

Elektriciteit voor Dummies

De wonderere wereld
van de elektriciteit volgens Jacobs
Deel 2 Magnetisme

INHOUD

17. Magnetisme	3
17.1. Natuurlijke en kunstmatige magneten.....	3
17.2. Soorten magneten.....	3
17.3. Enkele begrippen.....	4
17.4. Krachtwerking van een magneet.....	4
17.5. Magnetisch veld	5
17.6. Veldsterkte	6
17.7. Oefeningen	7
17.8. Veldlijnen of krachtlijnen	7
17.9. Magnetische flux	8
17.10. Magnetische inductie.....	8
17.11. Magnetische fluxdichtheid.....	8
17.12. Magnetiseerbare en niet-magnetiseerbare materialen.....	9
17.13. Oefeningen	9
17.14. Wat is magnetisme?	10
17.15. Aardmagnetisme.....	11
18. Elektromagnetisme	13
18.1. Magnetisch veld rond een lange rechte geleider:.....	13
18.2. Magnetisch veld in een stroomvoerende winding	14
18.3. Stroomvoerende spoel.....	14
18.4. Spoel met kern in ijzer	15
18.5. Formules gebruikt voor magnetische ketens.....	16
18.6. Magnetisatiekromme	17
18.8. Hysteresisverliezen.....	19
18.9 Oefeningen	20
19. Dynamisch elektromagnetisme	21
19.1. Stroomvoerende geleider in een magnetisch veld	21
19.2. Kracht tussen twee stroomvoerende geleiders	22
19.3 Toepassingen gebaseerd op Lorentz-kracht:.....	23
20 Elektromagnetische spanningsopwekking	24
20.1. Opgewekte spanning in een geleider	24
20.2. Een bewegende stroomvoerende geleider in een magnetisch veld.....	25
20.3. Opwekken van spanning	25
20.4. De opgewekte spanning	26
20.5. Gelijkspanning	28
20.6. Verhogen van de opgewekte spanning:	28

17. Magnetisme

Magnetisme is de eigenschap van sommige materialen of voorwerpen om andere materialen aan te trekken. De voorwerpen waarmee we de andere materialen aantrekken noemen we *magneten*. We zullen vaststellen dat een magneet een permanent magnetisch veld heeft.

17.1. Natuurlijke en kunstmatige magneten

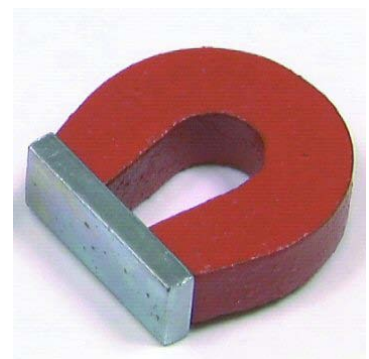
De delfstof ijzererts, het zogenaamde *magnesia*, is van nature magnetisch. Het is een verbinding van ijzer en zuurstof (Fe_3O_4). Het magnetisme is meestal zwak. Als we magneten gebruiken, dan verlangen we echter dat magneten een sterk magnetisch veld bezitten dat zeer lang behouden blijft.

Kunstmatige magneten bezitten deze eigenschappen. Deze magneten bestaan meestal uit gehard staal of speciale legeringen die in een sterk magnetisch veld worden gebracht en hierdoor zelf magnetisch worden. De gebruikte staalsoorten hebben een sterk *remanent (blijvend) magnetisme*. Het magnetisme blijft zeer lang aanwezig, maar verminderd wel zeer langzaam. Het kan eveneens verminderen door hevige *schokken* of zelfs verdwijnen bij sterke *verhitting*.

17.2. Soorten magneten



De meest bekende magneet is de *kompasnaald*. Het is een langwerpig magnetisch plaatje dat draaibaar opgesteld is. Deze *magneetnaald* richt zich volgens het magnetisch veld van de aarde en wordt gebruikt bij *navigatie*.



Andere vormen zijn bijvoorbeeld *hoefijzermagneten* en *staafmagneten*. Naargelang het gewenste gebruik kan de magneet in verschillende vormen gemaakt worden.

17.3. Enkele begrippen

* Polen:

Als een staafmagneet *draaibaar* is opgesteld dan zal steeds dezelfde kant van de magneet zich richten naar het *noorden*. De andere kant wijst dan het *zuiden* aan. Deze uiteinden van de magneet noemt men de *polen*. De kant die het noorden aanwijst noemt men de *Noordpool* (N) van de magneet, de andere kant is de *zuidpool* (Z).

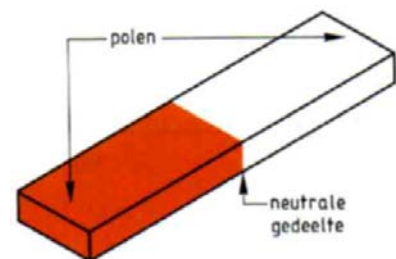
Noot: Soms wordt ook de letter S (=south of sud), gebruikt om verwarring met de 90° gekantelde letter N te voorkomen.

* Magnetische massa:

De polen van de magneet bevinden zich niet op het uiteinde van de magneet maar op ongeveer 1/10 van het einde. Op deze punten is theoretisch het *zwaartepunt* van het magnetisme geconcentreerd. Beide polen zijn *even sterk*, ze bezitten evenveel magnetisme. Dit wordt de *magnetische massa* genoemd, eenheid Wb.

* Poollijn en neutraal vlak:

De verbindingslijn tussen de twee zwaartepunten of polen is de *poolas* of *poollijn*. In het midden tussen de twee polen is het *neutraal vlak* of *neutrale gedeelte*, waar er geen magnetisch aantrekking is. Het neutraal vlak staat loodrecht op de poolas.



* Aantrekking en afstoting:

Magneten kunnen elkaar aantrekken of afstoten.

De delen die elkaar aantrekken zijn steeds een Noordpool en een zuidpool.

Twee Noordpolen of twee zuidpolen zullen elkaar afstoten.

Hieruit volgt:

Ongelijknamige polen trekken elkaar aan, gelijknamige polen stoten elkaar af.

17.4. Krachtwerking van een magneet

Hiervoor stelden we vast dat twee magneetpolen elkaar aantrekken. Sterke magneten met een grote magnetische massa oefenen veel kracht uit op de magnetiseerbare materialen in hun omgeving.

De krachtwerking vermindert naarmate we de magneet verder verwijderen van de materialen.

De kracht wordt uitgedrukt in de *formule van Coulomb*:

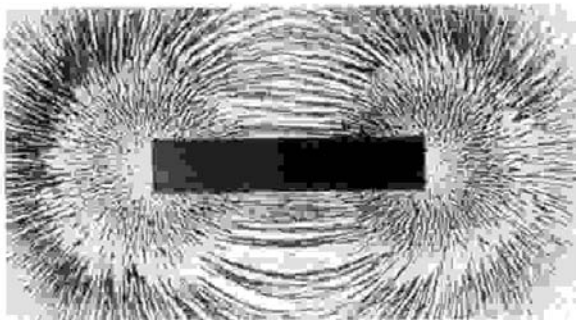
$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r^2}$$

waarin:	F :	de kracht in Newton;
	m_1 en m_2 :	de magnetische massa's in Wb of Vs;
	r :	de afstand tussen de beide polen in m;
	μ :	de absolute permeabiliteit in H/m
	waarbij:	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
	en μ_0	de absolute permeabiliteit van het luchtledige in H/m ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m of Vs/Am)
	en μ_r	de relatieve permeabiliteit van de middenstof (onbenoemd)

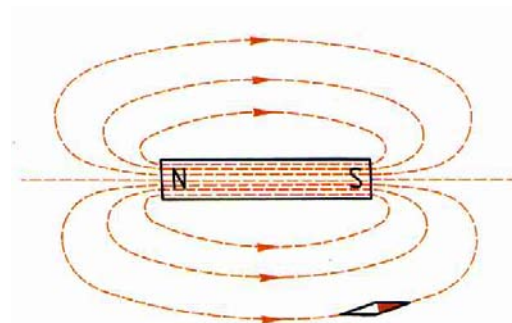
Noot: permeabiliteit is de doorlaatbaarheid voor magnetische velden, vergelijkbaar met conductantie of geleidbaarheid in elektriciteit. Onthoud de waarde van μ_0 goed, deze is veel gebruikt in formules! De waarde van μ_r is 1 voor het luchtledige en lucht.

17.5. Magnetisch veld

Rond de magneet kan de magnetische werking aangetoond worden. In deze ruimte rond de magneet is het *magnetisch veld* aanwezig. Aan de hand van een magneet en ijzervijzel kan het *spectrum* van de magneet zichtbaar gemaakt worden.



Magnetisch spectrum



Voorstelling van het magnetisch veld

Volgens de Formule van Coulomb neemt de krachtwerking van het veld af volgens het *kwadraat* van de afstand. Hierdoor kunnen we stellen dat de magnetische werking zich slechts in de onmiddellijke nabijheid van de magneet merkbaar zal laten voelen, zodra de afstand vergroot zal de invloed verwaarloosbaar worden.

