

Hoofdstuk 4

Magnetisme

Doelstellingen

1. Weten welke magnetische grootheden bestaan en de verbanden ertussen kennen
2. Weten dat er verschillende soorten magnetisme bestaan
3. Weten wat inductie is
4. Weten wat wervelstromen zijn
5. Basisprincipe van de werking van elektrische generatoren en motoren begrijpen
6. Weten wat een spoel is en de vervangingsspoel kunnen berekenen

4.1 Inleiding

Magnetisme is een eigenschap die bepaalde stoffen bezitten om andere lichamen aan te trekken en die duidelijk verschillend zijn van cohesie-, adhesie-, elektrostatische en gravitatiekrachten.

We hebben duidelijk weer te maken met een krachtwerking zoals in het geval van elektrische ladingen. In het geval van ladingen hadden we te maken met een elektrisch veld, nu hebben we te maken met een magnetisch veld. In het geval van gelijknamige polen stoten deze mekaar af en verschillende polen trekken mekaar aan, zoals het geval was met elektrische ladingen. Wat daarentegen duidelijk verschilt met de elektrische lading is dat men twee verschillende elektrische ladingen steeds duidelijk kan aanwijzen en deze dus afzonderlijk kan terugvinden, maar in het geval van magnetische polen zal men steeds beide tesamen terugvinden en dus bestaan afzonderlijke polen niet. Men heeft steeds een zuidpool en een noordpool.

4.2 Krachtwerking

In het geval van magnetische polen hebben we te maken met een krachtwerking en weermom heeft men deze krachtwerking in een formule gegoten. Deze formule is, niet verwonderlijk, sterk gelijkend op deze van de elektrische krachtwerking.

$$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu r^2}$$

m_i : magnetische poolsterkte
 μ : magnetische permeabiliteit
 r : onderlinge afstand

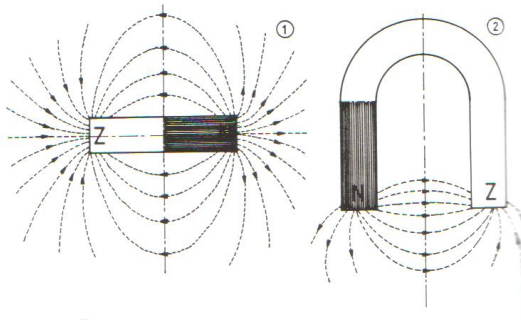
De magnetische permeabiliteit is gelijk aan het produkt van de permeabiliteit van het vacuum μ_0 en de relatieve permeabiliteit μ_r . De relatieve permeabiliteit is een stofconstante en hangt dus af van het gekozen materiaal, de permeabiliteit van het vacuum is een constante gelijk aan $4\pi 10^{-7}$ H/m.

De éénheid van poolsterkte is de Weber (Wb).

De Weber is de sterkte van een magneetpool, die in het vacuum, op een andere magneetpool, geplaatst op één meter afstand, een kracht uitoefent van $10^7/16\pi^2$ newton.

4.2.1 Magnetisch veld

We hebben reeds gezien dat er een krachtveld bestaat tussen magnetische polen. Dus moet in de nabijheid van een pool een krachtenveld heersen. Dit veld noemt men het magnetisch veld. Dit veld kan aanschouwelijk gemaakt worden door zogenaamde veldlijnen welke steeds van noord naar zuid lopen.



Figuur 4.1: magnetische veldlijnen

4.2.2 Magnetische veldsterkte

De kracht die een magneetpool in een magnetisch veld ondervindt is niet overal even groot en hangt dus af van de plaats.

De magnetische veldsterkte in een punt van een magnetisch veld is de kracht uitgeoefend op een elementaire magnetische pool geplaatst in dat punt.

Indien we het magnetisch veld van één enkele magneetpool, met sterkte m , beschouwen wordt de veldsterkte voorgesteld volgens

$$H = \frac{m}{4\pi\mu r^2}$$

H wordt weergegeven door A/m en is een vectoriele grootheid.

4.2.3 Magnetische inductie

De magnetische inductie is het verschijnsel van het magnetiseren van magnetische materialen onder invloed van externe magnetische velden.

Deze inductie wordt voorgesteld door $B = \mu H$ met als éénheid Tesla (T) of weber per vierkante meter (Wb/m^2).

4.2.4 Magnetische flux

We beschouwen een oppervlak loodrecht op de veldlijnen van een uniform magnetisch veld met veldsterkte M . De magnetische flux is het aantal veldlijnen doorheen dat oppervlak. $\Phi = B.A$ met als éénheid de weber.

