

Opmerking:

Alle informatie op deze pagina's is beschikbaar als Flash-animatie op het volgende adres:
<http://www.bbemg.be/nl/startpagina-emv/elektriciteit-velden/elektromagnetisme.html>

Inleiding

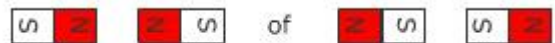
Het elektromagnetisme bestudeert de interacties op afstand van de ladingen, de stromen en de elektrische en magnetische velden. In 1873 verenigde James Clerk Maxwell de vier fundamentele vergelijkingen waarmee alle interacties kunnen worden beschreven.

Voordat we verder gaan met het elektromagnetisme, geven we u een klein raadseltje:

Twee magneten met tegengestelde polen trekken elkaar aan.



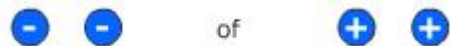
Twee magneten met dezelfde polen stoten elkaar af.



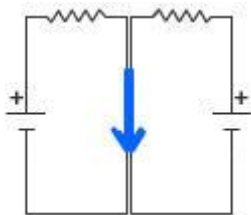
Twee tegengestelde ladingen trekken elkaar aan.



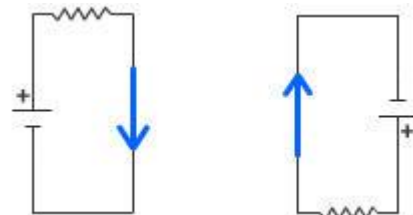
Twee zelfde ladingen stoten elkaar af.



Twee geleiders waar een stroom doorloopt in dezelfde richting trekken elkaar aan.



Twee geleiders waar een stroom doorloopt in tegengestelde richting stoten elkaar af.



Vreemd ... magisch ...

Helemaal niet! Dat is het elektromagnetisme en we zullen alles eens rustig bekijken!

De interacties verbonden aan het elektrisch veld

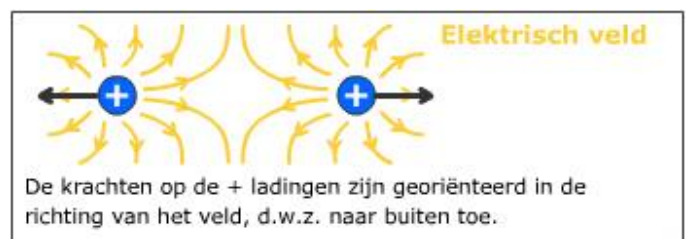
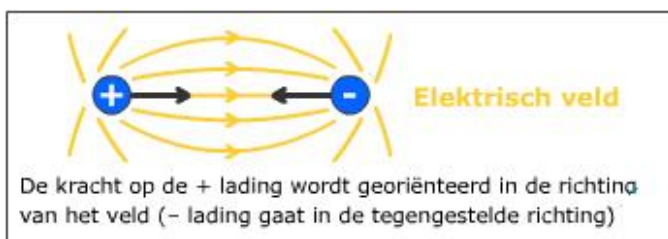
Zoals we al zagen in "Het concept veld" genereren de ladingen een elektrisch veld. Wat ons in het elektromagnetisme interesseert, is de kracht die het elektrisch veld uitoefent op de andere aanwezige ladingen. Deze kracht wordt uitgedrukt door de volgende formule:

$$\text{Kracht (in newton, N)} \leftarrow \vec{F} = q \cdot \vec{E} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Elektrisch veld} \\ \text{(in newton/coulomb, N/C)} \\ \text{Elektrische lading} \\ \text{(in coulomb, C)} \end{array}$$

Het betreft hier de kracht van Lorentz. Boven F en E staat een pijltje om te benadrukken dat het gaat om vectoriële grootheden, d.w.z. grootheden die een richting en een waarde hebben.

De kracht die wordt uitgeoefend op de ladingen hangt af van de aard van de lading: door conventie heeft de kracht uitgeoefend op een + lading dezelfde richting als het elektrisch veld, terwijl de kracht uitgeoefend op een – lading in de tegengestelde richting gaat.

We illustreren dit met twee voorbeelden:



In deze twee voorbeelden is er sprake van een elektrisch gelijkstroomveld: het is georiënteerd van de + ladingen naar de – ladingen. Bij wisselstroom varieert de richting van het elektrisch veld aan dezelfde frequentie (bijvoorbeeld 50 Hz): het elektrisch veld verandert 100 keer per seconde van richting.

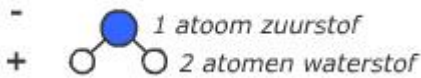
In een goed geleidend materiaal heeft het elektrisch veld tot gevolg dat de ladingen zich verplaatsen. Men spreekt van de geleidingsstroom: door de verplaatsing van de ladingen ontstaat er een elektrische stroom.