17.6. Veldsterkte

Hiermee wordt de kracht of grootte van de magnetische werking bedoeld.

In een bepaald punt in een magnetisch veld is de *veldsterkte* de *magnetische werking* die in dat punt wordt uitgeoefend op de *eenheidsnoordpool* met massa 1 Wb.

$$H = \frac{m \cdot 1}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot r^2}$$

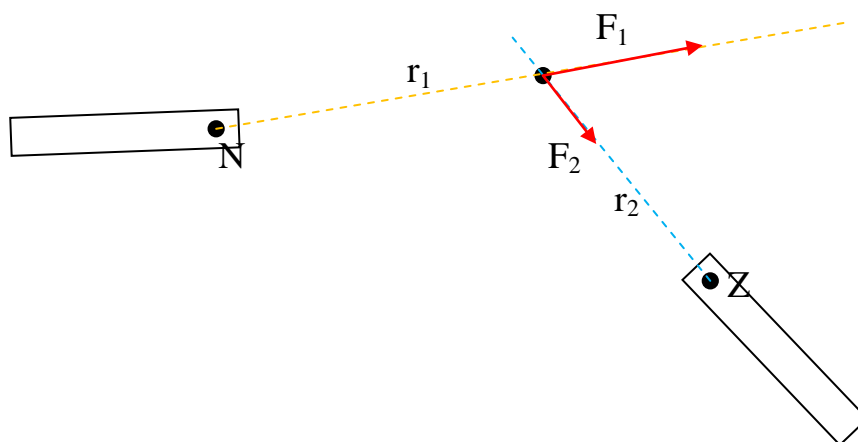
uitgedrukt in N/Wb of A/m

Hieruit volgt dat de kracht F uitgeoefend op een magnetische massa m in een magnetisch veld met veldsterkte H berekend wordt als:

$$F = H \cdot m$$

Als er in een punt de invloed van *meerdere magneten* wordt vastgesteld, dan moet er rekening gehouden worden met elke magneet.

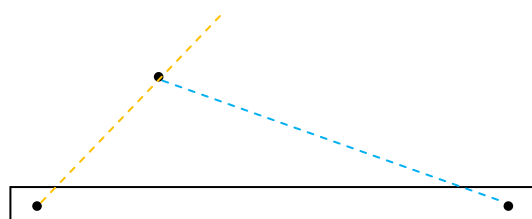
De veldsterkte in dat punt wordt dan berekend met de *vectoriële som* van de veldsterkten van elke magneetpool in dat punt.



Voorbeeld: veldsterkte van een staafmagneet

Een magneetnaald zal zich richten volgens de richting van de *resulterende veldsterkte* van de noord- en zuidpool. In dat punt moet dus de richting en grootte van de veldsterkte van elke pool worden samengesteld.

(vul zelf de figuur aan)



17.7. Oefeningen

1. Een magnetische Noordpool met een poolsterkte van $25\mu\text{Wb}$ bevindt zich op een afstand van 8cm van een Zuidpool met poolsterkte $75\mu\text{Wb}$ in de lucht. Is er tussen de polen een aantrekkingskracht of een afstotingskracht? Bereken de kracht tussen beide polen.
2. Een magneetpool veroorzaakt in een punt in de lucht een veldsterkte van 1800A/m . De magneetpool heeft een magnetische massa van $100\mu\text{Wb}$. Hoe ver is het punt verwijderd van de pool?
3. Twee magneetpolen in het luchtledige met elk een magnetische massa van $120\mu\text{Wb}$ ondervinden van elkaar een kracht van $15 \cdot 10^{-3}\text{N}$. Op welke afstand staan de polen van elkaar?
4. Een staafmagneet heeft een poolafstand van 15cm en een poolsterkte van $130\mu\text{Wb}$. Hoe groot is de krachtwerking op de eenheidsnoordpool die zich op 12cm van de Zuidpool en 9cm van de Noordpool bevindt?

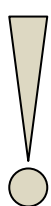
17.8. Veldlijnen of krachtlijnen

Als we met een magneetnaald rond een staafmagneet gaan, zal de naald zich richten volgens de resulterende veldsterkte (zie vorige paragraaf).

Door deze naaldstanden in lijnen uit te zetten krijgen we een idee van het veld rond de magneet. Deze lijnen die de *veldlijnen* voorstellen noemen we het *magnetisch spectrum*. Met deze lijnen geven we een symbolische voorstelling van dit spectrum. (zie ook par. 17.5.)

De veldlijnen *treden buiten* aan de Noordpool en *treden terug binnen* aan de zuidpool. Op deze manier geven we de *richting* aan van de veldlijnen.

De veldlijnen vertonen volgende eigenschappen:

- 
- veldlijnen vormen een *gesloten lijn* van de Noordpool naar de zuidpool
 - veldlijnen kruisen elkaar *nooit*
 - veldlijnen kiezen de weg van de *minste magnetische weerstand*
 - veldlijnen treden *loodrecht* in of uit de polen van de magneet
 - als we veel veldlijnen *naast elkaar* voorstellen is de veldsterkte groot

17.9. Magnetische flux

De magnetische flux is het *totaal aantal veldlijnen* dat van een Noordpool naar een Zuidpool loopt. De grootheid “flux” wordt aangegeven met het symbool Φ .

17.10. Magnetische inductie

Als we *magnetiseerbaar materiaal* in de omgeving van een magneet brengen dan wordt dat materiaal op zijn beurt magnetisch.

- * De oorzaak is: de magnetische veldsterkte H (= het aantal veldlijnen).
- * Het gevolg is: het magnetiseerbaar materiaal wordt zelf magnetisch, wat we voorstellen door de magnetische inductie B (het magnetisme wordt in het materiaal gebracht = geïnduceerd).

Dit kunnen we uitdrukken in een formule:

$$B = H \cdot \mu$$

Waarin: B de inductie, in Wb/m^2 (vroeger $T = \text{Tesla}$)
 H de veldsterkte, in A/m
 en μ de absolute permeabiliteit ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, zie hiervoor)

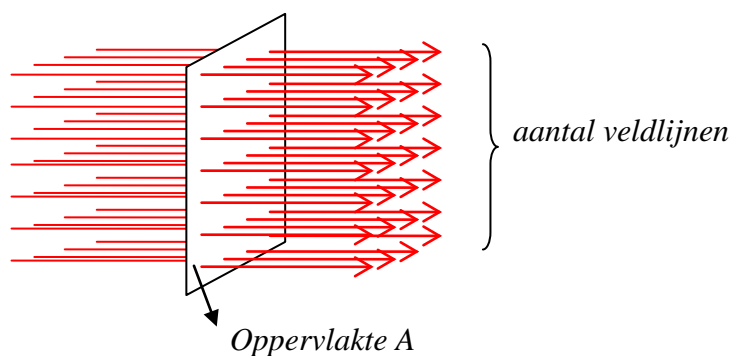
17.11. Magnetische fluxdichtheid

Magnetische fluxdichtheid mag als synoniem gebruikt worden voor magnetische inductie.

Als de fluxdichtheid gekend is dan kunnen we de flux (aantal veldlijnen) bepalen die door een bepaalde oppervlakte gaat:

$$\Phi = B \cdot A = \mu \cdot H \cdot A$$

Φ is de flux, het totaal aantal veldlijnen, dat door de oppervlakte A gaat.



17.12. *Magnetiseerbare en niet-magnetiseerbare materialen*

Materialen kan je indelen volgens de waarde van de permeabiliteit.

- Zogenaamde magnetische materialen zijn meestal ferromagnetische materialen. Deze materialen (ijzer, staal, nikkel en kobalt) worden zelf door magneten aangetrokken of zijn zelf magneten.

Eigenlijk is het duidelijker om te spreken van *magnetiseerbare materialen*. Ze worden slechts magnetisch als ze in de invloed van een magnetisch veld zijn geweest!

De waarde van de relatieve permeabiliteit μ_r is *veel groter* dan 1, ze geleiden de veldlijnen *veel beter* dan het luchtledige of lucht.

- Niet-magnetische materialen zijn niet magnetiseerbaar. De waarde van μ_r is ongeveer 1.

We kunnen ze indelen in twee groepen: *paramagnetische* stoffen en *diamagnetische* stoffen. Bij *paramagnetische* stoffen is de relatieve permeabiliteit iets groter dan 1, bij de *diamagnetische* stoffen is de relatieve permeabiliteit iets kleiner dan 1.

