

12 Elektromagnetisme vwo

12.0 Overzicht

12.1 Elektrische kracht

- Welke eigenschappen hebben elektrisch geladen deeltjes?
- Hoe kun je een voorwerp elektrische lading geven?
- Wat is influentie en wat is polarisatie?
- Hoe werkt een elektroscop?
- Hoe luidt de wet van Coulomb?
- Wat zijn de overeenkomsten en wat zijn de verschillen tussen de wet van Coulomb en de gravitatiewet van Newton?
- Wat is het elektrisch veld en wat is de eenheid van elektrische veldsterkte?
- Hoe bereken je de sterkte van het elektrisch veld?
- Wat zijn elektrische veldlijnen?
- Wat zijn de eigenschappen van het elektrisch veld?
- Wanneer is het elektrisch veld homogeen en wanneer is het E-veld radiaal?
- Wat weet je van het elektrisch veld in een holle geleider?
- Op welke manier moet je elektrische velden optellen?

12.2 Elektrische energie

- Hoe bereken je de elektrische energie als je de elektrische veldsterkte weet?
- Wat is het verschil tussen E en E_{el} ?
- Hoe bereken je de spanning als je de elektrische veldsterkte weet?
- Welke alternatieve eenheid voor elektrische veldsterkte kun je gebruiken?
- Hoe bereken je de elektrische energie als je de spanning weet?

12.3 Deeltjes versnellen

- Hoe kun je een elektrisch geladen deeltje versnellen?
- Hoe bereken je de verandering van de snelheid?
- Bij welke grootte hoort de eenheid elektronvolt (eV)?
- Hoe reken je om van elektronvolt naar joule en terug?
- Wat zijn de onderdelen van een elektronenkanon en hoe werkt zo'n kanon?
- Hoe werkt een kathodestraalmonitor (beeldbuis)?
- Hoe werkt een röntgenbuis?
- Hoe werkt een lineaire deeltjesversneller en waar wordt zo'n versneller gebruikt?

12.4 Het magnetisch veld

- Welke eigenschappen heeft een permanente magneet?
- Van welke materialen kun je een permanente magneet maken?
- Wat is de atomaire oorzaak van magnetisme?
- Wat is magnetische influentie?
- Wat is een magnetisch veld en wat geven de magnetische veldlijnen aan?

- Wat is magnetische inductie en wat is de eenheid van magnetische inductie?
- Welke eigenschappen hebben magnetische veldlijnen?
- Wanneer is een magnetisch veld homogeen?
- Hoe zien de magnetische veldlijnen om een staafmagneet eruit?

12.5 Elektromagnetisme

- Wat is een stroomvoerende draad?
- Wat kun je met de rechterhandregel voor stroomdraad bepalen?
- Hoe pas je de rechterhandregel voor stroomdraad toe?
- Hoe geef je de richting "papier in" en de richting "papier uit" aan?
- Op welke manier moet je magnetische velden optellen?
- Hoe zien de magnetische veldlijnen om een stroomspoel eruit?
- Wat kun je met de rechterhandregel voor een stroomspoel bepalen?
- Hoe pas je de rechterhandregel voor een stroomspoel toe?
- Wat is een elektromagneet?
- Hoe bereken je de magnetische inductie binnen in een stroomspoel?

12.6 Lorentzkracht

- Wanneer werkt de lorentzkracht op een geladen deeltje?
- Wat is de eenheid van de lorentzkracht?
- Hoe bereken je de lorentzkracht op een stroomvoerende draad?
- Hoe bereken je de lorentzkracht op een geladen deeltje?
- Wat kun je met de linkerhandregel bepalen?
- Hoe pas je de linkerhandregel toe?
- Hoe kan de lorentzkracht voor een draaibeweging zorgen?
- Hoe werkt een elektromotor?
- Hoe zorg je er bij een gelijkstroommotor voor het draaien niet stopt?
- In welke richting wijzen de krachten tussen twee stroomvoerende draden?
- Wat is de baan van een deeltje dat loodrecht op de magnetische veldlijnen beweegt?
- Welke kracht fungeert als middelpuntzoekende kracht?

12.7 Inductiespanning

- Wat is magnetische flux en welk symbool gebruik je voor magnetische flux?
- Wat is de eenheid van magnetische flux?
- Hoe bereken je de magnetische flux
- Hoe luidt de inductiewet van Faraday?
- Welke drie alternatieve eenheden van magnetische flux zijn er?

12.8 Richting van de inductiestroom

- Hoe luidt de wet van Lenz?
- Wat is tegenflux en wat is meeflux?
- Wat zegt de wet van Lenz over de richting van de lorentzkracht?
- Hoe hangt de wet van Lenz samen met de wet van behoud van energie?

12.1 Elektrische kracht

Elektrisch geladen deeltjes

We beginnen dit hoofdstuk met het op een rijtje zetten van wat je allemaal al weet over atomen en elektrische ladingen die elkaar aantrekken of afstoten.

- Materie bestaat uit atomen.
- Een atoom heeft een kern met protonen en neutronen.
- Op enige afstand van de atoomkern bevinden zich elektronen.
- De massa's van protonen en neutronen zijn aan elkaar gelijk.
- De massa van een elektron is veel kleiner dan die van een proton.
- Het symbool voor elektrische lading is q of Q .
- De eenheid van elektrische lading is coulomb (C).
- Een proton heeft een positieve elektrische lading van $1,6022 \cdot 10^{-19}$ C.
- Een elektron heeft een negatieve elektrische lading van $-1,6022 \cdot 10^{-19}$ C.
- Een neutron heeft geen elektrische lading.
- In een neutraal atoom is het aantal elektronen gelijk aan het aantal protonen.
- In een negatief geladen atoom (ion) zijn er meer elektronen dan protonen.
- In een positief geladen atoom (ion) zijn er minder elektronen dan protonen.
- Positief geladen deeltjes stoten elkaar af.
- Negatief geladen deeltjes stoten elkaar af.
- Positief geladen deeltjes trekken negatief geladen deeltjes aan en omgekeerd.
- Als geladen deeltjes zich verplaatsen is er elektrische stroom.
- Metalen zijn goede elektrische geleiders.
- In een metaal kunnen alleen elektronen zich verplaatsen, protonen niet.
- In een zoutoplossing (elektrolyt) verplaatsen zich positieve en negatieve ionen.

Elektrisch geladen voorwerpen

Elektrisch geladen voorwerpen oefenen krachten op elkaar uit, ook als ze elkaar niet aanraken. Deze elektrische kracht gaat door de lege ruimte heen en werkt op afstand. In de meeste voorwerpen is het aantal protonen gelijk aan het aantal elektronen, zodat er geen overschot of tekort aan lading is. Het voorwerp is dan neutraal en tussen twee neutrale voorwerpen is er geen elektrische kracht.

Door erover te wrijven kan een voorwerp een elektrische lading krijgen. Wrijf je met een zijden doek over een glazen staaf dan springen er elektronen van het glas naar de doek. Hierdoor krijgt de zijden doek een negatieve lading en de glazen staaf een positieve lading. Vanwege deze lading trekken de doek en de staaf elkaar aan. Deze aantrekkende kracht is goed merkbaar. Waarom de elektronen van de staaf naar de zijden doek springen en niet andersom is moeilijk te begrijpen. Het wordt bepaald door de soort atomen en de wijze waarop deze zijn geordend en met elkaar wisselwerken.

Influentie

Een geladen voorwerp beïnvloedt zijn omgeving. Deze beïnvloeding noem je **influentie**. Voorwerpen, al dan niet geladen, in de buurt van een geladen voorwerp gedragen zich anders dan normaal.

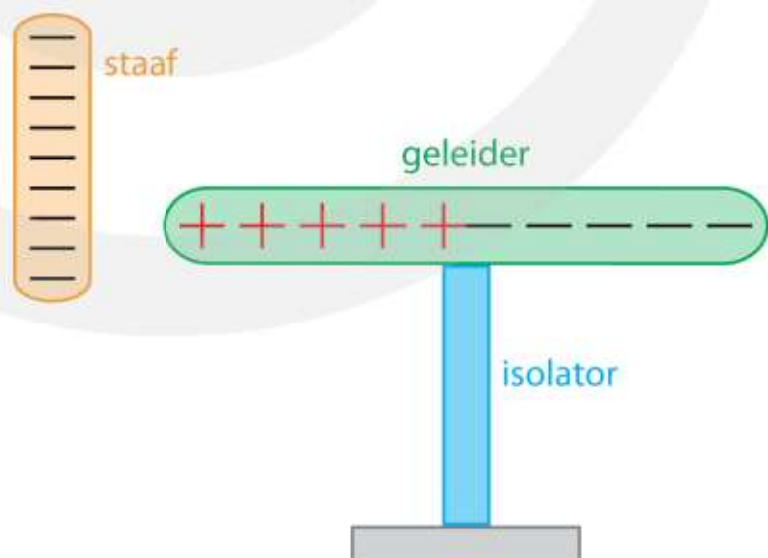
Influentie is de beïnvloeding van de omgeving door een elektrisch geladen voorwerp.

