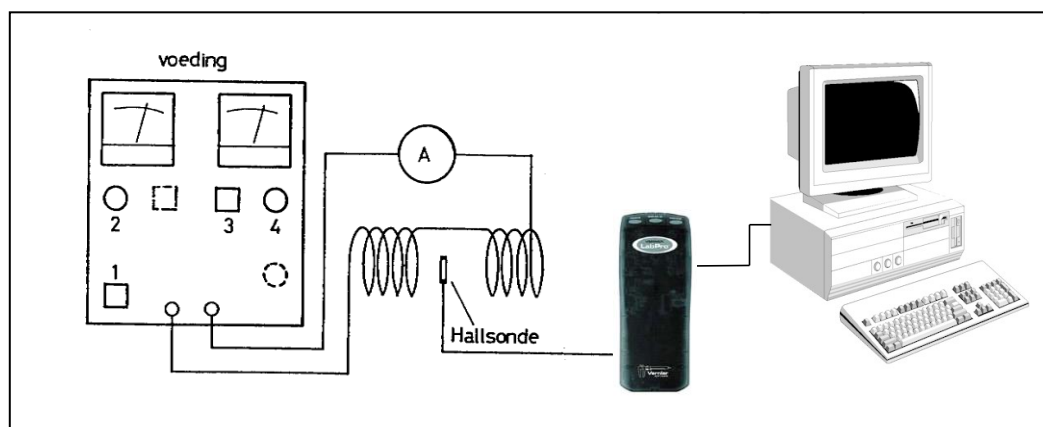
B.2 Gebruikte apparatuur

B.2.1 Meetopstelling

De experimentele meetopstelling (zie figuur 2) bestaat in hoofdzaak uit een **elektromagneet (met variabele luchtspleet)** met Hallsonde, een voeding voor de elektromagneet, een **ampèremeter** en een computer met een Labpro interface.

Figuur 3 toont de elektromagneet. Het magneetveld wordt opgewekt door een stroom die door de spoelen S vloeit. Elke spoel heeft 842 windingen. De magnetische kring wordt gevormd door het juk van de magneet (J), de poolstukken P en de luchtspleet (met lengte gelijk aan L). Door de afstand tussen de poolstukken via schroefregeling R te veranderen kan men de reluctantie van de kring beïnvloeden.

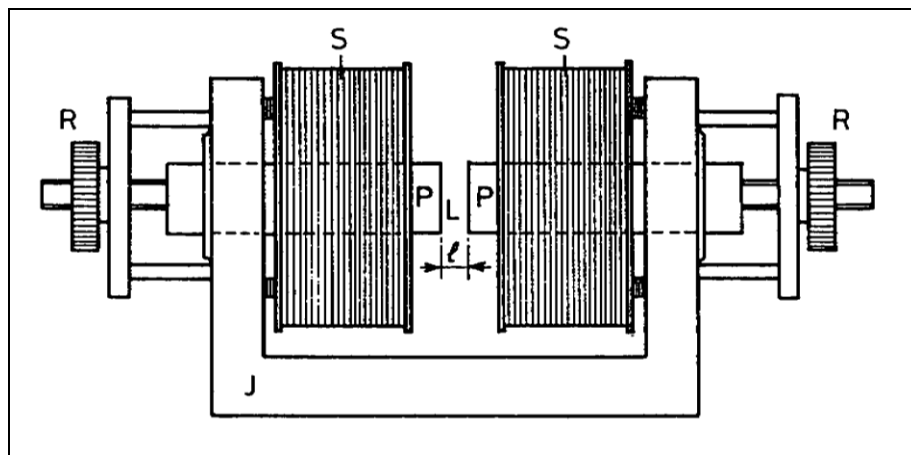
De voeding voor de elektromagneet is begrensd op 3 A. Met regelknop 4 op ~ 17 V ingesteld en toetsen 1 (netschakelaar) en 3 ingedrukt kan de gewenste stroom door middel van knop 2 ingesteld worden. De ampèremeter A laat een nauwkeuriger stroomaflezing toe dan de meter op de voeding zelf.



Figuur 2 : Experimentele meetopstelling.

De Hallsonde bestaat uit een klein stukje monokristallijn GaAs halfgeleiderkristal en kan de magnetische inductie in de luchtspleet meten. Aan de uitgang van de sonde ontstaat een spanning die evenredig is met het magneetveld. Deze spanning wordt met behulp van een Labpro interface door de computer gemeten en verwerkt (**via calibraties**) zodat men de waarde van het magneetveld bekomt.