17.13. *Oefeningen*

1. Een staafmagneet heeft een poolafstand van 20cm en een poolsterkte van $90\mu\text{Wb}$. Hoe groot is de magnetische inductie op 12cm van de Zuidpool en 16cm van de Noordpool?
2. In een metalen staaf heerst een fluxdichtheid van $1,5\text{Wb/m}^2$ als deze geplaatst wordt in een magnetisch veld met een veldsterkte van 900A/m . Bereken de relatieve permeabiliteit van het materiaal.
3. Een houten wand met hoogte 2,4m en breedte 3,6m staat dwars op de magnetische veldlijnen van de aarde. Bereken de grootte van de flux door die wand als de veldsterkte van de aarde 35A/m is.

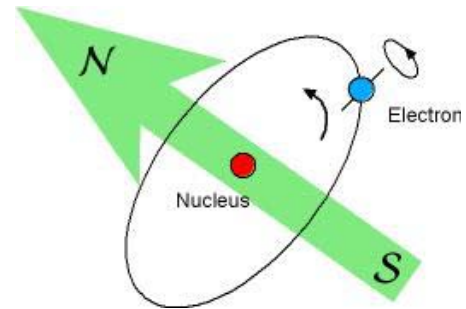
17.14. Wat is magnetisme?

De mens probeert zich natuurverschijnselen voor te stellen, om de werking, oorzaken of gevolgen beter te begrijpen. Voor magnetisme heeft men ook voorstellingen waarvan we hier één beschrijven.

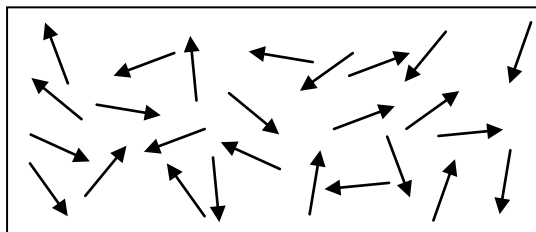
Een atoom bezit een kern met er rond elektronen, draaiend op hun banen. Dit zijn bewegende ladingen. Deze bewegende ladingen zijn de oorzaak van het magnetisme (zie ook verder bij elektromagnetisme).

Nemen we aan dat elk draaiend elektron een klein magneetje vormt. De poolas hiervan is de as waarrond het elektron draait. Het geheel van een hoeveelheid stof zal dan bestaan uit een groot aantal willekeurig gerichte magneetjes.

Zo een willekeurig gericht magneetje noemen we een magneecule.

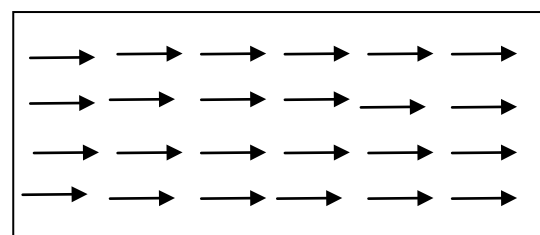


Bij niet-gemagnetiseerde materialen zijn deze magneeculen allemaal willekeurig gericht. Al deze kleine magneetveldjes heffen elkaar op, zodat geen uitwendig magnetisme merkbaar is.



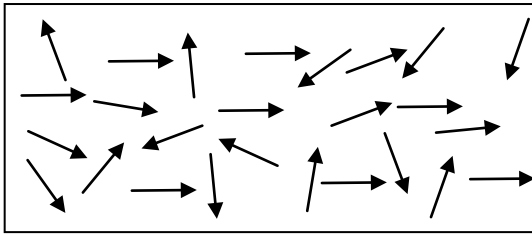
niet-gemagnetiseerd materiaal

Wordt het materiaal gemagnetiseerd, dan richten alle magneeculen zich zodat een resulterend veld ontstaat.



gemagnetiseerd materiaal

Bij het wegnemen van de magnetiserende kracht, zullen een deel van de magneeculen terugkeren naar hun oorspronkelijke willekeurige stand. Een deel van de magneeculen blijft echter staan en zorgt voor een beetje blijvend magnetisme. Dit noemen we *remanent magnetisme* of *remanentie*.



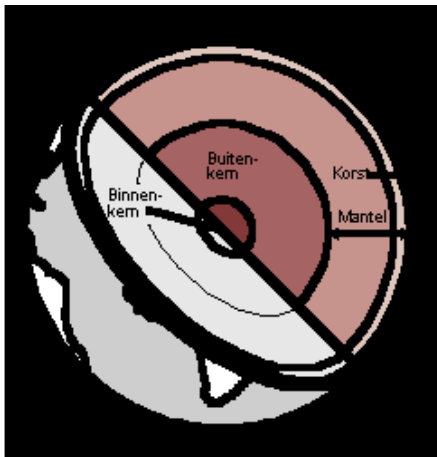
Een aantal magneculen blijft in 1 bepaalde richting staan en zorgt voor een (zwak) resulterend veld.

Zacht ijzer (bv. gietijzer) heeft zeer weinig remanentie, hard ijzer (staal) heeft veel remanentie. Kunstmatige magneten zijn gemaakt uit gehard ijzer of speciale legeringen en bezitten een zeer sterke remanentie. Deze remanentie blijft lang behouden in deze zogenaamde permanente magneten.

Door schokken, verwarmen of een tegengesteld gericht magnetisch veld kan de remanentie verdwijnen. Dit is *demagnetiseren*.

Noot: Praktisch wordt het demagnetiseren gedaan door het voorwerp bloot te stellen aan een zeer sterk steeds wisselend magnetisch veld. Dit wisselveld wordt langzaam verminderd (of het voorwerp wordt langzaam uit de nabijheid van het veld gehaald). Uiteindelijk zal het magnetisch veld van het voorwerp hierdoor volledig verdwijnen. De methodes met schokken of verwarmen kunnen het voorwerp beschadigen, daarom kiest men voor de methode met het wisselend veld.

17.15. Aardmagnetisme



Het aardmagnetisme ontstaat in de vloeibare kern van de aarde. Rond deze kern bevindt zich de koudere aardmantel. Door het temperatuurverschil ontstaan er magma stromingen in de vloeibare kern. Door inductie ontstaan er elektrische stromen die op hun beurt leiden tot het magnetisme dat we waarnemen aan de oppervlakte van de aarde.

Over een tijdspanne van enkele honderden jaren merken we dat het magnetisch veld van de aarde zich langzaam verdraait. Dit heeft zowel uitwendige als inwendige oorzaken.

We nemen aan dat het aardmagnetisme gemiddeld een veldsterkte van 35A/m heeft.

Met een kompasnaald kunnen we de polen aanwijzen. De *magnetische Zuidpool* ligt in het *geografisch noorden*, terwijl de *magnetische Noordpool* in het *zuiden* ligt. Plaatselijk kan de aangegeven richting afwijken door de bodemgesteldheid. In België zal de kompasnaald momenteel de geografische Noordpool aanwijzen.

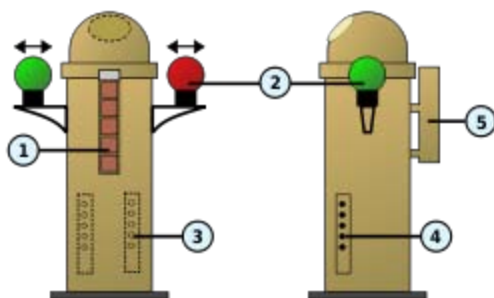


Modern scheepskompas.

De aanwezigheid van ijzer en elektrische stroom zal het zwakke magnetisch veld van de aarde beïnvloeden. Een kompasnaald in een auto is dus louter versiering.

Op schepen heeft men ook dat probleem. Het kompas wordt zo ver mogelijk van de ijzeren constructie geplaatst, meestal buiten op een uitstekend deel van het schip naast de brug.

Door het plaatsen van kleine hulpmagneten kan men de verstoring van het magnetisch veld door het metaal van het schip compenseren.



1. Houten houder;
2. weekijzers dwarsscheepse D-correctoren;
3. langsscheepse P-magneten;
4. dwarsscheepse Q-magneten;
5. flindersstaaf

Standaardkompas met compensatiemiddelen

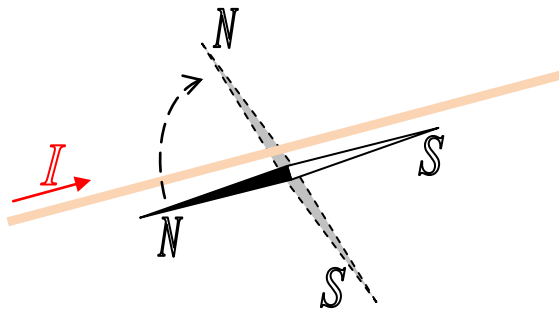
Noot: GPS en gyroscopen geven tegenwoordig op elektronische wijze informatie om schepen te navigeren. Het kompas is dan eerder een controlemiddel om de elektronica desgevallend bij te sturen of dient in geval van defect van de elektronica.

18. Elektromagnetisme

In dit hoofdstuk bespreken we de magnetische effecten van de elektrische stroom.

18.1. Magnetisch veld rond een lange rechte geleider:

Een lange rechte stroomvoerende geleider zal een invloed uitoefenen op een magneetnaald die in de onmiddellijke omgeving is geplaatst.