– polarisatie van een geleider –

Als voorbeeld nemen we een elektrische geleider die geïsoleerd is opgesteld. Zie figuur 1. Brengen we een negatief geladen staaf in de buurt van deze geleider, dan worden de elektronen in de geleider door de staaf afgestoten, waardoor ze zich herverdelen. Aan de kant vlakbij de staaf is de dichtheid van elektronen kleiner dan aan de andere kant. Zie figuur 1. Door deze influentie krijgt de geleider een positief geladen kant en een negatief geladen kant. De geleider wordt **gepolariseerd** en krijgt een **pluspool** en een **minpool**. Omdat de pluspool dichterbij de staaf is dan de minpool trekken de staaf en de geleider elkaar aan.

Influentie veroorzaakt een herverdeling van elektronen in een geleider.

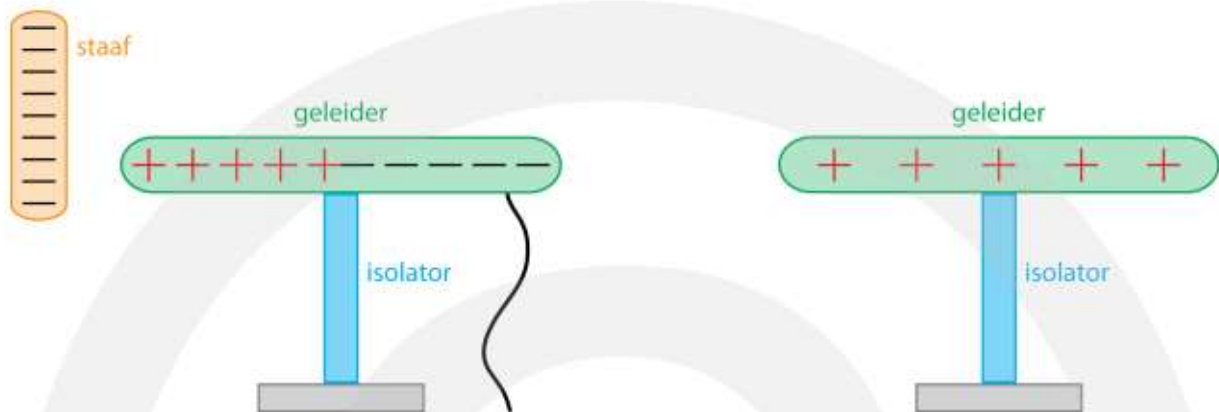
De herverdeling van de elektronen blijft bestaan zolang de staaf in de buurt is. Nemen we de staaf weg, dan stromende de verplaatste elektronen terug en wordt de oorspronkelijke verdeling van lading hersteld. Hierdoor verdwijnt de aantrekkende kracht tussen de staaf en de geleider.



Figuur 1 Een geleider wordt door een negatief geladen staaf gepolariseerd.

Door influentie kan een geleider een permanente elektrische lading krijgen. Dat gaat als volgt. Net als in figuur 1 polariseren we een geleider met een negatief geladen staaf. Vervolgens raken we de negatieve pool kort aan met een koperdraad die met de aarde is verbonden. Negatieve lading (elektronen) stroomt hierdoor weg naar de

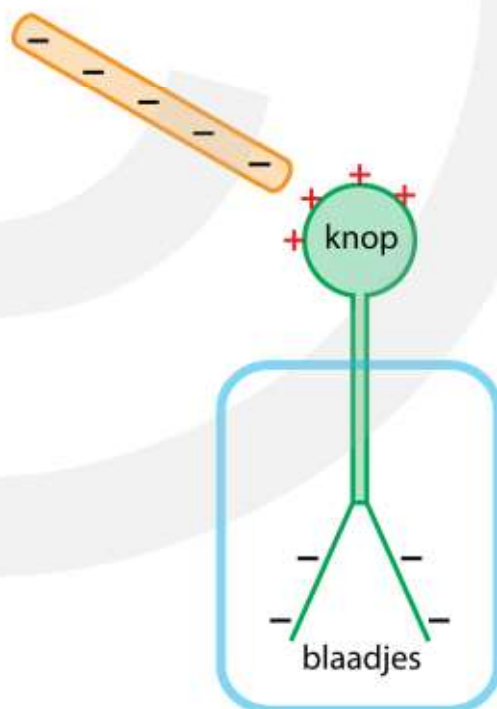
aarde, waardoor de geleider als geheel een tekort aan negatieve lading krijgt en dus positief wordt geladen. De staaf en de geleider trekken elkaar aan, zie figuur 2. We kunnen ook de positieve pool aanraken met een koperdraad. In dat geval stromen er elektronen van de aarde naar de geleider, waardoor de geleider als geheel een negatieve lading krijgt. De staaf en de geleider stoten elkaar nu af, zie figuur 2.



Figuur 2 Door de elektronen te laten wegstromen krijgt de geleider een positieve lading. Deze lading blijft aanwezig ook als de staaf wordt weggenomen.

– elektroscop –

Influentie is goed waarneembaar in een **elektroscop**. Breng je een negatief geladen staaf in de buurt van de knop van een elektroscop dan gaan de blaadjes uitslaan. De negatief geladen staaf oefent een afstotende kracht uit op de elektronen, die hierdoor van de knop naar de blaadjes gaan. De blaadjes krijgen een negatieve lading en gaan elkaar afstoten. Zodra de staaf weggaat verdwijnt de afstotende kracht en stromen de elektronen terug naar de knop. De blaadjes stoten elkaar dan niet meer af. Raak je de knop even aan met de staaf dan springen er elektronen over van de staaf naar de knop, waardoor de knop geen positieve lading meer heeft. De elektronen in de blaadjes kunnen niet meer terug naar de knop. Ook als de staaf weg is stoten de blaadjes elkaar nu af.



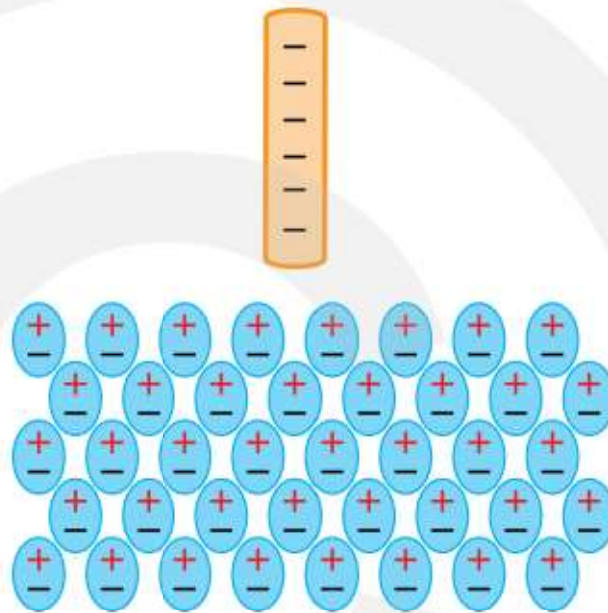
Figuur 3 Elektroscop.

– polarisatie van een isolator –

Ook een isolator wordt beïnvloed door de aanwezigheid van een elektrisch geladen staaf. In een isolator kan lading zich niet over een grote afstand verplaatsen, maar herverdeling van lading binnen een atoom is wel mogelijk. Ook deze herverdeling van lading noem je *influentie*.

Brengen we een negatief geladen staaf in de buurt van een isolator, dan worden de elektronen afgestoten en de atoomkernen aangetrokken. **Binnen ieder atoom** vindt herverdeling van lading plaats. Ieder atoom krijgt een positieve en een negatieve kant. Dit noem je een **dipool**. Kijk je naar de isolator als geheel, dan zie je in de buurt van de staaf een positief geladen oppervlak en aan de andere kant een negatief geladen oppervlak. Binnen in de isolator is de positieve en negatieve lading gelijkmatig verdeeld. De isolator als geheel is neutraal. Zie figuur 4. Polarisation van een isolator heet **diëlektrische polarisatie**.

Figuur 4 Dielektrische polarisatie.