In een isolerend materiaal creëert het elektrisch veld dipolen door de polarisatie van de moleculen of reoriënteert het de bestaande dipolen (*). Men spreekt van de verplaatsingsstroom. De sterkte van de verplaatsingsstroom hangt af van het vermogen van het materiaal om zich te polariseren.

(*) Een dipool is een molecule met een positief geladen en een negatief geladen kant.

Een voorbeeld:

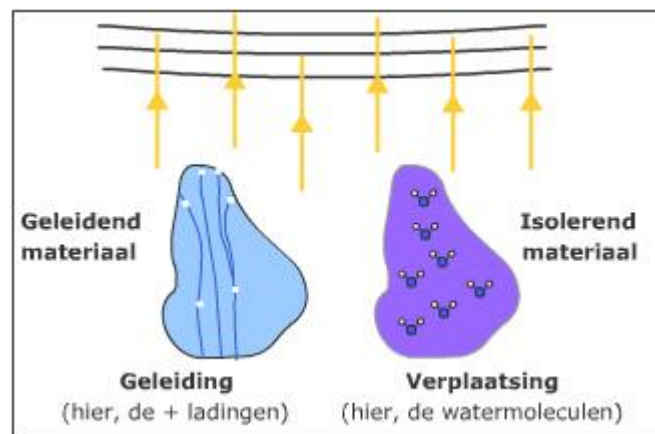
De watermolecule (H_2O) is een dipool aangezien het zuurstofatoom negatief geladen is en de twee waterstofatomen positief geladen.



De watermoleculen hebben dus de neiging om zich te oriënteren in de richting van het elektrisch veld. Het veld van 50 Hz reoriënteert de watermoleculen 100 keer per seconde.

Het is deze verplaatsingsstroom die aan de basis ligt van de verwarming van voedsel in een microgolfoven. Zoals we al zagen in "Het concept veld" genereert die immers een wisselstroom van 2450 MHz, d.w.z. een stroom die meer dan 1000 miljoen keer sneller varieert.

De geleidingsstroom en de verplaatsingsstroom zijn de stromen die worden geïnduceerd door een variabele elektriciteit (hier 50 Hz). Ze verplaatsen zich afwisselend in de twee richtingen, aan de frequentie van het inductieveld.



Opmerking:

De geleidingsstroom bestaat zowel als het gaat om een gelijkstroomveld (tot de ladingen het elektrisch veld in evenwicht brengen) als om een wisselveld, terwijl de verplaatsingsstroom enkel bestaat als het veld een wisselveld is.

De interacties verbonden aan het magnetisch veld

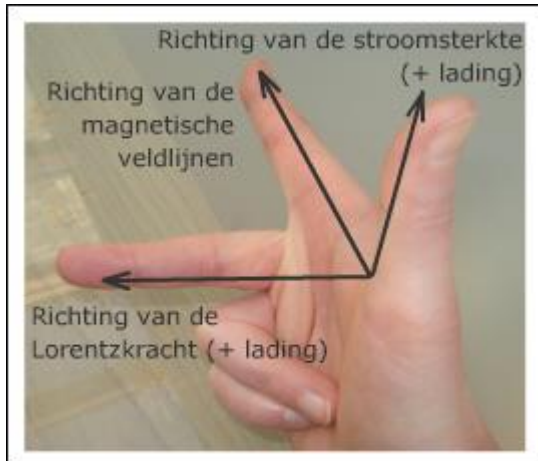
Het magnetisch veld wordt waargenomen via de magnetische kracht. Deze laatste wordt enkel uitgeoefend op bewegende ladingen: men spreekt van de kracht van Lorentz. Ze wordt uitgedrukt met de volgende formule:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

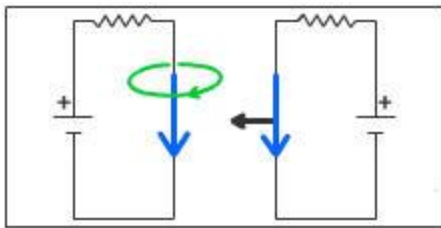
Kracht (in newton, N) ← \vec{F} ← Magnetisch veld (in tesla, T) \vec{B}
 Elektrische lading (in coulomb, C) ← q ← Snelheid (in meter/seconde, m/s) \vec{v}

De kracht die wordt uitgeoefend op de ladingen hangt af van de aard van de lading, haar verplaatsingssnelheid en de richting van het veld. Het betreft hier de kracht van Lorentz. Boven F en B staat een pijltje om te benadrukken dat het gaat om vectoriële grootheden, d.w.z. grootheden die een richting en een waarde hebben.

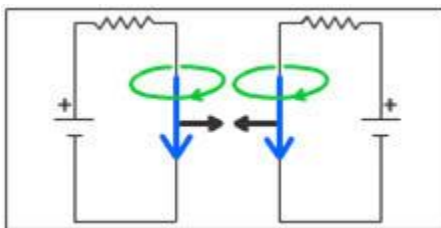
De richting van de kracht wordt gegeven door de regel van de drie vingers van de rechterhand: de duim geeft de richting aan waarin de + lading zich verplaatst (tegengestelde richting voor een – lading), de wijsvinger de richting van het veld en de middelvinger de richting van de kracht op een + lading.