De Hallsonde is vast op een verticaal en horizontaal verstelbaar statief gemonteerd. Het statief draagt ook een staafje dat gebruikt wordt om de lengte van de luchtspleet te meten. Het uiteinde heeft 2 mm als diameter, de rest van de staaf 5 mm. De minimale spleetgrootte die je zult gebruiken is 5 mm. Gebruikt de schaalverdeling onder het statief om de luchtspleten te meten. Houdt rekening met de diameter van het staafje.



Figuur 3: Elektromagneet.

Opmerkingen:

1. Er is enige speling tussen de poolstukken en de schroef waarmee ze verschoven worden. Dit heeft tot gevolg dat bij hoge fluxdichtheden (grote stroom en geen te grote luchtspleet) de poolstukken zich een fractie van een millimeter naar elkaar toe kunnen bewegen. Om te vermijden dat de Hallsonde tussen de poolstukken geplet raakt werd het te ver sluiten van de polen onmogelijk gemaakt. Zorg er ook voor dat je traag het magneetveld verhoogt naar hoge waarden (stroom naar 3A) en de **poolstukken in het oog houdt**.
2. Zorg er voor dat de **tip van de Hallsonde nergens tegenaan stoot**. Ze is erg broos.
3. Bij een hoge fluxdichtheid is het zeer moeilijk tot onmogelijk om de poolafstand te veranderen. **Verlaag dan de stroom door de windingen** in plaats van de schroefdraad te forceren.
4. Om de metingen zo onafhankelijk mogelijk te houden van de spreiding van de fluxbundel in de luchtspleet wordt **steeds gemeten met in het midden van één van de poolstukken**. Zo dicht mogelijk bij het oppervlak van het poolstuk: gebruik minimaal 2 tot 3 mm ruimte tussen de hallsonde en het poolstuk.
5. Door elke reeks metingen bij **$I = 0$ A te beginnen** en dan de **stroom op te voeren** wordt de invloed van hysteresis op de resultaten verminderd.

B.2.2 Uitvoeren van meting

Het opmeten van de **$B(I)$ -curves** uit **opgave 1** gebeurt als volgt:

De spanning van de Hallsonde wordt opgemeten door de computer (en vervolgens omgerekend naar een magneetveld) terwijl de stroom dient afgelezen te worden op de ampèremeter A en manueel ingetikt te worden in de computer.

- Start het programma **"Magneet(stroom)"** op de computer.
- Je kan de meting starten met **"Experiment"** \Rightarrow **"Start collection"** of de groene start-

knop :



- Linksboven zie je de waarden van het door de computer gemeten magneetveld. Stel een bepaalde stroomwaarde in (begin met nul) op de voeding van de magneet. Druk dan bovenaan op **"Experiment"** \Rightarrow **"Keep"** of op de blauwe keep-knop :



- Vul dan de waarde van de stroom (afgelezen op de ampèremeter) in (in A). Deze waarde verschijnt dan in de tabel (**"stroom"**) samen met het gemeten magneetveld.

- Je verhoogt de stroom en drukt terug op **“Keep”** om de stroomwaarde in te geven. Herhaal dit tot een stroom van 3 A. Je kan de meting beëindigen met **“Experiment”** \Rightarrow **“Stop collection”** of de rode stop-knop :



- Op het scherm zie je een grafiek van het magneetveld i.f.v. de stroom. Dit magneetveld wordt door de computer berekend met behulp van twee gemeten spanningen (“Potential1” en “Potential2”) die je ook in de datakolommen terugvindt.

Voordat je een nieuwe meting begint, zet je de data in een bestand met **“File”** \Rightarrow **“Export As”** \Rightarrow **“Text”**. Zet het bestand onder **“Mijn documenten”** en geef een naam op zonder extensie. Verzeker je er zelf van dat je begrijpt hoe de data is opgeslagen, en vergeet deze bestanden niet van de PC af te halen voor de deze afsluit!

Voor het opmeten van de **B(afstand)-curves** uit **opgave 4** gaat men op dezelfde manier tewerk behalve dat men de B-waardes opmeet in functie van de afstand tot aan het centrum C van de meetruimte (zie figuur 4). Gebruik hiervoor het programma **“Magneet(afstand)”**.

Aflezen en fouten:

- De stroom dient afgelezen te worden op een analoge ampèremeter. Het bereik geeft de waarde van de stroom aan bij maximale uitwijking. Gebruik dan een van de schaalverdelingen voor DC stroom. De fout is de helft van de kleinste schaalverdeling ($= \Delta$).
- Fout op het magneetveld: $3\% + 1 \text{ LSD } (= \Delta)$.