De wet van Coulomb

De aanwezigheid van influentie duidt op de aanwezigheid van een elektrische kracht die over een afstand werkt. De grootte van de elektrische kracht wordt gegeven door de wet van Coulomb. Stel er zijn twee ladingen q_1 en q_2 op een afstand r van elkaar dan is de elektrische kracht die deze ladingen op elkaar uitoefenen gelijk aan:

$$F_{\text{el}} = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{met} \quad f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

- F_{el} is de elektrische kracht in newton (N)
- ϵ_0 is de permittiviteit van het vacuüm: $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ m}^{-2} \text{ N}^{-1}$
- q_1 is de lading van voorwerp 1 in coulomb (C)
- q_2 is de lading van voorwerp 2 in coulomb (C)
- r is afstand tussen de middelpunten van voorwerpen 1 en 2 in meter (m)

– overeenkomst met de gravitatiekracht –

De wet van Coulomb lijkt erg op de gravitatiewet van Newton:

$$F_{\text{grav}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

In beide wetten is de kracht omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. In de natuurkunde heet dit de **(omgekeerde) kwadratenwet**. De kwadratische afname van de kracht suggereert dat er "iets" wordt uitgestraald dat zich bolvormig verdeelt over de ruimte. De oppervlakte van een bol is $4\pi \cdot r^2$ en de hoeveelheid per vierkante meter van hetgeen wordt uitgestraald neemt hierdoor kwadratisch af met de afstand. Voor geluid en licht dat naar alle kanten wordt uitgezonden neemt de intensiteit ook af met het kwadraat van de afstand. Zowel bij de elektrische kracht als bij de gravitatiekracht lijkt er dus een "boodschapper" te zijn die de kracht overdraagt. Bij de elektrische kracht is de boodschapper het **foton** dat we in latere hoofdstukken gaan tegenkomen. Voor de gravitatiekracht is de boodschapper veel minder duidelijk. Het bestaan van het **graviton** wordt gesuggereerd, maar dit hypothetische deeltje is tot op heden nog nooit waargenomen.

– verschil 1: aantrekken en afstoten –

Behalve de genoemde overeenkomst zijn er twee verschillen tussen de elektrische kracht en de gravitatiekracht. De gravitatiekracht is altijd aantrekkend maar de elektrische kracht kan ook afstotend zijn. Dit komt vanwege het bestaan van twee soorten elektrische ladingen, positief en negatief. Nu bestaan er ook twee soorten materie, namelijk gewone **materie** en **antimaterie** en het is mogelijk dat materie en antimaterie elkaar afstoten. Maar dat is tot op heden nog nooit experimenteel aangetoond. De reden hiervan is dat de gravitatiekracht onvoorstelbaar veel zwakker is dan de elektrische kracht, zoals we hieronder zullen zien.

– verschil 2: de sterkte –

Vergelijken we bijvoorbeeld de factoren f en G dan vinden we:

$$f = 8,988 \cdot 10^8 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

$$G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

Vergelijken we de elektrische kracht tussen twee ladingen van één coulomb op één meter afstand met de gravitatiekracht van tussen twee massa's van één kilogram op één meter afstand dan is de elektrische kracht 10^{19} keer sterker dan de gravitatiekracht. Deze vergelijking is echter afhankelijk van de gekozen eenheden coulomb en kilogram en zegt daarom niets over de sterkte van de kracht als zodanig. Beter is het om twee elektronen op een bepaalde afstand te plaatsen en dan de elektrische kracht te vergelijken met de gravitatiekracht. Dan vinden we een verhouding:

$$\frac{f \cdot e^2}{G \cdot m_e^2} = \frac{8,988 \cdot 10^8 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2}{6,674 \cdot 10^{-11} \cdot (9,109 \cdot 10^{-31})^2} = 4,165 \cdot 10^{42}$$

In dit geval is de elektrische kracht dus ruim 10^{42} keer sterker dan de gravitatiekracht. Als elektrische krachten en gravitatiekrachten beide aanwezig zijn, dan wint de elektrische kracht het altijd ruimschoots van de gravitatiekracht. Dit is bijvoorbeeld het geval in moleculen en stoffen. Tussen de atomen waaruit moleculen en stoffen zijn opgebouwd werken elektrische krachten en gravitatiekrachten. Maar van de gravitatiekracht is niets te merken, omdat de elektrische kracht onvoorstelbaar veel sterker is. In de scheikunde en in de biologie speelt de gravitatiekracht daarom vrijwel geen rol van betekenis. Alle scheikundige en biologische processen vinden plaats onder invloed van uitsluitend de elektrische kracht.

VOORBEELD

krachten in een waterstofatoom

Een waterstofatoom bestaat uit een proton en een elektron. De gemiddelde afstand tussen het proton en het elektron is $5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$

Bereken de aantrekkende kracht tussen het proton en het elektron in een waterstofatoom.

- $q_1 = q_2 = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ | $r = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ | $F_{\text{el}} = \dots \text{ N}$
- $F_{\text{el}} = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$
- $F_{\text{el}} = 8,9876 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,602177 \cdot 10^{-19})^2}{(5,29177 \cdot 10^{-11})^2}$
- $F_{\text{el}} = 8,23878 \cdot 10^{-8} = 8,24 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Het elektrisch veld

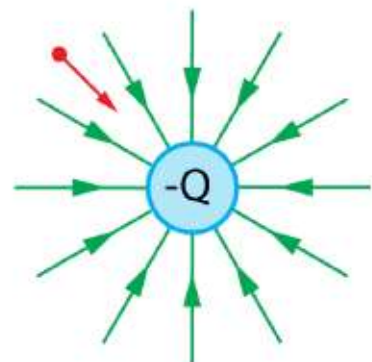
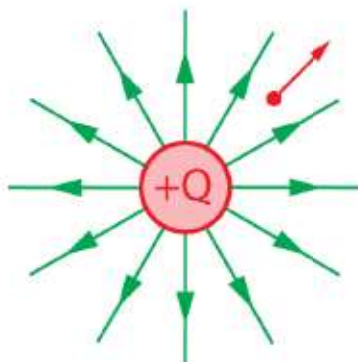
Influentie toont aan dat elektrische kracht door de lege ruimte over afstand werkt. Een elektrisch geladen voorwerp beïnvloedt zijn omgeving. Om de mate waarin dit gebeurt te beschrijven introduceren we het **elektrische veld: E-veld**. Hiermee bedoelen we het volgende:

Elektrisch veld:

Aan ieder punt P in de omgeving van een elektrische geladen voorwerp wordt een vector toegekend. Dit is de E-veld vector.

De grootte van de E-veld vector is de grootte van de kracht die een lading van één coulomb in punt P ondervindt.

De richting van de E-veld vector is de richting van de elektrische kracht die een positieve lading in punt P ondervindt.



Figuur 5 Elektrisch veld om een positief en een negatief geladen voorwerp.

In figuur 5 zie je een positief en een negatief geladen voorwerp. De groene lijnen stellen het elektrisch veld voor. Een positieve lading bevindt zich in de buurt van het voorwerp. Het positief geladen voorwerp stoot deze lading af in de richting van de veldlijnen. Het negatief geladen voorwerp trekt deze lading aan in de richting van de veldlijnen.

De **grootte van het elektrisch veld** in punt P is gelijk aan de kracht op een deeltje met lading q in dit punt gedeeld door q .

De **richting van het elektrisch veld** in punt P is gelijk aan de richting van de kracht op een deeltje met lading q in dit punt.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}$$

- $\vec{E}$ is het elektrisch veld (een vectorgrootheid) in newton per coulomb (N/C)
- $\vec{F}_{el}$ is de elektrische kracht (een vectorgrootheid) in newton (N)
- q is de lading in punt P in coulomb (C)

Elektrische veldlijnen

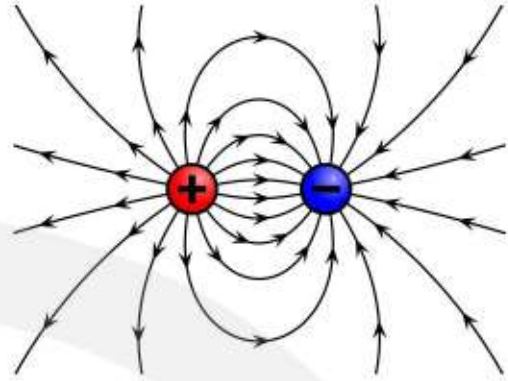
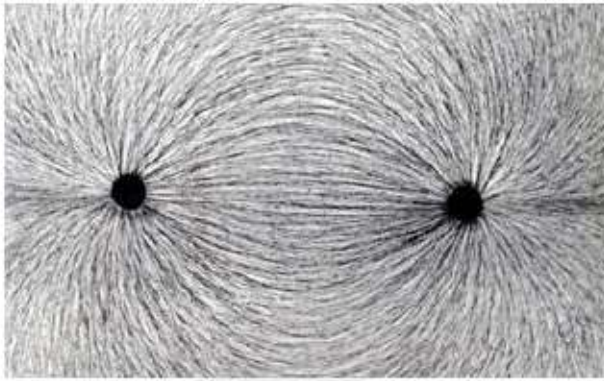
De groen getekende lijnen in figuur 5 noem je **elektrische veldlijnen**. Deze lijnen geven de richting aan van de elektrische kracht. In punt P is de richting van de elektrische kracht gelijk aan de richting van de raaklijn aan de E-veldlijn door punt P.