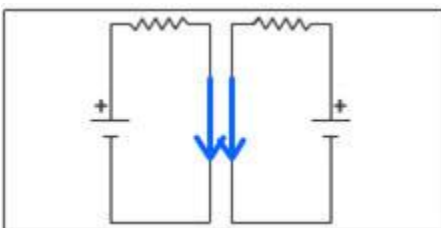
Laten we eerst de kracht illustreren die wordt uitgeoefend door een magnetisch uniform gelijkstroomveld:



Het magnetisch veld van de linkerdraad oefent een kracht uit op de rechterdraad: het betreft hier de kracht van Laplace die afhangt van de stroomsterkte, het magnetisch veld en de lengte van de draad.



Het magnetisch veld van de rechterdraad oefent ook een kracht uit op de linkerdraad.



Twee draden waar stromen doorlopen in dezelfde richting hebben de neiging om elkaar aan te trekken maar de uitgeoefende kracht is erg zwak.

Opmerking: het magnetisch veld rond de draad is zeer zwak.

In de vorige voorbeelden hadden we te maken met een magnetisch gelijkstroomveld. Anders is het wanneer het gaat om een wisselend magnetisch veld.

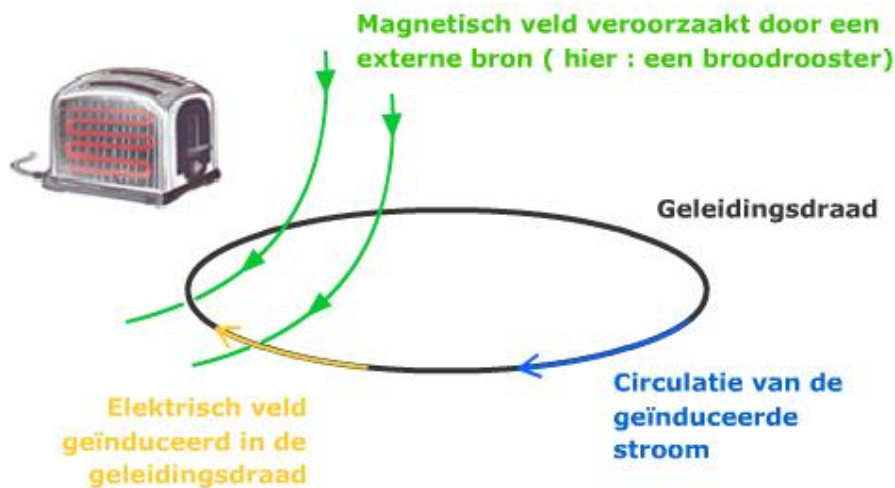
Na de waarnemingen van Oersted in 1820 (zie "Het concept veld") kwam Michael Faraday met de hypothese dat ook magnetische velden een stroom kunnen produceren. In 1831 nam hij inderdaad de inductie van een stroom waar, maar enkel in aanwezigheid van een wisselend magnetisch veld (*).

(*) Steunend op de waarnemingen van Oersted dacht Faraday dat elke stroomcirculatie in een circuit een magnetisch veld genereert dat op zijn beurt een stroom genereert in een tweede circuit in de buurt van het eerste.

Zijn eerste experimenten, met gelijkstroom, bevestigden die hypothese echter niet: in het tweede circuit circuleerde geen stroom.

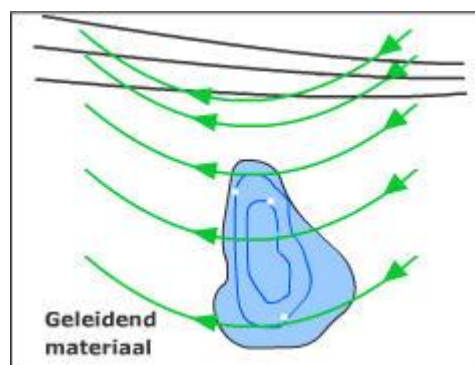
Hij nam wel een stroomcirculatie in het tweede circuit waar bij het overhalen (openen of sluiten) van de schakelaar. Hieruit leidde hij af dat de wijziging van de hoeveelheid magnetisch veld dat door een bepaalde oppervlakte gaat, d.w.z. de magnetische flux, aan de basis lag van deze geïnduceerde stromen.

Het wisselend magnetisch veld creëert meer bepaald een elektromotorische kracht die aan de basis ligt van een elektrisch veld. Dit laatste genereert dan de circulatie van een stroom: de geïnduceerde stroom. Men spreekt hier van de wet van Faraday.



De **geïnduceerde stromen** genereren op hun beurt een magnetisch veld dat de fluxwijziging waardoor ze zijn ontstaan tegengaat. Men spreekt van de wet van Lenz.