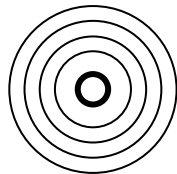


De stroom door de geleider zal ervoor zorgen dat de naald zich verdraait. Keren we de stroomzin om, dan verdraait de naald in de andere richting.

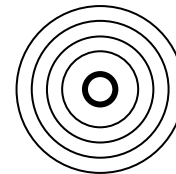
Rond de stroomvoerende geleider ontstaat een magnetisch veld met een bepaalde zin, afhankelijk van de stroomrichting.

Het magnetisch veld bestaat uit veldlijnen die concentrisch rond de stroomvoerende geleider lopen. In een plat vlak wordt de stroomrichting aangegeven met een kruisje (stroom in het blad) of met een bolletje (stroom uit het blad).

Stroomrichting uit het blad gericht (°)



Stroomrichting in het blad gericht



De zin van het veld kan bepaald worden met de *rechterhandregel*: we nemen de geleider vast met de rechterhand met gestrekte duim. De stroom loopt in de richting van de duim. De richting van de veldlijnen is dan volgens de gekromde vingers.

Ook met de *kurkentrekkerregel* kunnen we werken. We schroeven de kurkentrekker in de richting van de stroomzin en de draaiing geeft de richting van de veldlijnen aan.

De veldsterkte in een punt op een bepaalde afstand van de geleider wordt gegeven door:

$$H_a = \frac{I}{2 \pi r}$$

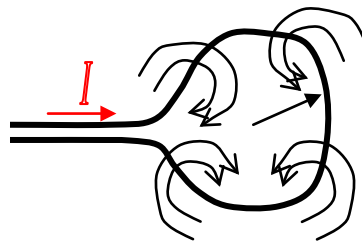
In de formule is H_a de veldsterkte in punt a in A/m, I de stroom in Ampère en r de afstand tot de geleider.

° Vul de tekening aan.
V 10.10.23

18.2. Magnetisch veld in een stroomvoerende winding

Dit is een rechte geleider die in een lus is geplooid.

Als we in elk deeltje van de geleider het magnetisch veld bepalen, kunnen we het volledig veld construeren.

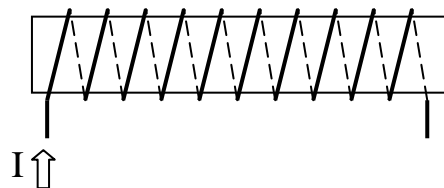


We stellen vast dat met de gegeven stroomrichting de veldlijnen intreden in het midden van de winding. We kunnen de zin van het veld bepalen met de rechterhandregel of de kurkentrekkerregel.

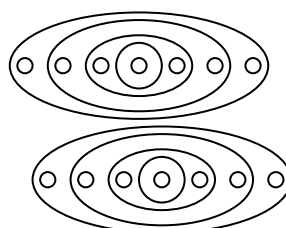
We verdraaien de kurkentrekker volgens de richting van de stroom in de lus, de voortbeweging van de kurkentrekker geeft de richting van het veld aan.

18.3. Stroomvoerende spoel

Een spoel bestaat uit meerdere windingen die op een cilindervormige houder zijn aangebracht. De houder is hier niet magnetiseerbaar ($\mu_r = 1$) en bijvoorbeeld gemaakt uit steatiet, een kunstmatig soort porcelein.



Elke winding op zich wekt een magnetisch veld op. Alle windingen vormen samen één groot magnetisch veld.



(vul de figuur aan met de stroomrichting volgens de figuur hierboven en geef ook de veldrichting aan)

De zin van het magnetisch veld wordt bepaald met de regel van de rechterhand. We nemen de spoel vast met gestrekte duim, waarbij de stroom in de richting van de vingertoppen vloeit. De richting van het veld is dan volgens de gestrekte duim.

De grootte van de veldsterkte in het punt in het midden van de spoel wordt gegeven door:

$$H_a = \frac{N.I}{\sqrt{d^2 + l^2}}$$

met H_a de veldsterkte in punt a in A/m,
 N het aantal windingen,
 I de stroomsterkte,
 d de diameter van de spoel in m,
 l de lengte van de spoel in m.

Indien de spoel zeer kort in verhouding tot de diameter is (vanaf een verhouding van bv.10:1) kan de formule benaderend worden:

$$H_a = \frac{N.I}{d}$$

In het geval dat het om een lange dunne spoel gaat wordt de formule:

$$H_a = \frac{N.I}{l}$$

18.4. Spoel met kern in ijzer

De stroomvoerende spoel wordt nu rond een kern in ijzer gewikkeld. Het ijzer wordt geïnduceerd door de aanwezige veldsterkte in de spoel volgens de formule

$$B = \mu \cdot H. \text{ (in Wb/m}^2\text{)}$$

Er ontstaat een kern die gemagnetiseerd wordt door de stroomvoerende spoel. Deze kern vormt samen met de stroomvoerende spoel een krachtige *elektromagneet*.

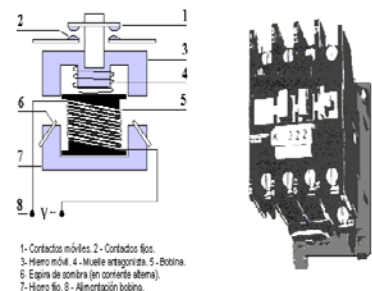
Meestal zal de kern van de elektromagneet niet bestaan uit één enkele staaf maar uit meerdere delen die samen een *gesloten magnetische keten* vormen.

Een transformator heeft zo een gesloten magnetische keten. Een *open magnetische keten* vinden we terug bij elektromagnetische schakelaars, waar de *aantrekkingskracht* tussen de gemagnetiseerde delen gebruikt wordt om de contacten van de schakelaar te sluiten.



Transformator

Elektromagnetische schakelaar of relais



18.5. Formules gebruikt voor magnetische ketens

Veldsterkte:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (\text{eenheid: A/m}) \quad \text{de magnetische veldsterkte in de as van de spoel.} \quad (\text{form.1})$$

Inductie:

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{eenheid: Wb/m}^2) \quad \text{de inductie in de ijzeren kern} \quad (\text{form.2})$$

Flux:

$$\Phi = B \cdot A \quad (\text{eenheid: Wb}) \quad \text{de totale flux in de kerndoorsnede} \quad (\text{form.3})$$

Formules 1 & 2 samenstellen in formule 3:

$$\Phi = \mu \cdot H \cdot A = \mu \cdot \left(\frac{N \cdot I}{l} \right) \cdot A = \frac{N \cdot I}{\frac{l}{\mu \cdot A}}$$

Herwerkt:

$$\boxed{\Phi = \frac{N \cdot I}{\mathcal{R}_m}}$$

Dit noemt men de *wet van Hopkinson*.

We stellen een grote overeenkomst vast met de wet van Ohm!

- ⇒ Het product $N \cdot I$ is de magnetomotorische spanning of magnetomotantie,
- ⇒ \mathcal{R}_m is de reluctantie of magnetische weerstand van de magnetische keten, met $\mathcal{R}_m = l / \mu \cdot A$ (dit zijn allemaal constructieafhankelijke parameters)

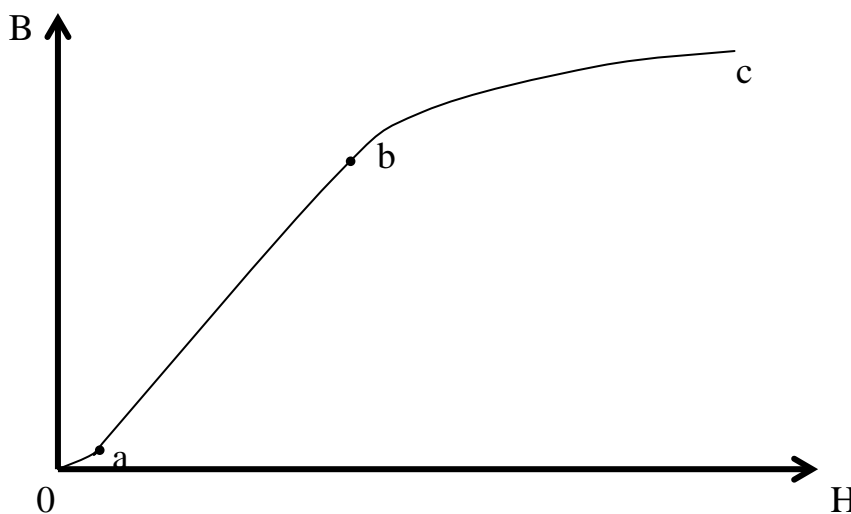
Uit de wet kunnen we afleiden dat het product van de stroomsterkte met het aantal windingen van de spoel (A_w) de grootte van de veldsterkte bepaalt. Het vereiste aantal “ampèrewindingen” van een spoel kan dus met
 A) een grote stroomsterkte en weinig windingen van de spoel of met
 B) een lage stroomsterkte maar met veel windingen bereikt worden.