De richting van $\vec{F}_{el}$ in punt P is gelijk aan de richting van de raaklijn van de E-veldlijn door punt P.

Omdat de elektrische kracht in ieder punt P maar één richting heeft gaat er door ieder punt in de ruimte maar één veldlijn.

Door iedere punt in de ruimte gaat één elektrische veldlijn.

Elektrische veldlijnen kunnen zichtbaar gemaakt worden door korreltjes van een isolerend materiaal (griesmeel) op olie te laten drijven en hierin de positieve en negatieve pool van een spanningsbron te plaatsen. Om deze polen is een elektrisch veld aanwezig. De griesmeelkorrels krijgen door dit veld een positieve en een negatieve kant, ze worden gepolariseerd. De positieve kant van een griesmeelkorrel trekt de negatieve kant van een naburige korrel aan. Hierdoor rijgen ze zich als kralen aan elkaar en vormen ze lijnen. Deze lijnen hebben dezelfde richting als de elektrische veldlijnen.



Figuur 6 Elektrische veldlijnen zichtbaar gemaakt. Rechts een schematische illustratie.

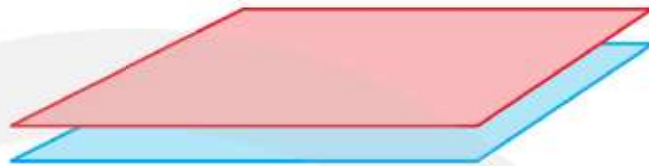
Eigenschappen van een elektrisch veld (E-veld)

- Om een geladen voorwerp is een E-veld aanwezig. Een geladen deeltje in dit E-veld ondervindt een elektrische kracht.
- De elektrische veldsterkte op plaats P is gelijk aan de kracht op een geladen deeltje in P gedeeld door de lading van het deeltje.
- Het elektrisch veld is een vectorgrootheid en heeft een grootte en een richting.
- Het symbool voor elektrisch veld is $\vec{E}$.
- De eenheid van elektrische veldsterkte is newton per coulomb (N/C) wat gelijk is aan volt per meter (V/m).
- De richting van het E-veld is gelijk aan de richting van de elektrische kracht op de lading in punt P.
- Door ieder punt van de ruimte gaat één E-veldlijn. Veldlijnen snijden elkaar niet.
- Een elektrische veldlijn begint op een positieve lading en eindigt op een negatieve lading.
- Veldlijnen staan altijd loodrecht op een geladen voorwerp.
- De sterkte van het E-veld wordt aangegeven met de afstand tussen de getekende veldlijnen. Hoe kleiner deze afstand is hoe sterker het E-veld.

Homogeen E-veld

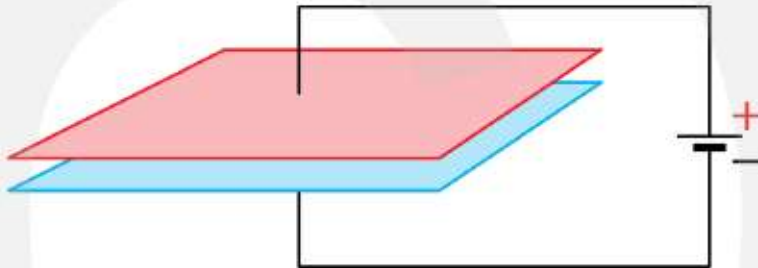
Twee evenwijdige metalen platen met een isolerende tussenruimte noemt men een **condensator**. In een condensator kan elektrische energie worden opgeslagen, zoals in de volgende paragraaf wordt uitgelegd.

Figuur 7 Een condensator.



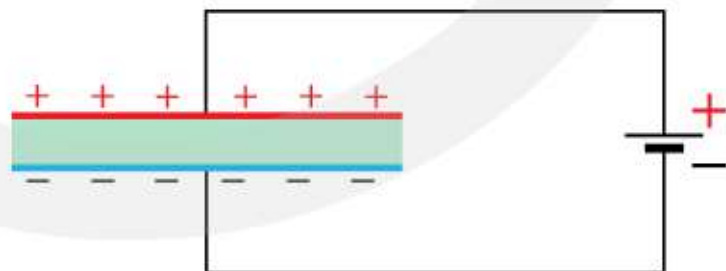
Een condensator wordt aangesloten op een spanningsbron, zie figuur 8. De bovenste plaat is verbonden met de pluspool en de onderste plaat met de minpool. De spanningsbron pompt elektronen van de bovenste plaat naar de onderste plaat. De bovenste plaat krijgt hierdoor een positieve lading en de onderste plaat een negatieve lading.

Figuur 8 Een condensator aangesloten op een spanningsbron.

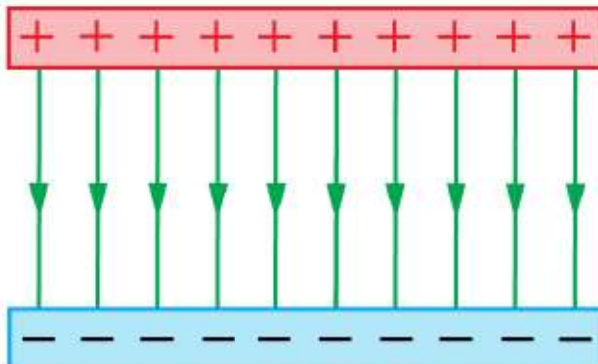


De negatieve lading van de onderste plaat zorgt ervoor dat het steeds moeilijker wordt om nog meer elektronen van de bovenste naar de onderste plaat te pompen. Elektronen worden immers afgestoten door de onderste plaat, die een steeds grotere negatieve lading krijgt. Op een bepaald moment houdt het pompen van elektronen op. De condensator is dan helemaal opgeladen. Zie figuur 9. Tussen de platen van een condensator bevindt zich een **homogeen E-veld**. In figuur 10 zijn de veldlijnen getekend.

Figuur 9 Opgeladen condensator. Tussen de positief en negatief geladen plaat bevindt zich een homogeen E-veld.



Figuur 10 Homogeen E-veld.

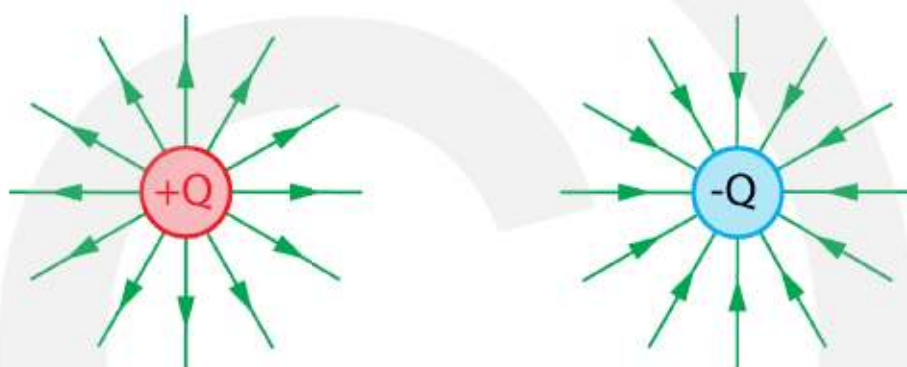


Homogeen E-veld

- de veldlijnen zijn recht
- de veldlijnen zijn evenwijdig aan elkaar
- de dichtheid van de veldlijnen is overal even groot

Radiaal veld

Om een bolvormig geladen voorwerp bevindt zich een **radiaal** E-veld. Zie figuur 5. Dichtbij het voorwerp is de veldsterkte groter dan verder weg, wat wordt weergegeven door de veldlijnen dichter bij elkaar te tekenen.



Figuur 11 Radiaal E-veld.

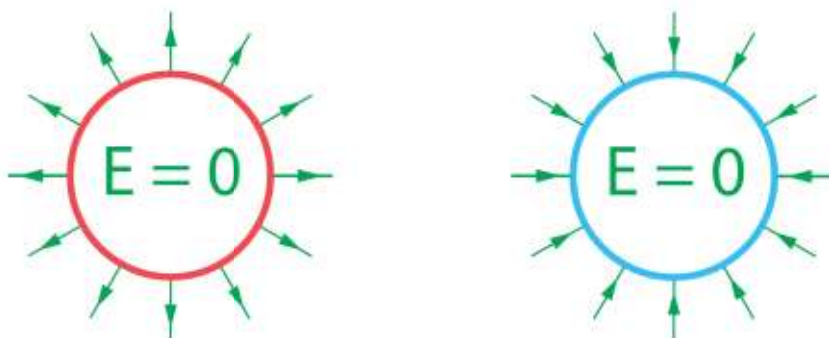
Radiaal E-veld

- de veldlijnen zijn recht
- verlengde veldlijnen komen samen in één punt
- de dichtheid van de veldlijnen neemt naar buiten toe af

De E-veldsterkte in een holle geleider

De elektrische veldsterkte in een holle geleider is altijd nul. Bij een geleider verdeelt de lading zich zodanig over het buitenoppervlak dat binnenin de veldsterkte nul is.