4.2.5 Elektromagnetisme

Iedere stroom wekt een magnetisch veld op en zoals we later zullen zien zal een veranderend magnetisch veld een spanning opwekken. Deze verschijnselen vallen onder de studie van het elektromagnetisme. Dit wil zeggen dat als een stroom een magnetisch veld opwekt er ook een verband moet zijn tussen beide. Dit verband wordt weergegeven door $F_m = w.I$. F_m is de magnetomotorische kracht en w is het aantal windingen van de spoel waar de stroom doorloopt. De veldsterkte H die uit deze magnetomotorische kracht voortvloeit wordt voorgesteld door $H = \frac{dF_m}{dl}$.

Magnetische weerstand

Tussen oorzaak (F_m) van het magnetisch veld en gevolg (krachtlijnen of een flux) bestaat er steeds een verband. Dit verband is de magnetische weerstand of reluktantie R_m en wordt weergegeven door de wet van Hopkinson.

$$R_m = \frac{F_m}{\Phi}$$

Vorm van de veldlijnen rond een stroomvoerende geleider

De magnetische veldlijnen rond een rechte stroomvoerende geleider zijn concentrische cirkels. De draairichting op de cirkel wordt gegeven door de geleider in de rechterhand te nemen en de duim in de richting van de stroom te houden. De vingers die de geleider vasthouden geven de draairichting aan van het veld.



Figuur 4.2: veldlijnen

4.2.6 Magnetisch gedrag

De studie van magnetisch gedrag zou ons te ver leiden in de moderne fysica en is trouwens voorwerp van onderzoek in tal van domeinen in de fysica. Het komt erop neer dat de draai- en tolbeweging (elektronspin) van elektronen rond de kern hiervoor mee verantwoordelijk zijn. Wat voor ons echter wel van belang is, is dat er verschillende soorten magnetisch gedrag bestaan afhankelijk van het materiaal. Op gebied van magnetische materialen onderscheiden we drie types.

- *Diamagnetische materialen*, die zich magnetiseren in tegengestelde zin van het extern veld en waarbij μ_r iets kleiner is dan 1.
- *Paramagnetische materialen*, die zich magnetiseren in dezelfde zin als het extern veld en waarbij μ_r iets groter is dan 1.

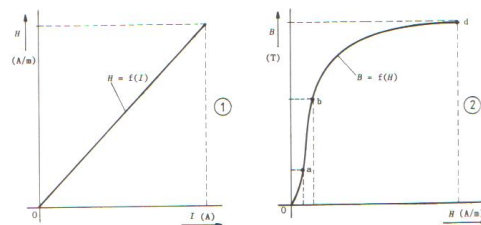
- *Ferromagnetische materialen*, die in dezelfde zin magnetiseren als het extern veld en waarbij μ_r veel groter is dan 1 en waar de magnetisering zich niet lineair gedraagt.

Bovendien vertonen de ferromagnetische materialen zich ook nog eens in verschillende klassen

- *Hardmagnetische materialen*: Deze zijn moeilijk te magnetiseren en te demagnetiseren en worden toegepast voor de vervaardiging van permanente magneten.
- *Zachtmagnetische materialen*: Deze worden relatief gemakkelijk gemagnetiseerd en gedemagnetiseerd en worden toegepast als kernmateriaal in spoelen en elektrische machines.

Magnetisering

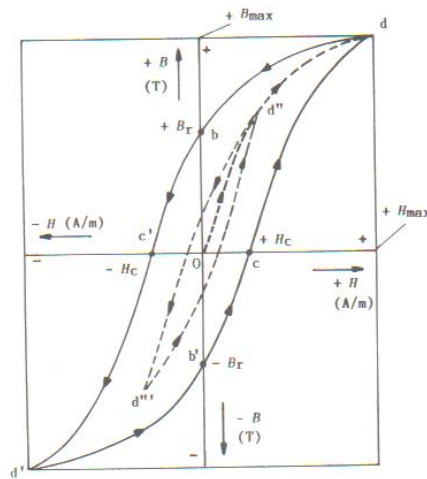
Zoals gezegd zal ferromagnetisch materiaal zich niet lineair gedragen als het gemagnetiseerd wordt. Magnetisatie wordt weergegeven in een magnetisatiecurve die de inductie B weergeeft in functie van het veld H. Deze curve wordt ook wel eens de BH karakteristiek genoemd.



Figuur 4.3: magnetiseringskarakteristiek voor (links) para-en diamagnetisch materiaal en (rechts) ferromagnetisch materiaal

Als we de veldsterkte vermeerderen en verminderen als we de magnetiseringskarakteristiek voor ferromagnetisch materiaal opnemen en we drijven het materiaal steeds sterk in verzadiging krijgen we onderstaande grafiek. Deze grafiek is duidelijk gesloten en noemt men ook de hysteresislus.