C.1 Opgaven ter voorbereiding van de proef

1. Door de draad van een wijde dunne toroïde (met een ijzeren kern) met 400 windingen per meter loopt een stroom van 20 A. Als de relatieve permeabiliteit van ijzer 3000 bedraagt, wat is dan de sterkte van B, het totale veld in de toroïde?
2. Neem een solenoïde die een ijzeren kern heeft, 30 cm lang is, in doorsnede een diameter van 1.8 cm heeft en uit 500 windingen bestaat. Als er door de draad een stroom van 48 A gaat, heeft het magnetische veld in de solenoïde een sterkte van 2.2 T. Hoeveel bedraagt de permeabiliteit μ bij dit sterke magneetveld?

C.2 Opgaven

1. Meet de magnetische inductie B in de luchtspleet in functie van de stroom I voor een tiental stroomwaarden gaande van nul (voeding uitgeschakeld) tot 3A. Doe dit voor een vijftal waarden van L (minimum 5 mm tot maximum 40 mm). Denk hierbij aan de opmerkingen over de spreiding van de fluxbundel en de invloed van de hysteresis.
2. De opgemeten B(I)-curves uit opgave 1. kunnen geanalyseerd worden met behulp van vergelijking (5) indien de benadering van constante doorsnede A geldt en het remanent veld toegevoegd wordt. Voor rechte lijnstukken uit de B(I)-curves geldt dat $B = aI + b$ met a de constante helling en b het remanent veld (dus het veld bij $I = 0$). Uit vergelijking (5) volgt:

$$a = \frac{N}{\alpha + L\left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_p}\right)} \quad (6)$$

Vermits in het algemeen voor ferromagnetische materialen α en μ_p afhankelijk zijn van B, betekent dit dat in het lineaire gebied van de B(I)-curves ofwel $L/\mu_0 \gg (\alpha - L/\mu_p)$ ofwel α en μ_p maar zwak afhankelijk zijn van B (ofwel beiden).

In het eerste geval krijgt men dan dat $a = N\mu_0/L$ en kan men μ_0 uit de helling van het lineaire deel van de $B(I)$ -curves opmeten.

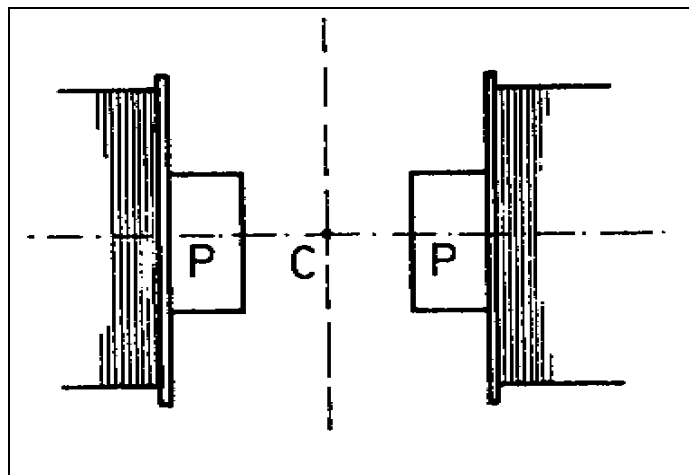
Neem aan dat aan deze eerste veronderstelling voldaan is en bepaal μ_0 uit de opgemeten $B(I)$ -curves.

3. Bepaal de waarde van μ_0 zonder de veronderstelling uit opgave 2. te gebruiken als volgt: Vermits de term L/μ_p steeds verwaarloosbaar is ten opzichte van $L\mu_0$ kan vergelijking (6) geschreven worden als:

$$\frac{N}{a} = \alpha + \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_p}\right)L \cong \alpha + \frac{1}{\mu_0}L \quad (7)$$

Dit is opnieuw de vergelijking van een rechte met $1/\mu_0$ als helling. μ_0 kan dus berekend worden uit de helling van de grafiek van N/a in functie van L .

4. Meet, de horizontale en verticale variatie van de magnetische inductie in de luchtspleet ten opzichte van het centrum C van de meetruimte (zie figuur 4) voor luchtspleten van 15 mm en 40 mm bij een stroom van 2 A (varieer het aantal parameters zoals L voor zover de tijd het toelaat). Welke variatie is het grootste en is dit te verwachten? Schat voor beide gevallen het volume waarbinnen de inductie met niet meer dan 2 % verschilt van de centrumwaarde. Waarvoor zou dit nuttig kunnen zijn (merk op dat de opstelling van de elektromagneten gelijk is op een Helmholtzconstructie zoals beschreven in de practicumtekst van e over m).



Figuur 4: Centrum C van de luchtspleet van de elektromagneet.

C.3 Enkele vragen

1. Is het remanent veld afhankelijk van de lengte van de luchtspleet?
2. Waaraan kunnen eventuele afwijkingen van de permeabiliteit t.o.v. de literatuur-waarde te wijten zijn?