De elektrische veldsterkte in een holle geleider is altijd nul.



Figuur 12 Binnen in een holle geleider is de elektrische veldsterkte altijd nul.

Deze eigenschap wordt toegepast in een **Faraday kooi**. Dit is een metalen kooi die om gevoelige meetapparatuur wordt geplaatst. Door de Faraday kooi kunnen elektrische velden van buiten geen storing binnen in de kooi veroorzaken. De elektronica in de kooi is daardoor afgeschermd van storende invloeden van buiten. Als je zelf in een Faraday kooi staat ben je beschermd tegen elektrische velden, zoals te zien in figuur 13.



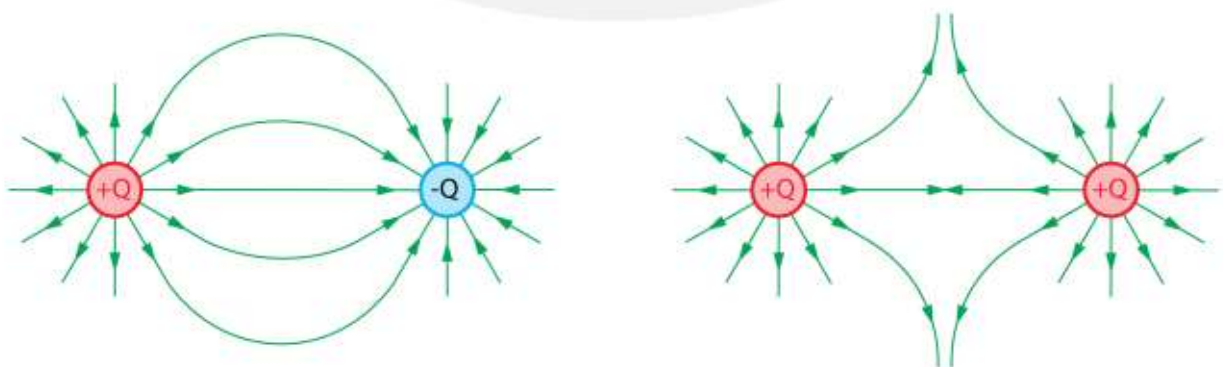
Figuur 13 Demonstratie van een Faraday kooi. Zelfs zeer sterke ontladingen zijn ongevaarlijk, omdat het E-veld niet in de kooi kan binnendringen.

Elektrische velden optellen

Omdat je elektrische krachtvectoren $\vec{F}_e$ bij elkaar mag optellen om de resulterende elektrische kracht te vinden kun je ook elektrische veldvectoren $\vec{E}$ bij elkaar optellen. Je moet daarbij rekening houden met de richting. Bij het optellen gebruik je de kopstaartmethode of de parallellogrammethode, zoals je in het hoofdstuk over kracht hebt geleerd.

Als twee elektrische velden $\vec{E}_1$ en $\vec{E}_2$ elkaar overlappen is het resulterende E-veld de vectorsom van beide velden.

$$\Sigma \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$



Figuur 14 Optellen van de E-velden. De veldlijnen geven de richting aan van de resulterende kracht

12.2 Elektrische energie

Arbeid en energie in een homogeen elektrisch veld

Op een voorwerp met lading q dat zich in een elektrisch veld met sterkte $\vec{E}$ bevindt wordt een elektrische kracht uitgeoefend gegeven door $\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$. Als het voorwerp wordt verplaatst verricht de elektrische kracht arbeid. Deze verrichte arbeid die door is gelijk aan de verandering van de elektrische energie.

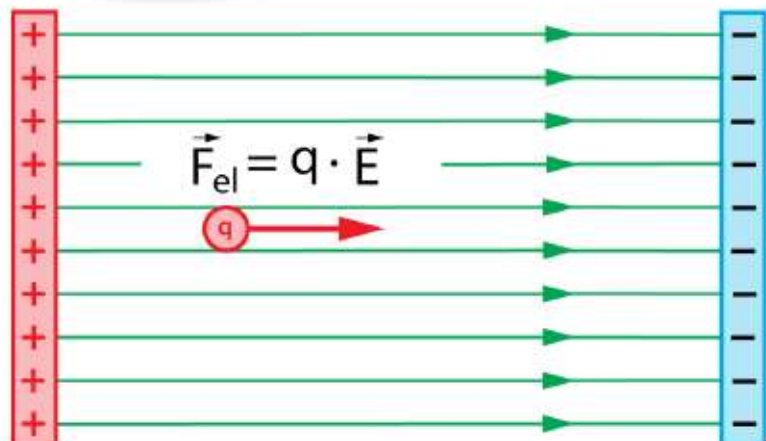
De elektrische energie verandert als een elektrische kracht arbeid verricht.

We beschouwen een homogeen E-veld, zoals in figuur 15. In dit veld zijn de veldlijnen recht en evenwijdig aan elkaar. In dat geval geldt:

$$W = F_{el} \cdot s \cdot \cos \alpha \rightarrow E_{el} = q \cdot E \cdot s \cdot \cos \alpha$$

- W is de arbeid in joule (J)
- F_{el} is de elektrische kracht in newton (N)
- s is de afstand waarover het voorwerp is verplaatst in meter (m)
- α is de hoek tussen de kracht en de verplaatsing in graden (°)
- E_{el} is de elektrische energie in joule (J)
- q is de lading van het voorwerp in coulomb (C)
- E is de sterkte van het E-veld in newton per coulomb (N/C)

In figuur 15 zie je een deeltje in een homogeen E-veld. De elektrische kracht heeft dezelfde richting als het E-veld: $\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$. Voor de arbeid die op het deeltje wordt verricht geldt: $W = F_{el} \cdot s \rightarrow E_{el} = q \cdot E \cdot s$.



Figuur 15 Een deeltje met lading q bevindt zich in een homogeen elektrisch veld met veldsterkte E . De elektrische kracht op dit deeltje is $\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$.

Zoals je ziet gebruiken we hoofdletter E voor zowel de elektrische veldsterkte als voor de elektrische energie. Dit is natuurlijk verwarrend en vandaar de volgende afspraak:

E is de elektrische veldsterkte in newton per coulomb (N/C)

E_{el} is de elektrische energie in joule (J)

Elektrische energie wordt omgezet in een andere energievorm (bijvoorbeeld kinetische energie) als $\vec{s}$ dezelfde richting heeft als $\vec{F}_{el}$. In dat geval neemt de elektrische energie van het voorwerp af. We kunnen een geladen voorwerp elektrische energie geven door het tegen de richting van de elektrische kracht te verplaatsen.

E_{el} neemt af als $\vec{s}$ en $\vec{F}_{el}$ dezelfde richting hebben.

Zijn $\vec{s}$ en $\vec{F}_{el}$ tegengesteld gericht dan neemt E_{el} toe.

OPMERKING

Als $\vec{s}$ en $\vec{F}_{el}$ niet dezelfde richting hebben moet je de kracht splitsen in een component evenwijdig aan $\vec{s}$ en een component loodrecht op $\vec{s}$. Alleen de component van $\vec{F}_{el}$ evenwijdig aan $\vec{s}$ verricht arbeid. Voor hoek α tussen $\vec{F}_{el}$ en $\vec{s}$ geldt:

$$W = F_{el} \cdot s \cdot \cos \alpha \rightarrow E_{el} = q \cdot E \cdot s \cdot \cos \alpha$$

OPMERKING

Als het E-veld niet homogeen is verandert F_{el} tijdens de verplaatsing. Om de arbeid uit te rekenen moet je daarom de gemiddelde kracht invullen:

$$W = F_{el\text{ gem}} \cdot s \rightarrow E_{el} = q \cdot E_{\text{gem}} \cdot s$$

Elektrische spanning en elektrische energie

Zoals altijd hangt de verandering van energie alleen af van het begin en het eind. Hoe je van begin naar eind gaat maakt niet uit. Brengen we in figuur 15 een lading q van de linkerplaat naar de rechterplaat dan verandert de elektrische energie met $E_{el} = q \cdot E \cdot d$, waarbij d de afstand tussen de platen is. De route die het deeltje neemt heeft geen invloed op de uitkomst.

Vanwege deze eigenschap van energie is het handig om de grootheid **spanning** in te voeren. Nemen we twee punten A en B en brengen we lading q van A naar B dan geldt voor de verandering van elektrische energie: $\Delta E_{el} = E_{elA} - E_{elB} = q \cdot E \cdot s_{AB}$.