18.6. Magnetisatiekromme

Deze kromme geeft het verband weer tussen de veldsterkte H in A/m (oorzaak) en de inductie B in Wb/m² (gevolg) in een materiaal. $B = \mu \cdot H$

Voor een luchtspoel zal de inductie rechtevenredig stijgen met de toenemende veldsterkte. Wiskundig is dit een rechte door de oorsprong.

Als er magnetiseerbaar materiaal in de spoel wordt geplaatst, zal dit materiaal de inductie beïnvloeden. In het begin zal de inductie gemakkelijk en ongeveer evenredig stijgen (lijnstuk a-b). Bij steeds maar grotere veldsterkte neemt het aantal veldlijnen toe en zal het materiaal stilaan verzadigen. Bij verzadiging zal de resulterende inductie zal niet meer evenredig stijgen. (lijnstuk b – c)



Verklaring:

- In het stukje 0-a van de kromme veroorzaakt de veldsterkte het richten van de magneculen.
- In het deel tussen de punten a en b neemt de magnetisatie ongeveer lineair toe. Dit is het *werkgebied* van het magnetisch materiaal.
- Vanaf het punt b wordt het materiaal meer en meer verzadigd waardoor de grafiek steeds minder zal stijgen. In het punt c van de grafiek is er dan volledige *verzadiging* van het materiaal.

Noot: In bepaalde toepassingen kan deze verzadiging gebruikt worden, de extra veldsterkte (stroomsterkte) neemt toe terwijl het resultaat (de inductie) niet veel toeneemt.

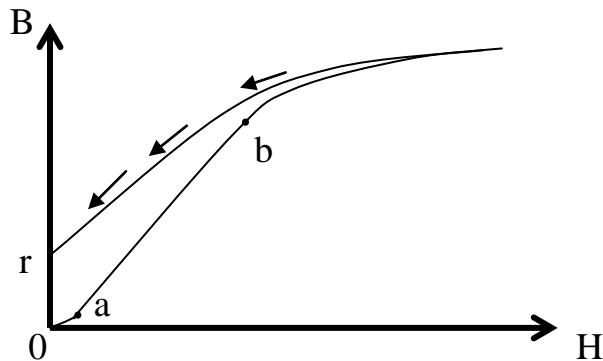
In andere toepassingen wenst men dit effect niet en zal de veldsterkte beperkt moeten worden tot aan het begin van de verzadiging (punt b).

Uit de grafiek kunnen we de waarde van de permeabiliteit in dat punt van de grafiek afleiden. De permeabiliteit is gegeven door de formule $\mu = B / H$

Omdat de grafiek niet evenredig verloopt, zal μ een veranderende waarde hebben. Bijgevolg is μ_r ook afhankelijk van de momentele veldsterkte die aangelegd wordt. Dit is een gevolg van de formule $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.

18.7. Hysteresislus

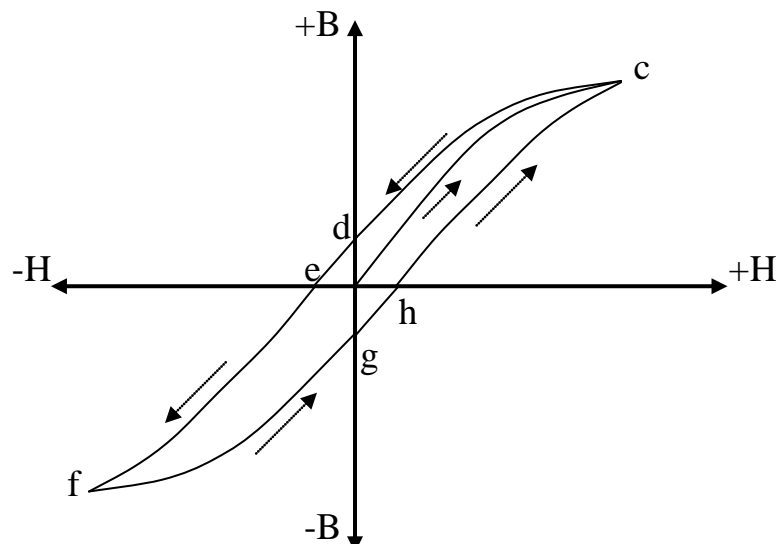
Hiervoor zagen we al dat het materiaal tot in verzadiging kon geïnduceerd worden. Nemen we de oorzaak van de inductie, de veldsterkte, weg, dan zal het materiaal nog een deel blijvend magnetisme vertonen. De grootte van dit blijvend magnetisme is afhankelijk van het materiaal. Geharde staalsoorten (en legeringen) zullen sterk gemagnetiseerd blijven. Zacht ijzer zal slechts een kleine nawerking vertonen. Dit achterblijvend magnetisme noemen we de *remanentie* of het *remanent magnetisch veld* (dit is de inductie 0-r op de B-as).



Om het remanent magnetisch veld te verwijderen moeten we een veldsterkte aanleggen die net voldoende groot is om de magneculen terug willekeurig te richten. Deze veldsterkte moet tegengesteld gericht zijn aan de oorspronkelijke magnetisatie. Als de inductie nul is, wordt de veldsterkte terug nul gemaakt. Het resultaat zal zijn dat er geen magnetisme meer aanwezig is in het materiaal.

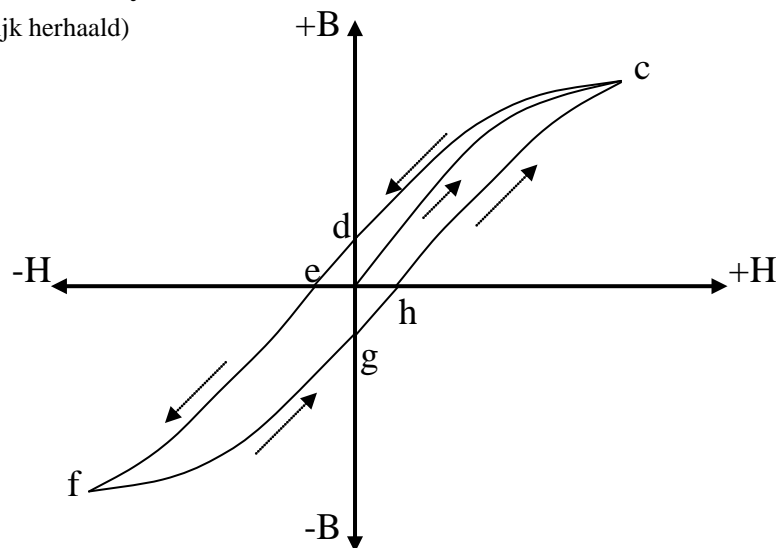
De grootte van de magnetische veldsterkte om de inductie tot nul te herleiden noemt men de *coërcitieve kracht*.

Als we de tegengesteld gerichte veldsterkte verder vergroten, dan wordt het materiaal terug magnetisch. De magnetische polen zijn nu echter omgewisseld. De magnetische karakteristiek loopt nu verder in de andere kwadranten van het assenstelsel. Dit is de *hysteresislus*. *De hysteresislus is de volledige grafiek in alle kwadranten van het assenstelsel.*



Bespreking van de hysteresiskarakteristiek:

(Figuur opzettelijk herhaald)



In de grafiek herkennen we verscheidene delen. Tussen de oorsprong van het assenstelsel en het punt c vinden we de “maagdelijke kromme”. In principe zal bij de eerste magnetisatie de kromme op deze wijze verlopen.

Tijdens het verminderen van de veldsterkte verloopt de curve van punt c naar d. Het resultaat is dat er remanent magnetisme ontstaat (met waarde d).

Tussen het punt d en e wordt de veldsterkte omgekeerd en voldoende groot gemaakt om de inductie op nul te brengen. De grootte van deze veldsterkte noemt men de coërcitieve kracht (met waarde e).

Vanaf het punt e naar f wordt de veldsterkte in omgekeerde zin steeds verhoogd tot er verzadiging optreedt in punt f met andere veldrichting. De magnetische polen zijn nu dus omgekeerd ten opzichte van de richting in het punt c.

Vermindering van H levert weer remanent magnetisme op in het punt g.

Door de veldsterkte weer om te wisselen overwinnen we de coërcitieve kracht.

Hiermee brengen we de inductie terug tot nul in het punt h.

Door de veldsterkte weer verder te vergroten komen we terug in het verzadigingspunt c.