Wanneer een geleidend materiaal in een wisselend magnetisch veld wordt geplaatst, ontstaat er een elektrisch veld dat op zijn beurt geïnduceerde wervelstromen genereert die we de "Foucaultstromen" noemen.

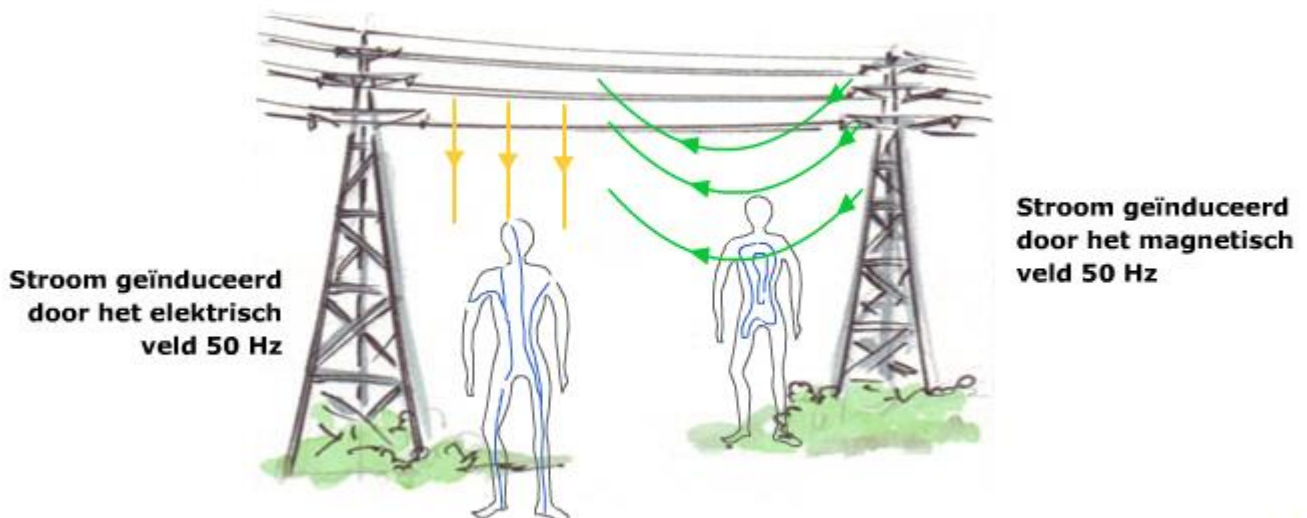


Het experiment toont aan dat de magnetische verschijnselen worden beïnvloed door de aanwezigheid van bepaalde materialen: diamagnetische, paramagnetische en ferromagnetische materialen. Ze onderscheiden zich door hun magnetische permeabiliteit, d.w.z. hun vermogen om de magnetische inductie te kanaliseren: ze concentreren de magnetische stroom en verhogen de magnetische inductiewaarde.

Isolerende materialen zoals steen, droog hout of PVC daarentegen hebben geen invloed op de verdeling van het magnetisch veld.

De interacties in het lichaam

Het menselijk lichaam kan worden beschouwd als een goede geleider van elektriciteit. In een wisselend veld (bijvoorbeeld sinusoidaal met een frequentie van 50 Hz zoals het elektrische energienet) loopt door het lichaam een stroom die dezelfde frequentie heeft als het omgevende veld.



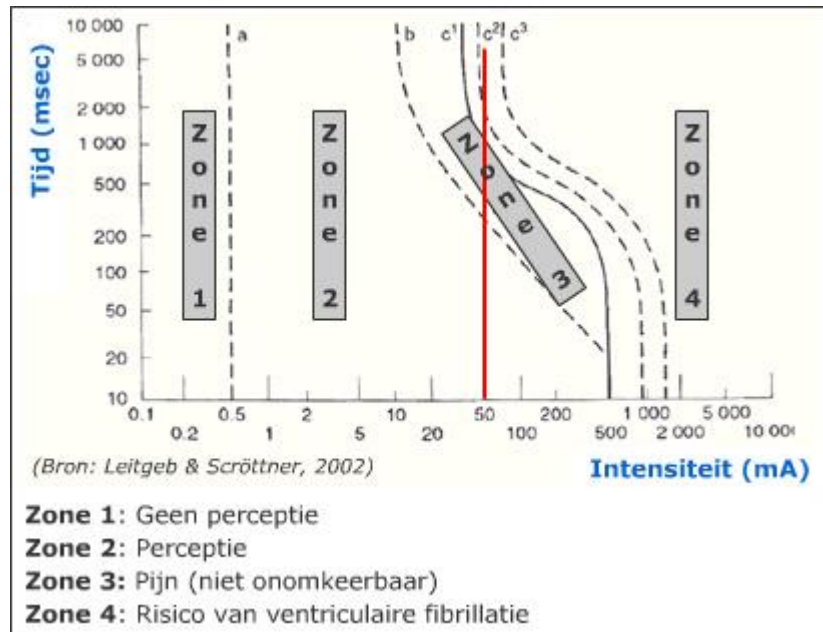
Het **uitwendig wisselend elektrisch veld** dringt het lichaam slechts gedeeltelijk binnen: voor een uitwendig elektrisch veld van enkele kV/m blijven slechts enkele mV/m in het lichaam. De stromen die in het lichaam worden geïnduceerd zijn enkel verbonden aan dit resterend inwendig elektrisch veld.