De route die genomen wordt van A naar B maakt niet uit en we kunnen daarom spreken van een spanningsverschil U_{AB} tussen A en B. Hiervoor geldt:

$$U_{AB} = E \cdot s_{AB}$$

- U_{AB} is de spanning tussen A en B in volt (V)
- E is de elektrische veldsterkte in newton per coulomb (N/C)
- s_{AB} is de afstand tussen A en B langs een elektrische veldlijn in meter (m)

Uit bovenstaande formule kunnen we afleiden dat de elektrische veldsterkte ook kan worden uitgedrukt in volt per meter.

De eenheid van elektrische veldsterkte: N/C of V/m.

Eén newton per coulomb (N/C) is gelijk aan één volt per meter (V/m).

Voor het verplaatsen van een elektrisch geladen voorwerp vinden we:

$$\Delta E_{el} = q \cdot U$$

- ΔE_{el} is de verandering van elektrische energie in joule (J)
- q is de lading van het voorwerp in coulomb (C)
- U is de spanning in volt (V)

VOORBEELD elektrisch geladen kogeltje

Een geladen kogeltje met een lading van 5,0 mC bevindt zich in een homogeen elektrisch veld met een sterkte van 3000 V/m.

Bereken hoeveel arbeid het kost om het kogeltje 40 cm te verplaatsen tegen de richting van het veld in.

- $W = F_{el} \cdot s \rightarrow W = q \cdot E \cdot s$
- $W = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 0,4 = 6,0 \text{ J}$

Bereken de spanning tussen begin en eindplaats.

- $\Delta E_{el} = q \cdot U$
- $6 = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot U \rightarrow U = 1200 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ V}$
- MERK OP 3000 volt per meter = 1200 volt per 0,40 meter → KLOPT

VOORBEELD batterij

In een batterij is het spanningsverschil 1,5 V. Als er een lampje wordt aangesloten gaat er stroom lopen, waarbij de elektrische energie van de elektronen afneemt. Tussen de contacten van het gloeilampje bevindt zich een isolatiemantel van 0,50 mm dik.

Beredeneer waarom de elektrische energie van de elektronen afneemt.

- de elektronen bewegen van de – naar + pool
- F_{el} heeft dezelfde richting als de verplaatsing
- hierdoor neemt de elektrische energie van de elektronen af

Bereken de afname van elektrische energie van één elektron

- $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ | $U = 1,5 \text{ V}$ | $\Delta E_{el} = \dots \text{ J}$
- $\Delta E_{el} = q \cdot U$
- $\Delta E_{el} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 = 2,4033 \cdot 10^{-19} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Bereken de grootte van het elektrische veld in de isolatiemantel.

- $U = 1,5 \text{ V}$ | $s = \Delta x = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ | $E = \dots \text{ N/C}$
- $U = E \cdot s$
- $1,5 = E \cdot 0,50 \cdot 10^{-3} \rightarrow E = 3000 = 3,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$

VOORBEELD straalkachel

Een straalkachel is aangesloten op het lichtnet ($U = 230 \text{ V}$). Bij het branden gaat er 8,0 A door de gloeidraad.

Bereken de elektrisch energie die de straalkachel per seconde omzet in warmte.

- 8,0 A $\rightarrow$ per seconde wordt er 8,0 C lading verplaatst
- $q = 8,0 \cdot \text{C}$ | $U = 230 \text{ V}$ | $E_{el} = \dots \text{ J}$
- $\Delta E_{el} = q \cdot U$
- $\Delta E_{el} = 8,0 \cdot 230 = 1840 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ J}$

12.3 Deeltjes versnellen

Geladen deeltjes versnellen

Met een elektrische kracht kan een elektrisch geladen deeltje worden versneld. Hierbij wordt elektrische energie omgezet in kinetische energie. Als alleen de elektrische kracht arbeid verricht geldt:

$$\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U = \Delta E_{\text{K}}$$

- ΔE_{el} is de verandering van de elektrische energie in joule (J)
- q is de lading van het deeltje in coulomb (C)
- U is het spanningsverschil tussen begin- en eindpunt in volt (V)
- ΔE_{K} is de verandering van de kinetische energie in joule (J)

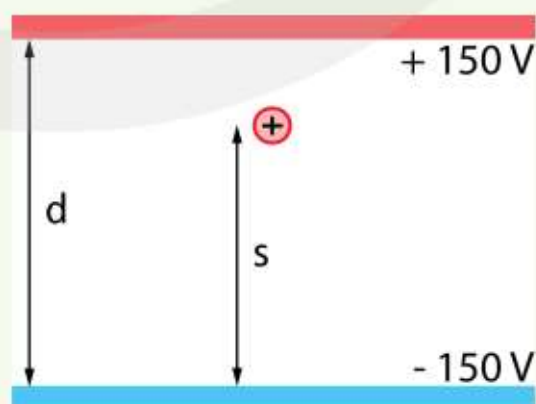
Voor de verandering van kinetische energie geldt:

$$\Delta E_{\text{K}} = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{begin}}^2$$

- ΔE_{K} is de verandering van de kinetische energie in joule (J)
- m is de massa van het deeltje in kilogram (kg)
- v_{eind} is de eindsnelheid in meter per seconde (m/s)
- v_{begin} is de beginsnelheid in meter per seconde (m/s)

VOORBEELD versnellen van lading in een condensator

Bij condensator is het spanningsverschil tussen de geladen platen 300 V. De afstand tussen de platen is 4,0 mm.



Figuur 16

Een deeltje met een lading van $40 \mu\text{C}$ en een massa van $0,20 \text{ mg}$ wordt $3,0 \text{ mm}$ boven de onderste plaat losgelaten. Zie figuur 16.

Bereken de snelheid waarmee het deeltje de onderste plaat treft.

- $U = \frac{3}{4} \cdot 300 = 225 \text{ V} \quad | \quad q = 40 \cdot 10^{-8} \text{ C} \quad | \quad \Delta E_K = \dots \text{ J}$
- $\Delta E_{el} = q \cdot U = \Delta E_K$
- $40 \cdot 10^{-8} \cdot 225 = \Delta E_K \rightarrow \Delta E_K = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
- $\Delta E_K = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad | \quad m = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \quad | \quad v_{\text{begin}} = 0 \text{ m/s} \quad | \quad v_{\text{eind}} = \dots \text{ m/s}$
- $\Delta E_K = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{begin}}^2 \quad (v_{\text{begin}} = 0)$
- $9,0 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 300 = 3,0 \cdot 10^2 \text{ m/s}$

De elektronvolt als eenheid van energie

De lading van een proton is de kleinste mogelijke elektrische lading en wordt daarom het **elementaire ladingskwantum** genoemd met als symbool e . De lading van een elektron even groot maar heeft een minteken. De verandering van de elektrische energie als het elementaire ladingskwantum een spanning van één volt doorloopt is gelijk aan één **elektronvolt**: $\Delta E_{el} = q \cdot U \rightarrow \Delta E_{el} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Eén elektronvolt (eV) is de verandering van elektrische energie als het elementaire ladingskwantum een spanningsverschil van één volt doorloopt.

$$1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

VOORBEELD het versnellen van een proton

Een proton wordt met een spanningsverschil van 5000 V versnelt. De beginsnelheid is verwaarloosbaar klein.

Bereken hoeveel de energie van het proton verandert in eV.

- $q = e \quad | \quad U = 5000 \text{ V} \quad | \quad \Delta E_{el} = \dots \text{ eV}$
- $\Delta E_{el} = e \cdot U \rightarrow \Delta E_{el} = 5000 \text{ eV}$

Bereken de eindsnelheid van het proton.