18.8. Hysteresisverliezen

We kunnen het materiaal telkens magnetiseren in de tegenovergestelde richting zoals bij wisselstroom het geval is. De magneculen moeten dan elke keer in de andere richting verdraaien. Deze verdraaiing vraagt energie, afkomstig van de veldsterkte. De toegevoerde energie is nodig om de “wrijving” van de magneculen te overwinnen en zal het materiaal opwarmen. Deze warmte-energie is meestal een ongewenste energie en wordt beschouwd als verlies. Dit is het *hysteresisverlies*. Het hysteresisverlies is afhankelijk van het aantal keer dat de magnetisatie wordt omgekeerd en van de aard van het materiaal. De aard van het materiaal bepaald ook de breedte van de hysteresislus (remanent magnetisme en coërcitieve kracht). We kunnen dus stellen dat het verlies evenredig is met het aantal keer dat de magnetisatie wisselt en de oppervlakte van de hysteresislus.

18.9 Oefeningen

1. In een spoel met 75 windingen die gewikkeld is op een houder die een omtrek heeft van 10cm en 15cm lang is vloeit een stroom van 7A. Hoe groot is de veldsterkte in het midden van de spoel?
2. In een 20cm lange spoel met 1cm diameter met 800windingen wenst men een fluxdichtheid van 1Wb/m^2 op te wekken. Hoe groot moet de stroomsterkte zijn?
3. In een ijzeren kern veroorzaakt een veldsterkte van 400A/m een inductie van $0,25\text{Wb/m}^2$. Hoe groot is de relatieve permeabiliteit?
4. Een spoel is rond een ijzeren ring gewikkeld met een inwendige diameter van 60mm en een uitwendige diameter van 140mm. De dwarsdoorsnede is cirkelvormig. Er zijn 1000 windingen aangebracht, waarin een stroom wordt gestuurd van 1,2A.
Hoe groot is de veldsterkte zonder ferromagnetische kern, de magnetische inductie met kern en de magnetische flux als $\mu_r = 330$?

19. Dynamisch elektromagnetisme

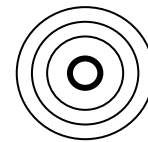
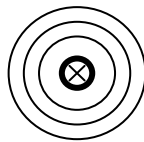
We bekijken de wederzijdse invloeden van magnetische velden op bewegende geleiders en de effecten die er optreden.

19.1. Stroomvoerende geleider in een magnetisch veld

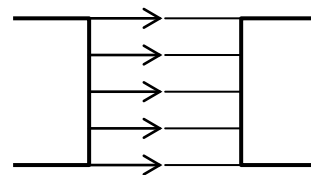
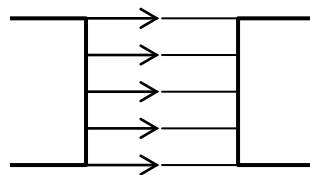
Een stroomvoerende geleider wekt rond zichzelf een magnetisch veld op. Plaatsen we de geleider in een ander magnetisch veld, dan werken deze twee velden op elkaar in. Veldlijnen kunnen elkaar niet kruisen waaruit volgt dat de velden elkaar zullen beïnvloeden. De volgende situaties doen zich voor:

Situatie 1: (vul aan)

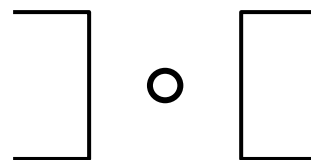
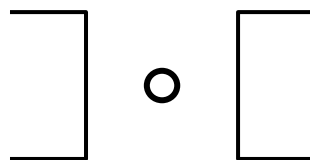
De geleider en zijn magnetisch veld:



Het veld tussen de polen:

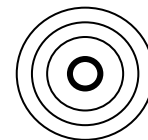
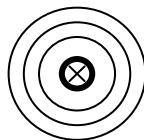


De samenstelling van de twee velden:

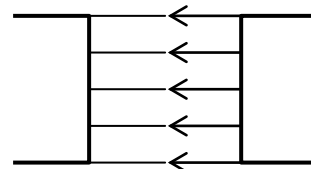
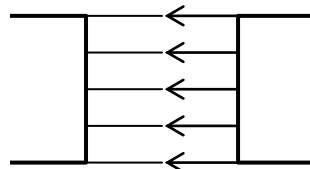


Situatie 2:

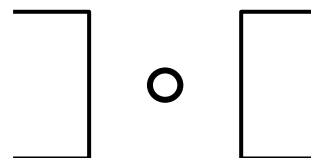
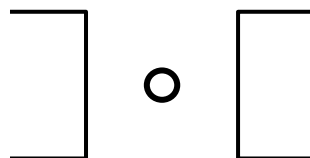
De geleider en zijn magnetisch veld:



Het veld tussen de polen:

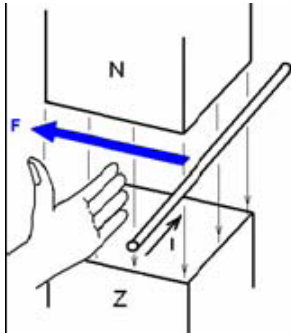


Het samengesteld veld:



Door de afwijking van de veldlijnen zal er een kracht gaan inwerken op de geleider. Deze kracht op de geleider noemen we de Lorentz-kracht.

Richting van de kracht:



De richting van de kracht is afhankelijk van de zin van de stroom én van de zin van de veldlijnen.

De richting van de kracht wordt bepaald met de linkerhandregel. We plaatsen de hand tussen de polen in het magnetisch veld. De palm van de hand is zo gericht dat de veldlijnen hierin intreden. De vingers wijzen de stroomzin aan. De gestrekte duim geeft de zin van de Lorentz-kracht aan.

Grootte van de kracht:

De grootte van de kracht is afhankelijk van:

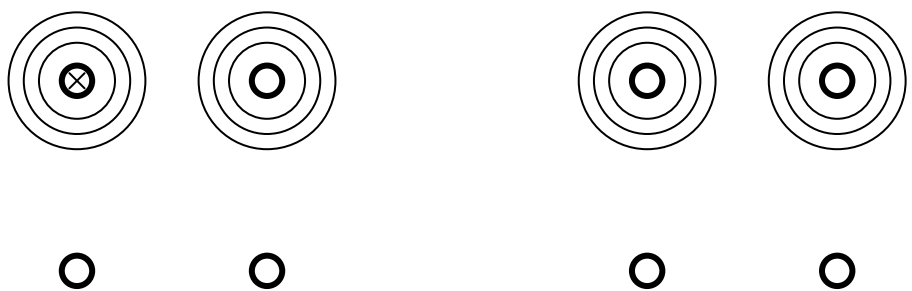
- de lengte l van de geleider in het magnetisch veld,
- de sterkte van de inductie B tussen de polen,
- de stroomsterkte I door de geleider.

$$F = B \cdot I \cdot l$$

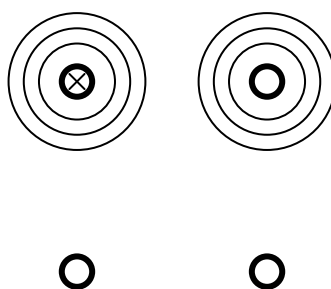
19.2. Kracht tussen twee stroomvoerende geleiders

Een stroomvoerende geleider ontwikkelt een magnetisch veld. Een tweede evenwijdig lopende stroomvoerende geleider met zijn eigen magnetisch veld zal hierdoor ook beïnvloed worden. De twee velden zullen zich naar elkaar richten en naargelang de stroomrichting zal er tussen de twee geleiders een krachtwerking ontstaan.

Evenwijdige geleiders met zelfde stroomrichting



Evenwijdige geleiders met tegengestelde stroomrichting



Zin en grootte van de kracht:

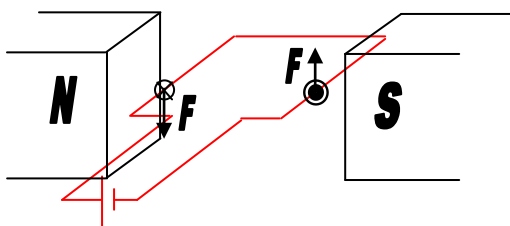
We stellen vast dat gelijkgerichte stromen elkaar aantrekken. Tegengesteld gerichte stromen stoten elkaar af.