Het **uitwendig wisselend magnetisch inductieveld** wordt slechts zeer licht verstoord door de aanwezigheid van het lichaam. In het lichaam ontstaan stroomlussen om te trachten het uitwendig veld op te heffen. Bij een normale blootstelling aan het magnetisch veld van 50 Hz blijven deze geïnduceerde stromen ver onder de waarden van de natuurlijke stromen van het menselijk lichaam (de "endogene" stromen): voor een uitwendig veld van $0,15 \mu\text{T}$ zijn de geïnduceerde stromen ongeveer 5000 keer zwakker dan de endogene stromen (*)

(*) Het criterium voor de vaststelling van de normen betreffende de blootstelling aan de velden met lage frequentie bestaat erin te vermijden dat de geïnduceerde stromen groter zijn dan de stromen die van nature worden geproduceerd in het lichaam. Bij 50 Hz bedragen de basisbeperingen (of limietwaarden voor de blootstelling) 10 mA/m^2 voor arbeiders en 2 mA/m^2 voor de algemene bevolking. Meer informatie vindt u in **Problematiek van gezondheidsrisico's: van onderzoek tot normen en analyse van de blootstelling**, bereikbaar via het tabblad "EM-velden en gezondheid" op onze website.

De perceptie van de velden 50 Hz

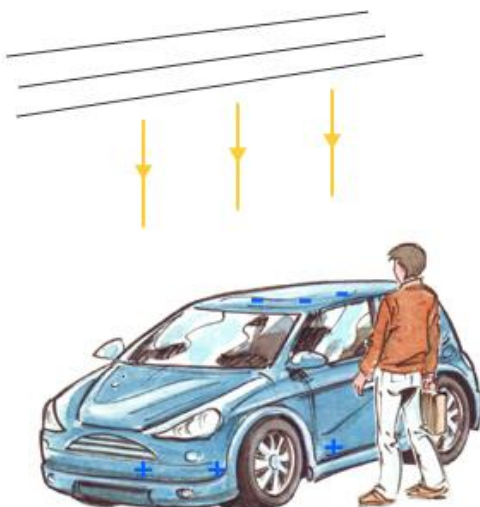
Zoals we hebben gezien induceert een elektrisch veld slechts zeer zwakke stromen in het lichaam. We merken die stromen meestal niet op omdat ze te zwak zijn om de zenuwcellen en de spieren op te wekken. De perceptiedrempel varieert van de ene persoon tot de andere.



Als het elektrisch veld een drempel van 20 kV/m overschrijdt, nemen we een lichte tinteling aan het huidoppervlak waar en komen de lichaamshaartjes overeind. Dat is het verschijnsel van de pilo-erectie. Hetzelfde verschijnsel zorgt ervoor dat de hoofdharen overeind komen bij statische elektriciteit.

Onder sommige omstandigheden kunnen we het elektrisch veld ook indirect waarnemen:

- a. **Gevoel van een lichte elektrische schok bij het aanraken van een van de grond geïsoleerde metalen massa onder bijvoorbeeld een hoogspanningslijn: dat is het verschijnsel van de capacatieve koppeling.**



De auto onder de hoogspanningslijn is onderworpen aan het elektrisch veld: het induceert een verplaatsing van de ladingen. De auto krijgt zo een zekere spanning die verschilt van de spanning waaraan de persoon onderworpen is.

Als deze laatste de metalen structuur aanraakt, komen de spanningen met elkaar in evenwicht (*). De elektrische schok kan onaangenaam zijn maar is niet gevaarlijk.

Hetzelfde verschijnsel kan zich voordoen wanneer twee dieren eten uit een metalen bak onder een hoogspanningslijn. De oplossing bestaat erin om de etensbak correct op grond te plaatsen.

(*). Dit verschijnsel lijkt op een elektrostatiche ontlading maar verschilt in de hoeveelheid ontladen stroom en de duur van de ontlading.

b. Oplichtende fluorescentielamp

Als men een fluorescentielamp in de richting van de geleidingskabels van een hoogspanningslijn houdt, zal ze zwak oplichten. Hoe komt dat? Het elektrisch veld van de lijn genereert een geïnduceerde spanning in de lamp. Het gas binnenin de lamp wordt opgewekt en de lamp geeft licht af.