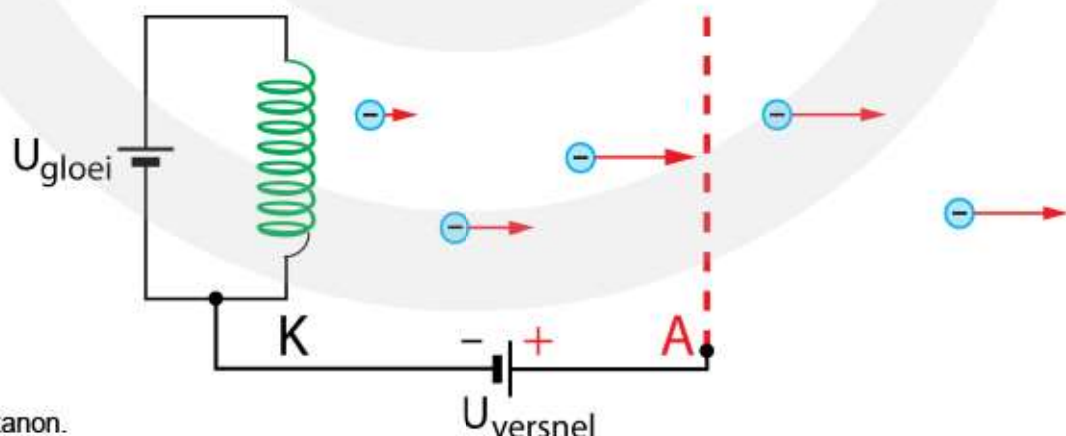
- $\Delta E_{el} = 5000 \text{ eV} \rightarrow \Delta E_{el} = 5000 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} = 8,0109 \cdot 10^{-16} \text{ J}$
- $\Delta E_{el} = 8,0109 \cdot 10^{-16} \text{ J} \quad | \quad m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad | \quad v_{\text{begin}} = 0 \text{ m/s}$
- $\Delta E_{el} = \Delta E_K = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{begin}}^2$
- $8,0109 \cdot 10^{-16} = \frac{1}{2} \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 9,7872 \cdot 10^5 = 9,8 \cdot 10^5 \text{ m/s}$

Aan het bovenstaande voorbeeld is te zien dat atomaire deeltjes tot zeer grote snelheden kunnen worden versneld. Dit komt omdat de massa erg klein en de elektrische kracht relatief groot. Omdat $\Sigma F = m \cdot a$ geeft een grote kracht in combinatie met een kleine massa een grote versnelling. In korte tijd verandert de snelheid sterk. Omdat de massa van een elektron 1823 keer zo klein is als de massa van een proton kunnen elektronen tot zeer grote snelheden worden versneld.

Het elektronenkanon

In een elektronenkanon worden elektronen versneld, waarbij ze zeer hoge snelheden kunnen bereiken. In figuur 17 zie je de werking van een elektronenkanon. Het werkt als volgt.

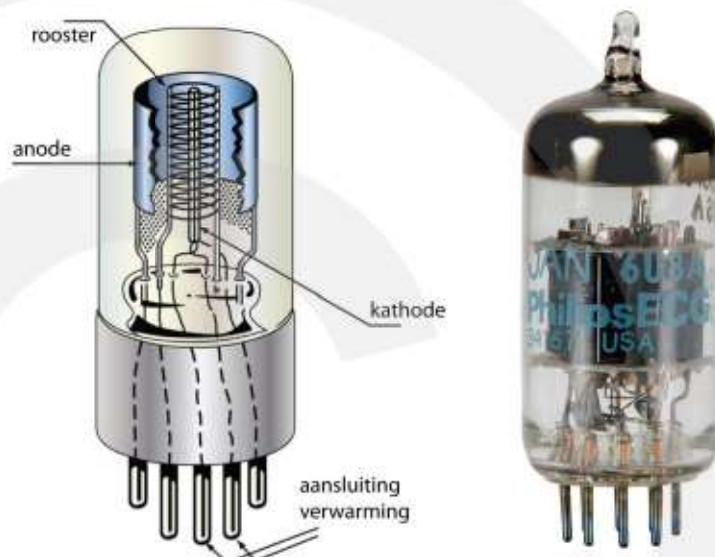
- een elektronenkanon bevindt zich in een **vacuümbuis** zodat elektronen ongehinderd kunnen bewegen
- een **gloeidraad** en een **metaalgaasje** worden aangesloten op een spanningsbron waarmee een spanning U_{versnel} wordt aangebracht
- de gloeidraad krijgt een negatieve spanning en wordt de **kathode** genoemd
- het metaalgaasje krijgt een positieve spanning en wordt de **anode** genoemd
- met elektrische stroom wordt de gloeidraad op hoge temperatuur gebracht
- door de hoge temperatuur raken enkele elektronen los uit de gloeidraad
- de elektronen worden versneld in het E-veld en gaan van de kathode K naar de anode A (vroeger werden deze elektronen **kathodestrallen** genoemd)
- in het begin hebben de elektronen **elektrische energie**: $E_{\text{el}} = q \cdot U_{\text{versnel}}$
- aan het eind hebben de elektronen **kinetische energie**: $E_{\text{K}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- behoud van energie: $\Delta E_{\text{el}} = \Delta E_{\text{K}} \rightarrow q \cdot U_{\text{versnel}} = \frac{1}{2} m_e \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m_e \cdot v_{\text{begin}}^2$



Figuur 17
Elektronenkanon.

Een elektronenkanon wordt in 1904 voor het eerst toegepast als **diode**, waarin het proces van figuur 17 plaatsvindt. Een diode zorgt ervoor dat stroom maar in één richting plaatsvindt - elektronen bewegen van K naar A - en nooit in de tegenovergestelde richting. Een diode wordt daarom toegepast als **gelijkrichter**, waarmee wisselstroom kan worden omgezet in gelijkstroom.

In 1906 wordt de **triode** uitgevonden. Tussen de kathode en de anode bevindt zich een rooster waarop een spanning kan worden aangebracht. Met deze derde elektrode (vandaar de naam triode) kunnen de elektronen worden afgeremd. Een kleine verandering van de roosterspanning heeft een grote verandering van de elektronenstroom tot gevolg. Vandaar dat een triode kan worden gebruikt als **versterker**. In figuur 18 zie je de binnenkant van een triode en een triode vacuümbuis zoals toegepast als versterker. De triode is de voorloper van de transistor waar op een heel andere manier een elektronenstroom kan worden versterkt of verzwakt.



Figuur 18 Vacuümbuis triode.

In 1925 wordt de **televisie** uitgevonden. Hierin bevindt zich een **beeldbuis**, met daarin een elektronenkanon. Een beeldbuis wordt daarom een kathodestraalbuis genoemd (Engels: cathode ray tube, CRT). De werking van een kathodestraal monitor wordt hieronder uitgelegd.

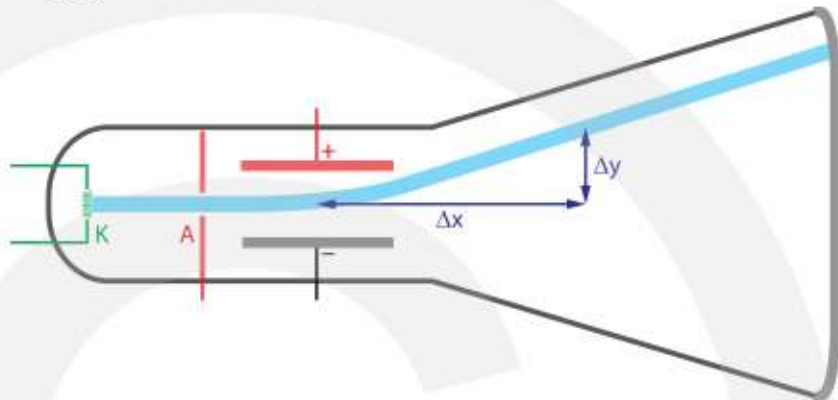
In 1931 wordt de **elektronenmicroscop** uitgevonden. Ook hierin bevindt zich een elektronenkanon met een versnelling tussen 10^3 en 10^5 volt. Met een elektronenmicroscop kunnen voorwerpen tot tien miljoen keer worden vergroot. Met een lichtmicroscop kan maximaal een vergroting van tweeduizend worden bereikt.

Kathodestraal monitor (CRT)

In een kathodestraal monitor (beeldbuis) worden elektronen met een elektronenkanon versneld. De elektronen bewegen tussen horizontaal en verticaal opgestelde condensatorplaten waardoor ze worden afgebogen. Uiteindelijk botsen ze tegen een scherm waarop fluorescerende stof is aangebracht. Op de plaats waar de elektronenbundel het scherm raakt ontstaat een lichtpuntje.



In figuur 19 zie je de werking van een beeldbuis. Tussen de kathode K en de anode A is een spanning U_{versnel} aangelegd, waardoor de elektronen worden versneld. De bundel gaat tussen horizontaal- en verticaal opgestelde platen waarop een spanning U_{afbuig} is aangelegd. Hierdoor buigt de bundel af. Door de afbuigspanning te variëren kan de bundel worden gericht. Punt voor punt wordt het scherm bestraald, zodat een afbeelding ontstaat. Als ieder punt van het scherm bijvoorbeeld 30 keer per seconde wordt bestraald kan een bewegend beeld worden gemaakt. In figuur 19 zijn alleen de horizontale afbuigplaten weergegeven.



Figuur 19 Kathodestraal beeldbuis.

VOORBEELD beeldbuis

In een beeldbuis doorlopen de elektronen een spanningsverschil van 20 kV. De beginsnelheid van de elektronen is verwaarloosbaar.

Bereken de snelheid waarmee de elektronen door de anode gaan.