De grootte van de kracht in Newton kan berekend worden met de formule:

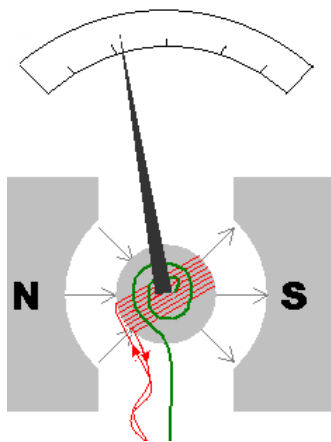
$$F = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

19.3 Toepassingen gebaseerd op Lorentz-kracht:

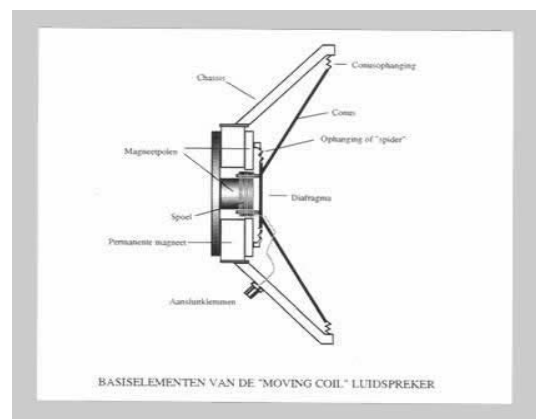
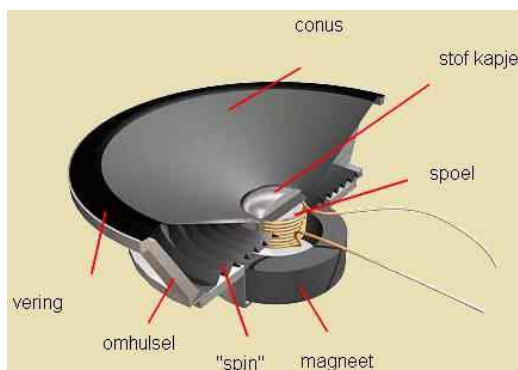
Ankerwikkeling van een elektrische motor



Draaispoelmeetinstrument



Luidspreker



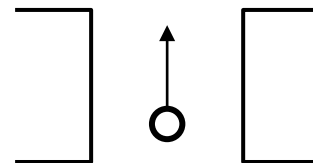
20 Elektromagnetische spanningsopwekking

In dit hoofdstukje bekijken we de gevolgen van geleiders en magnetische velden die bewegen ten opzichte van elkaar.

20.1. Opgewekte spanning in een geleider

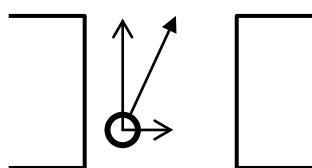
Definitie: Een geleider die zich in een magnetisch veld beweegt wekt spanning op als hij veldlijnen snijdt.

Als de geleider zich loodrecht ten opzichte van de veldlijnen beweegt, dan wordt in de geleider een spanning gegenereerd.



$$E = B \cdot l \cdot v$$

met B : de flux in Wb/m²
 l : de lengte van de geleider in het veld in m
 v : de snelheid loodrecht op de veldlijnen in m/s
 E : de opgewekte elektromotorische spanning (ems)



Als de geleider zich schuin doorheen het veld beweegt, dan wordt er ook enkel rekening gehouden met de snelheidscomponent *loodrecht* op de veldlijnen.

De formule wordt dan:

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$$

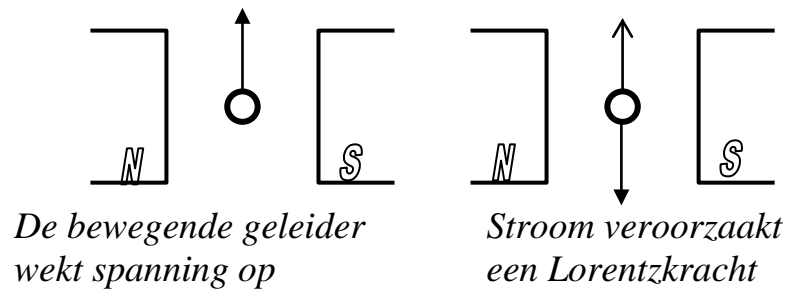
met α : de hoek tussen de veldlijnen en de bewegingsrichting.

De zin van de spanning E kan gevonden worden met de rechterhandregel.

De rechterhand wordt zo gehouden dat de veldlijnen intreden in de palm en de gestrekte duim de bewegingsrichting aangeeft. De vingertoppen geven dan de richting van de ems aan.

20.2. Een bewegende stroomvoerende geleider in een magnetisch veld

Een geleider die veldlijnen snijdt zal spanning genereren.



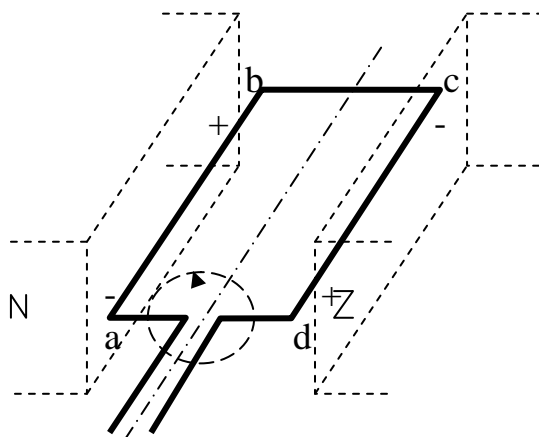
Als de kring, waarvan de geleider deel uitmaakt, gesloten is, vloeit er stroom in de kring. Deze stroom vloeit in dezelfde zin als de opgewekte ems.

We hebben nu een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld. Op de geleider werkt een *Lorentz-kracht* die tegengesteld gericht is t.o.v. de snelheidsrichting.

De Lorentz-kracht werkt dus tegengesteld t.o.v. de aandrijvende kracht. Om de geleider te bewegen moeten we dus de Lorentz-kracht overwinnen.

20.3. Opwekken van spanning

Om spanning op te wekken volstaat het om de geleider (op en neer) te bewegen in een magnetisch veld. Erg praktisch is deze opstelling echter niet, zodat een nieuw ontwerp moet bekeken worden. Dit wordt de draaiende lus.



Tussen twee polen wordt een draad aangebracht in lusvorm. Deze lus is draaibaar rond een as. In de lus zijn enkel die delen van de geleider die *veldlijnen snijden* van belang.

Deze delen zijn: het stuk a-b en het stuk c-d. Met de rechterhandregel bepalen we in elk stuk de zin van de ems.

In de geleider a-b is de spanning *achterwaarts* gericht.

In de geleider c-d is de spanning *naar voor* gericht.

Vooraan op de twee uiteinden van de lus zal de *in-serie-geschakelde* spanning van beide geleiders kunnen afgenomen worden.

$$E = E_{a-b} + E_{c-d} = B \cdot l_{a-b} \cdot v + B \cdot l_{c-d} \cdot v = 2 \cdot B \cdot l \cdot v$$

Omdat de opgewekte spanning klein is, zullen er meerdere lussen (windingen) gecombineerd moeten worden in een wikkeling, zodat $E = N \cdot B \cdot l \cdot v$.

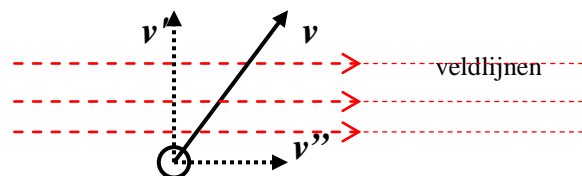
In de formule is N het aantal windingen van de wikkeling.

20.4. De opgewekte spanning

Hiervoor hebben we gezien wat het gevolg is van het schuin snijden van de veldlijnen. De opgewekte ems wordt: $E = N \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$.

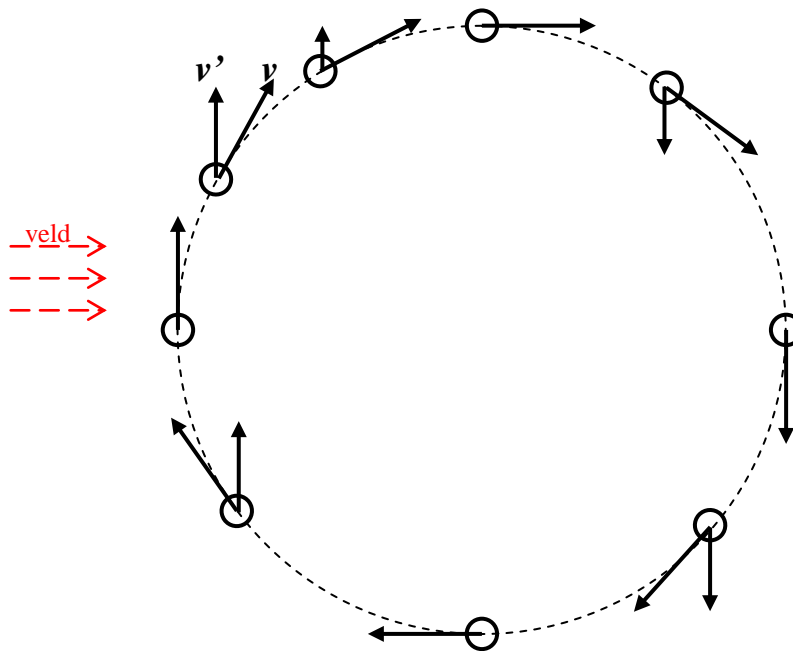
In een draaiende winding zal de snelheidsvector echter voortdurend van richting veranderen. We moeten op elke plaats waar de geleider(s) zich bevindt de snelheid ontbinden in twee componenten.