We drijven het materiaal tot in punt d en we keren terug door de stroomzin om te keren, dan zien we dat de curve niet terugkeert volgens de oorspronkelijke curve maar een hogere inductie bezit voor eenzelfde veld. Blijven we de stroom in dezelfde zin vergroten tot in punt d' en keren de stroom daarna terug om zien we dat hetzelfde verschijnsel zich voordoet maar in tegengestelde zin. Er ontstaat dus een gesloten kromme, die men hysteresislus noemt. De oppervlakte is evenredig met wat men het hysteresisverlies noemt. Dit is het verlies te wijten aan opwarming van het materiaal als het een volledige magnetisering en demagnetisering doorloopt in de twee mogelijke stroomzinnen in een geleider.



Figuur 4.4: hysteresislus

Wat opvalt is dat er een inductie blijft bestaan als het veld gelijk is aan nul. Dit noemt men remanente inductie. Deze inductie is belangrijk bij het opstarten van elektrische machines.

Analoog blijft er een veld bestaan als de inductie gelijk is aan nul. Dit noemt men het coërcitief veld.

4.3 Elektromagnetische inductie

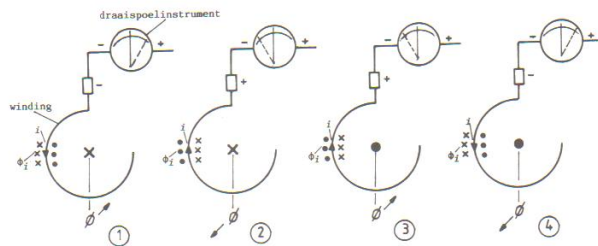
Zoals reeds gezegd zal een verandering van magnetisch veld een spanning opwekken. Deze spanning noemt men inductiespanning. Dit verschijnsel werd ontdekt door Faraday in 1831.

4.3.1 Inductieverschijnsel

We nemen één winding en we brengen een magneet naar de winding toe. De fluxverandering door het naderen van de de magneet zal een inductiespanning in de winding teweeg brengen. **Deze inductiespanning zal zo gericht zijn dat de fluxverandering teniet gedaan wordt, met andere woorden de flux in de winding zal zijn oorspronkelijke waarde proberen te behouden.**

Tweede kurketrekkerregel van Maxwell: *De schroef van een kurketrekker wordt gericht in de zin van de flux, wanneer de flux stijgt, schroeft men de kurketrekker uit, wanneer de flux daalt, schroeft men de kurketrekker in. De bewegingszin van het handvat levert de zin van de opgewekte inductie-emk.*

OPGELET: DE WINDING REAGEERT ALS BRON .



Figuur 4.5: inductiespanning

De grootte van die spanning wordt berekend met de wet van Lenz.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

N: aantal windingen
 $d\Phi$: verandering van magnetisch veld
 dt: verandering van tijd

4.3.2 Zelfinductieverschijnsel

Een stroom doorheen een spoel, geheel vrij van magnetische interactie, zal zelf een veld, dus flux, opwekken als de stroom doorheen die spoel verandert. Hier zal men moeten rekening houden met de toestand van de spoel. Deze zal mee in rekening moeten worden gebracht bij het berekenen van de zelfinductiespanning.

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

Dus nu is niet een verandering van veld maar een verandering van stroom oorzaak van inductiespanning.

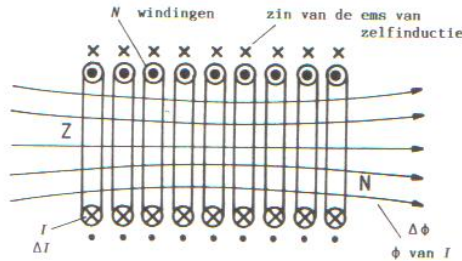
De zelfinductiecoefficient wordt als volgt berekend

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -N \frac{d(SB)}{dt} \\ &= -N \frac{d(S\mu H)}{dt} \\ &= -N \frac{d(S\mu NI/l)}{dt} \\ &= (-N^2 S\mu/l) \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

Dus de zelfinductiecoefficient wordt voorgesteld door

$$L = \frac{N^2 S\mu}{l}$$

- N: aantal windingen
 μ : magnetische permeabiliteit
 S: oppervlakte van de doorsnede van de spoel
 l: lengte van de spoel



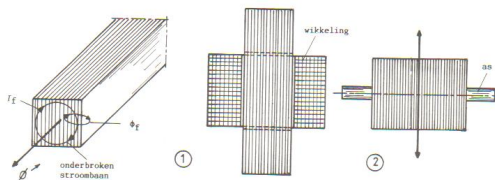
Figuur 4.6: zelfinductie in een winding

4.4 Wervelstromen

Wervelstromen zijn stromen die ontstaan in geleidende materialen waarin magnetische fluxveranderingen optreden.