Opmerking: de werking van de fluorescentielamp wordt beschreven in “Gebruik van de elektriciteit”.

c. Geluid verbonden aan het corona-effect

Het corona-effect is een typisch verschijnsel van zeer sterke elektrische velden. Het wordt gekenmerkt door een lichtgevende halo rond hoogspanningskabels. Het corona-effect wijst op de aanwezigheid van gedeeltelijke ontladingen rond de geleiders van een luchtleijn, onder bepaalde omstandigheden (*). Deze ontladingen liggen aan de oorsprong van een soms onaangenaam geluid.

(*) De aanwezigheid van kleine uitsteeksels aan het oppervlak van de geleiders, zoals bijvoorbeeld waterdruppels, sneeuwvlokken of insecten, veroorzaakt aanzienlijke verhogingen van het elektrisch veld. Het corona-effect varieert dus aanzienlijk naargelang de buiten- en de atmosferische omstandigheden.

Bij de blootstelling aan een magnetisch veld worden er slechts zeer zwakke stromen in het lichaam geïnduceerd. Aan de gebruikelijke blootstellingswaarden zijn ze onmerkbaar, net als de stromen die worden geïnduceerd door het elektrisch veld.

Alleen een blootstelling aan veel sterkere magnetische velden kan leiden tot een rechtstreekse perceptie. Voor een magnetisch veld van 10 mT tot 50 Hz (d.w.z. ongeveer duizend keer de maximumwaarde die wordt bekomen onder een hoogspanningslijn) verschijnen er bijvoorbeeld lichtflitsen in het gezichtsveld. Dat zijn de magnetofosfenen. Deze flitsen zijn omkeerbaar en worden toegeschreven aan stromen die worden geïnduceerd in het netvlies. Zodra het lichaam niet meer is blootgesteld verdwijnen deze kleine stromen. Deze effecten stapelen zich niet op bij herhaalde blootstelling zoals bijvoorbeeld wel het geval is met X-stralen.

Onder sommige omstandigheden kunnen we het magnetisch veld ook indirect waarnemen, met name bij interferentie met een elektrisch apparaat:

De goede werking van een elektrisch apparaat kan worden verstoord door het elektromagnetisch veld dat wordt uitgezonden door een ander elektrisch apparaat in de buurt van het eerste. De storingen die worden veroorzaakt door dit elektromagnetisch veld noemen we elektromagnetische interferenties. Om die te vermijden moet men toezien op de elektromagnetische compatibiliteit van de elektrische apparaten.

Opmerking:

De biologische effecten mogen niet worden verward met de interferenties van een elektromagnetisch veld met een elektronisch apparaat. Sommige materialen zijn erg gevoelig voor de magnetische velden van lage frequentie. Het kathodische scherm van een computer bijvoorbeeld kan worden verstoord door een magnetisch veld van 1 μT . De interferenties zijn te wijten aan de frequentie van de “vernieuwing” van de weergave op het scherm, een frequentie van om en bij de 50 Hz.

Voorbeelden van het gebruik

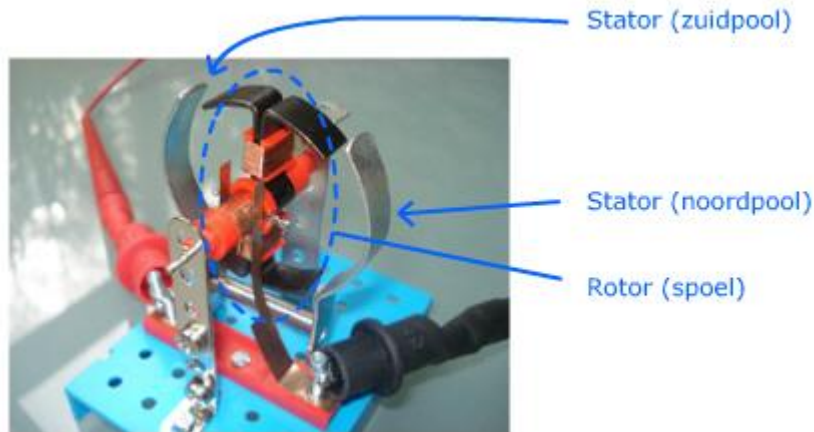
De eigenschappen van de elektrische en magnetische velden 50 Hz worden benut van bij de productie en het transport van de elektrische energie. Hierna zullen we in detail de werking van een alternator en een transformator bekijken. In “Gebruik van de elektriciteit” zullen we het hebben over hun toepassingen in courant gebruikte elektrische apparaten.

We beginnen met de alternator.

1. De alternator

De alternatoren van de elektriciteitscentrales zetten de mechanische energie die wordt aangevoerd door water, wind, stoom, kernsplitsing, ... om in elektrische energie. De spanningen gegenereerd door de alternatoren gaan in België van 10 tot 20 000 volt (10 tot 20 kV).