Enkel de snelheid loodrecht op de veldlijnen zal in aanmerking komen voor het berekenen van de ems. Voor de situatie in één punt kunnen we dit als volgt voorstellen:



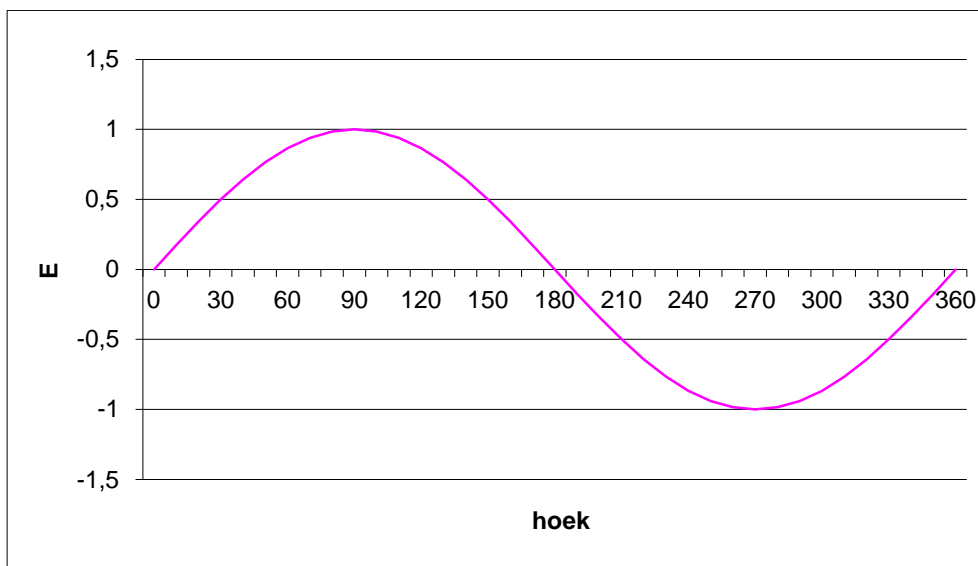
Omdat enkel de vector v' van belang is voor het opwekken van de spanning zullen we enkel deze vector samen met de snelheidsvector v tekenen in de volgende figuur.

Als we dit doen voor meerdere punten op de cirkelomtrek, dan zien we dat v' telkens vergroot en verkleint en zelfs van richting verandert.



Elke snelheidsvector (v) van de geleider wordt ontbonden naar een vector (v') dwars op de veldlijnen. De vector v'' (in de richting van de veldlijnen) is voor de duidelijkheid in de tekening weggelaten.

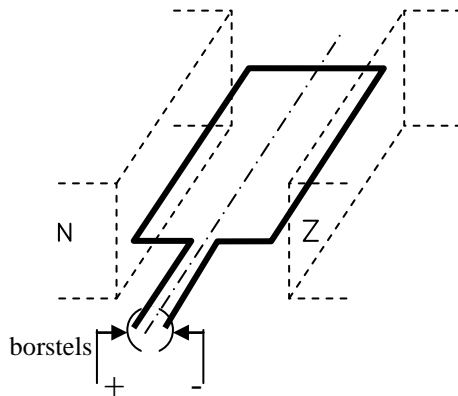
We merken op dat de vector v' steeds in waarde verandert tussen de grootte van v en nul. Ook verandert de richting naargelang de geleider zich bovenaan of onderaan bevindt. Stellen we de vector voor in de tijd dan merken we op dat we een *sinusfunctie* tekenen.



De opgewekte spanning kent een sinusvormig verloop. Sluiten we op deze spanning een verbruiker aan, dan zal er een *wisselstroom* vloeien. We hebben hier het werkingsprincipe van de *wisselspanninggenerator*.

20.5. Gelijkspanning

Wenst men een gelijkspanning of gelijkstroom, dan moet de opgewekte spanning op het juiste ogenblik *omgepoold* worden. Het ompolen gebeurt met een *collector-commutator* waarop de spanning en stroom afgetakt wordt met *borstels*. De opgewekte spanning is een *pulserende gelijkspanning*. Volgens dit principe werkt de *gelijkstroomgenerator* of *dynamo*.



*een (draaiende) winding
tussen twee magneetpolen*

20.6. Verhogen van de opgewekte spanning:

Zoals reeds gezien levert 1 winding een kleine spanning. In een generator moet een voldoende hoge spanning opgewekt worden. Dit kan door:

**meer windingen in de wikkeling:*

De spanning die opgewekt wordt in één winding is klein. Door meerdere windingen te voorzien kan de spanning N-maal worden verhoogd.

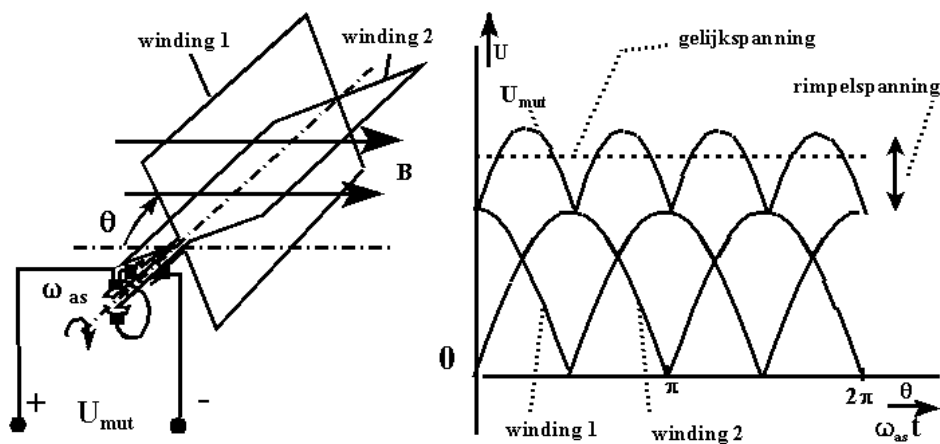
**kleinere luchtspleet en radiaal veld:*

Het magnetisch veld moet een grote afstand afleggen door lucht. Hiervoor is een grotere veldsterkte nodig dan wanneer de veldlijnen door magnetiseerbaar materiaal moeten. De polen worden daarom *radiaal uitgesneden* en de winding wordt op een trommel (*rotor*) van magnetiseerbaar materiaal geplaatst. Tussen het stilstaande en draaiende deel is er nu slechts een *kleine luchtspleet*. Hierin heerst er een radiaal *homogeen* magnetisch veld dat vanaf de poolspitsen een constante grootte heeft. Volgens de formule $E=B.l.v$ zal er dan een gelijkvormige spanning ontstaan. Enkel in het gedeelte waar de geleiders zich tussen de poolspitsen bevinden zal er kortstondig geen spanning opgewekt worden.

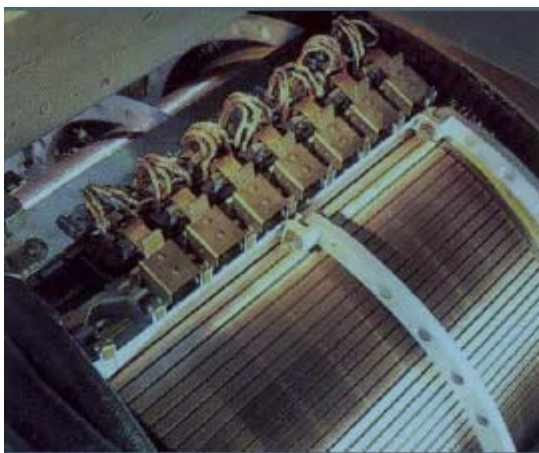
**meer wikkelingen op de rotor:*

Door extra wikkelingen op de rotor aan te brengen ontstaat een beter gebruik van het beschikbare volume. De wikkelingen worden aangesloten aan de collector-commutator en in serie verbonden tot een ankerwikkeling. Er zijn evenveel collectorlamellen als er verbindingen voor de wikkelingen zijn.

De afgetakte spanning wordt gevormd uit bijvoorbeeld twee wikkelingen die onderling 90° verdraaid zijn. Op de figuur zie je de resulterende spanning.



Wanneer er twee wikkelingen op de rotor worden aangebracht, zal de *rimpelspanning* verminderen zoals uit de figuur kan worden afgeleid. De spanning van de twee wikkelingen wordt samengeteld en de rimpelspanning wordt zo kleiner. Door het aanbrengen van meerdere wikkelingen over de omtrek van het anker zal de resulterende spanning groter worden en de rimpelspanning kleiner. Het aantal wikkelingen is echter beperkt door de praktische opbouw (plaats van de wikkelingen) van de rotor. Ook het aantal collectorlamellen waarop de wikkelingen worden aangesloten, kan niet zeer groot worden vanwege de nodige isolatieafstand onderling.



De collector van een gelijkstroommachine en de borstels die de verbinding met de collector maken.

De studie van elektrische machines is leerstof voor het vijfde en zesde leerjaar.

Na deze spoedcursus magnetisme zullen jullie je verder kunnen verdiepen in eenvoudige en samengestelde elektrische kringen die aangesloten worden op wisselspanning.