Deze stromen zullen zoals bij het hysteresisverschijnsel het materiaal opwarmen en dienen ze zoveel mogelijk vermeden te worden. Dit probleem stelt zich expliciet in de bouw van transformatoren die daarom gelamelleerd worden.

Het verschijnsel werkt als volgt, men heeft een gesloten keten vermits men in vol materiaal werkt. Als men een wisselend veld opwekt zullen er zich inductiespanningen voordoen. Vermits men in vol materiaal een gesloten keten kan creëren zullen deze spanningen stromen opwekken die dit materiaal opwarmen en dus ongewenst zijn.



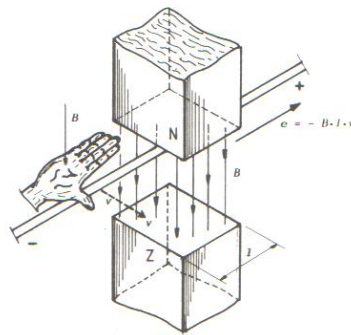
Figuur 4.7: wervelstromen

4.5 Enkele toepassingen van magnetisme

4.5.1 Elektrische generator

Als we een geleider in een magnetisch veld bewegen of we veranderen een magnetisch veld rond een geleider, er wordt steeds een inductiespanning opgewekt. Stel nu dat men een draad legt op een rotor en deze draait rond in het magnetisch veld dan zal door het veranderend magnetisch veld in deze draad een inductiespanning opgewekt worden. **Dit is nu het basisprincipe van een elektrische generator.** De zin van de spanning bekomt men met behulp van de *rechterhandregel*, de grootte door een kleine berekening. We doen de berekening voor één winding in een constant veld. We bewegen de winding loodrecht op het veld.

$$E = -\frac{d(BS)}{dt} = -\frac{d(Blx)}{dt} = -Bl\frac{dx}{dt} = -Blv$$



Figuur 4.8: rechterhandregel

palm	veldlijnen (B)
duim	snelheid (v)
vingers	geïnduceerd EMK (E)

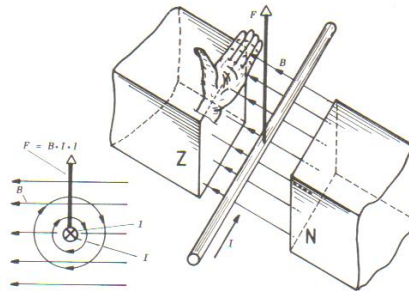
Opgelet: de drie componenten moeten loodrecht op elkaar staan.

4.5.2 Elektrische motor

Als een geleider stroom voert, zal er ten gevolge van deze stroom een magnetisch veld opgewekt worden. Als we dus een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld aanbrengen zal er ook een krachtwerking optreden. Stel nu dat men een stroomvoerende geleider op een rotor aanbrengt en deze rotor in een magnetisch veld plaatst dan zal ten gevolge van deze krachtwerking de rotor draaien. **Dit is de basiswerking van een elektrische motor.**

Deze kracht noemt men de Lorentzkracht en de grootte ervan is $F = Bli$. De zin ervan wordt gegeven door de *linkerhandregel*.

Ook in dit geval moeten enkel de loodrechte componenten in rekening gebracht worden.



Figuur 4.9: linkerhandregel

palm	veldlijnen (B)
vingers	stroom (i)
duim	kracht(F)

4.6 Schakelen van spoelen

4.6.1 Serieschakeling

Als we elementen serie schakelen in een elektrisch circuit blijft de stroom doorheen de elementen gelijk en de spanningen worden over de elementen verdeeld.

$$U = L \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt}$$

Dus

$$L \frac{di}{dt} = (L_1 + L_2)$$

Hieruit volgt dat $L = L_1 + L_2$ of meer algemeen

$$L_s = \sum_{k=1}^n L_k$$

4.6.2 Parallelschakeling

In het geval dat we n spoelen parallel schakelen wordt de stroom verdeeld en de spanning over elke component is dezelfde.

$$U = L \frac{di}{dt}$$

$$\begin{aligned}U_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} \\U_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} &= \frac{di}{dt} \\ \frac{U_1}{L_1} + \frac{U_2}{L_2} &= \frac{U}{L}\end{aligned}$$

Vermits $U = U_1 = U_2$ geldt dat

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Meer algemeen wordt dit

$$\frac{1}{L_p} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k}$$