Hoe worden de spanningen gegenereerd? Om het werkingsprincipe van de alternator te begrijpen hebben we een spoel (de rotor) bevestigd op een as tussen de 2 polen van een permanente magneet (de stator).



Het werkingsprincipe is vrij eenvoudig: het bestaat erin om ervoor te zorgen dat de spoelen zich verplaatsen in een magnetisch veld, om zo elektromotorische krachten te induceren. Met de onderstaande inrichting (het aandrijvingsprocédé van de rotor is een beetje ouderwets), wordt een elektromotorische kracht geïnduceerd van 124 mV.



Bekijk de informatie in geanimeerd formaat

(Flash-speler vereist: <http://www.bbemg.be/nl/startpagina-emv/elektriciteit-velden/elektromagnetisme.html>)

De rotor is samengesteld uit een spoel (meer bepaald uit twee spoelen die in serie zijn geschakeld) die door rotatie afwisselend in de buurt komen van de noord- en de zuidpool van de stator. Het magnetisch

veld dat de lussen van de spoel doorloopt, varieert dus op het ritme van de rotatie en induceert een wisselende elektromotorische kracht van overeenstemmende frequentie.

In een elektriciteitscentrale is de stator niet samengesteld uit permanente magneten maar uit elektromagneten. Hiermee kunnen veel sterkere elektromotorische krachten worden geïnduceerd.

De alternator van de elektriciteitsproductiecentrales induceert een wisselspanning van 50 Hz. De frequentie hangt af van de rotatiesnelheid van de rotor. De spanning is driefasig, wat betekent dat de elektromotorische krachten die worden geïnduceerd aan de rotorklemmen verschuiven in de tijd: men zegt dat ze gefaseerd zijn. Aan 50 Hz worden de drie fasen 6,7 milliseconden gefaseerd.



De driefasenstroom wordt bekomen door de spoelen van de rotor te verdrievoudigen en gelijkmatig te verdelen (3 spoelen). De notie “driefasig” wordt verder uitgewerkt in “Traject van de elektriciteit”

De alternator produceert elektrische energie op basis van mechanische energie. In “Gebruik van de elektriciteit” zullen we zien dat een universele motor heel eenvoudig werkt volgens het omgekeerde principe: de elektrische energie wordt omgezet in mechanische energie (rotatie van de motor).

2. Transformatoren

Transformatoren worden op grote schaal gebruikt, zowel in het transport en de verdeling van de elektriciteit als in sommige elektrische apparaten. Hun taak bestaat erin om de spanning te verhogen of te verlagen. Op het nut daarvan zullen we terugkomen in het deel "Traject van de elektriciteit".

Het werkingsprincipe van de spanningverlagende transformator is als volgt: de verhouding tussen het aantal lussen in de twee wikkelingen bepaalt de verhouding van de spanning in de primaire en de secundaire wikkeling



Bekijk de informatie in geanimeerd formaat

(Flash-speler vereist: <http://www.bbemg.be/nl/startpagina-emv/elektriciteit-velden/elektromagnetisme.html>)

In dit voorbeeld zijn de primaire wikkeling (groene draad) en de secundaire wikkeling (witte draad)

respectievelijk samengesteld uit 40 en 20 lussen. De spanning in de secundaire wikkeling wordt met de helft verlaagd ten opzichte van de spanning in de primaire wikkeling.

De spanning in de secundaire wikkeling heeft dezelfde frequentie en dezelfde vorm als de spanning in de primaire wikkeling. Ook het vermogen blijft hetzelfde

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

The diagram shows the transformer equation $\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$ with four blue arrows pointing from the terms to their respective labels:

- Top-left: V_p points to "Spanning in de primaire wikkeling (in volt, V)"
- Bottom-left: V_s points to "Spanning in de secundaire wikkeling (in volt, V)"
- Top-right: N_p points to "Aantal lussen in de primaire wikkeling"
- Bottom-right: N_s points to "Aantal lussen in de secundaire wikkeling"

Quiz

Om aan de quiz deel te nemen, klikt u op het volgende adres :

<http://www.bbemg.be/nl/startpagina-emv/elektriciteit-velden/elektromagnetisme.html>

Bijlagen

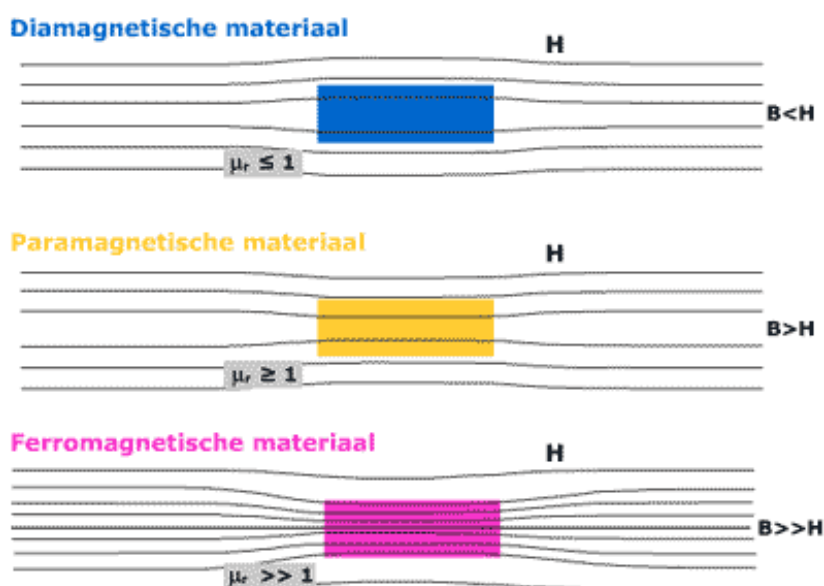
1. De magnetische eigenschappen van de materialen

De diamagnetische (zilver, koper, water, goud, lood, zink ...), paramagnetische (lucht, aluminium, magnesium, platina ...) en ferromagnetische materialen (kobalt, ijzer, mumetaal, nikkel ...) onderscheiden zich door hun magnetische permeabiliteit.

Het magnetisch veld H en de magnetische inductie B zijn in een gegeven materiaal verbonden door de vergelijking: $B = \mu * H$ (zie "Het concept veld").

De magnetische permeabiliteit van het materiaal (μ) wordt vaak uitgedrukt door het product van de magnetische constante (μ_0 , uitgedrukt in Henry/meter) en de relatieve permeabiliteit (μ_r , zonder grootheid):

- μ_0 is een universele constante, gelijk aan $4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
- μ_r is afhankelijk van het materiaal.



De diamagnetische en paramagnetische materialen hebben permeabiliteitswaarden die dicht bij 1 liggen. De absolute permeabiliteit μ van de diamagnetische en paramagnetische materialen is dus praktisch gelijk aan die van het vacuüm, d.w.z. $4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

De permeabiliteit van de ferromagnetische materialen is niet constant maar hangt af van het magnetisch veld H . Bij een lage waarde H kan de waarde μ_r zeer hoog zijn maar ze neemt af met de waarde van H en kan vanaf een bepaalde drempel weer unitair worden vanwege saturatie. Om die reden geven we hierna de maximale relatieve permeabiliteitswaarden (aan 20°C):

Kobalt: 250/ ijzer: 10.000/ mumetaal: 100.000/ nikkel: 600

Opmerking: De materialen met een hoge magnetische permeabiliteit (vooral mumetaal) zijn potentiële kandidaten voor pantsering tegen de magnetische velden. Bij hun gebruik moeten echter belangrijke voorzorgsmaatregelen worden genomen met het risico dat hun efficiëntie afneemt.

2. De elektromagnetische compatibiliteit

Elektromagnetische compatibiliteit is "de eigenschap van een inrichting, apparaat of systeem om op bevredigende wijze in zijn elektromagnetische omgeving te kunnen functioneren zonder zelf elektromagnetische storingen te veroorzaken die ontoelaatbaar zijn voor alles wat zich in die omgeving bevindt"

(bron: Richtlijn 2004/108/EG van het Europees Parlement en de Raad van 15 december 2004).

Om de elektromagnetische compatibiliteit te illustreren nemen we het voorbeeld van de pacemakers.

De pacemaker (of hartstimulator, of batterij) is een apparaat ingeplant in het organisme dat elektrische impulsen geeft aan het hart en zo de hartslag regelt in geval van storing.

Hoe functioneert hij in zones met sterke veldconcentraties?

Met de huidige pacemakers, ingesteld in bipolaire modus met een gewone ventriculaire gevoeligheid (doorgaans 2 mV), is het gevaar voor interferentie vrijwel onbestaande voor normaal voorkomende graden van blootstelling. Pacemakers in unipolaire modus of met een grotere gevoeligheid zijn meer onderhevig aan interferenties. Het verdient aanbeveling om geen kleine motoren (van het type knutselwerktuigen, boormachine) in de onmiddellijke nabijheid van de omhuizing van de pacemaker te gebruiken (Souques, 2004).

Uit voorzorg in werkomgevingen waar sterke velden aanwezig zijn, vraagt u uw cardioloog best welk soort pacemaker bij u werd gebruikt, evenals de programmering en de graad van immuniteit voor elektrische en magnetische velden. Met deze aanwijzingen zal de arbeidsgeneesheer in staat zijn de werknemers hierover informatie te geven.

Meer informatie vindt u in [Werknemers met pacemaker](#) van de BBEMG of u kunt contact opnemen met [team ACE](#) van de universiteit van Luik.

Referentie : Souques, M. (2004). Influence des champs électromagnétiques non ionisants sur les dispositifs cardiaques médicaux implantables. La Presse Médicale, Vol 33, N° 22 - décembre 2004, pp. 1611-16