- $U = -2,0 \cdot 10^4 \text{ V} \quad | \quad q = -e = -1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- $E_{\text{el}} = q \cdot U \rightarrow E_{\text{el}} = -1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot -2,0 \cdot 10^4 = 3,20435 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- $E_{\text{el}} = 3,20435 \cdot 10^{-15} \text{ J} \quad | \quad m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad | \quad v_{\text{begin}} = 0 \text{ m/s}$
- $E_{\text{el}} = \Delta E_K \rightarrow E_{\text{el}} = \frac{1}{2} m_e \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m_e \cdot v_{\text{begin}}^2$
- $3,20435 \cdot 10^{-15} = \frac{1}{2} \cdot 9,1094 \cdot 10^{-31} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 8,38766 \cdot 10^7 \text{ m/s}$
- $v_{\text{eind}} = 8,4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

Nadat ze zijn versneld worden de elektronen afgebogen. De afbuigspanning is 400 volt.

Leg uit of de snelheid van de elektronen hierdoor verandert.

- door de afbuigplaten krijgen de elektronen ook een verticale snelheid
- de snelheid wordt groter

We willen de elektronen een afbuiging van 20° geven.

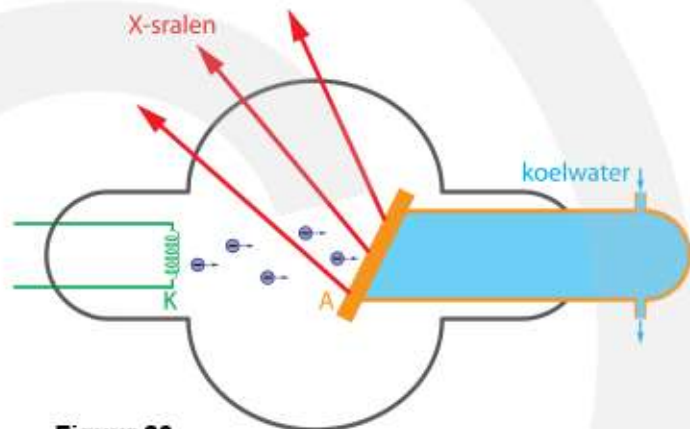
Bereken de afbuigspanning U_{afbuig} die hiervoor nodig is.

- afbuigingshoek $\alpha \rightarrow \tan \alpha = \frac{v_{\text{afbuig}}}{v_{\text{versnel}}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{zie figuur 19})$

- $v_{\text{afbuig}} = v_{\text{versnel}} \cdot \tan \alpha \rightarrow v_{\text{afbuig}} = 8,38766 \cdot 10^7 \cdot \tan 20 = 3,05286 \cdot 10^7 \text{ m/s}$
- afbuigen: $\Delta E_K = \frac{1}{2} m_e \cdot v_{\text{afbuig}}^2 \rightarrow \Delta E_K = \frac{1}{2} \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot (3,05286 \cdot 10^7)^2$
- $\Delta E_K = 4,24494 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ en $\Delta E_K = q \cdot U_{\text{afbuig}} \rightarrow q \cdot U_{\text{afbuig}} = 4,24494 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
- $U_{\text{afbuig}} = \frac{4,24494 \cdot 10^{-18}}{1,60218 \cdot 10^{-19}} = 2,64949 \cdot 10^3 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ V}$

Röntgenbuis

In een röntgenbuis zit een elektronenkanon dat elektronen versnelt tot ze een kinetische energie hebben tussen 10 keV en 100 keV. De elektronen botsen op een watergekoelde anode, van bijvoorbeeld koper. Elektronen uit de binnenste schillen van koper atomen worden losgeslagen. Dit levert röntgenstraling op. Zie figuur 20.



Figuur 20

Lineaire deeltjesversneller

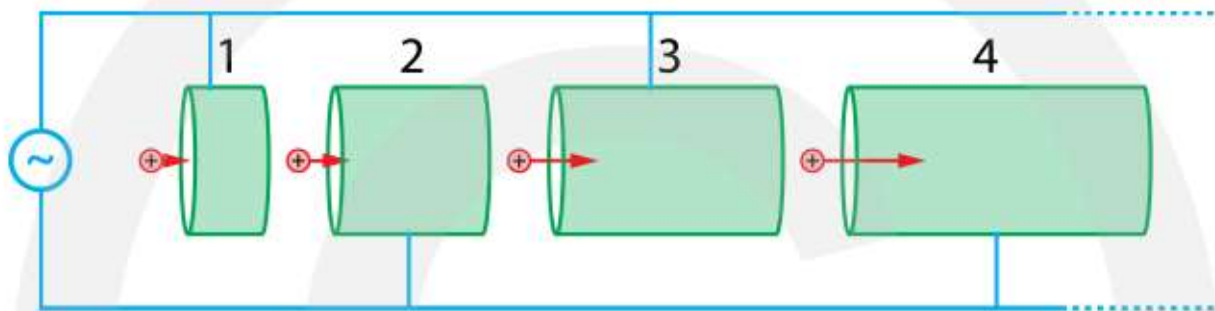
Lineaire deeltjesversnellers worden gebruikt om het splijten van atoomkernen te onderzoeken. Om atoomkernen te splijten is veel energie nodig, wat kan worden bereikt door geladen deeltjes, zoals elektronen, protonen en ionen een zeer hoge snelheid te geven en daarna op een atoomkern te laten botsen. Deeltjesversnellers worden ook gebruikt voor het versnellen van elektronen waarmee kankerpatiënten worden bestraald.



Figuur 21 Elektronenversneller in een ziekenhuis voor radiotherapie.

Om elektrisch geladen deeltjes een zeer grote snelheid te geven worden ze in stappen versneld. Bij iedere stap neemt de kinetische energie met een vaste hoeveelheid toe. De versneller bestaat uit metalen buizen die steeds langer worden. Tussen de buizen wordt een spanningsverschil aangelegd. Als de deeltjes zich tussen twee buizen bevinden worden ze versneld. Zitten ze binnenin een buis, dan wordt de spanning van + naar – omgekeerd. Komen ze daarna uit de buis, dan heeft het E-veld weer de goede richting en worden ze opnieuw versneld.

Om dit te bereiken moet de aangelegde spanning een wisselspanning zijn, waarbij de oneven buizen 1, 3, 5, ... zijn aangesloten op de ene pool en de even buizen 2, 4, 6, ... op de andere pool, zie figuur 22.



Figuur 22 Lineaire deeltjesversneller.

In een lineaire versneller neemt de kinetische energie, en dus de snelheid, van geladen deeltjes in stappen toe. In het begin is de snelheid verwaarloosbaar klein. Stel dat we een groepje protonen gaan versnellen. Als de protonen buis 1 naderen worden de buizen 1, 3, 5, 7, ... negatief en buizen 2, 4, 6, 8, ... positief gemaakt. De protonen worden nu door buis 1 aangetrokken waardoor ze versnellen. Als de protonen binnen in buis 1 zijn wordt de spanning omgekeerd, even buizen worden negatief en oneven buizen positief. Zodra de protonen buis 1 verlaten worden ze door buis 2 aangetrokken en krijgen ze opnieuw een versnelling. Terwijl de protonen in buis 2 zitten wordt de spanning opnieuw omgekeerd, etc. Dit herhaalt zich een aantal keer, zodat de snelheid van de protonen aan het einde enorm groot is. Het aantal buizen is gelijk aan het aantal stappen waarmee de deeltjes worden versneld. Je kunt ook een deeltjesversneller maken met even lange buizen. In dat geval moet je de frequentie van de wisselspanning tijdens het versnellen vergroten.



Figuur 23 Lineaire elektronenversneller gebruikt voor bestraling bij radiotherapie. Bovenin zie je de elektronenversneller die in dit geval uit even lange buisjes bestaat.

VOORBEELD lineaire protonenversneller

In een lineaire protonenversneller worden protonen in 50 stappen versneld. Het spanningsverschil tussen de buizen is steeds 10 kV.

Bereken de kinetische energie die de protonen in deze versneller krijgen.

- $U = 1,0 \cdot 10^4 \text{ V} \quad | \quad q = e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- $E_{\text{el}} = q \cdot U \rightarrow E_{\text{el}} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 1,0 \cdot 10^4 = 1,6022 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- per stap neemt de kinetische energie met $1,6022 \cdot 10^{-15} \text{ J}$ toe
- 50 stappen $\rightarrow \Delta E_{\text{k}} = 50 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-15} = 8,011 \cdot 10^{-14} = 8,0 \cdot 10^{-14} \text{ J}$

OOK GOED

- per stap neemt de energie $1,0 \cdot 10^4 \text{ eV}$ toe
- na 50 stappen $\Delta E_{\text{k}} = 50 \cdot 1,0 \cdot 10^4 = 5,0 \cdot 10^5 \text{ eV}$
- dit is $\Delta E_{\text{k}} = 5,0 \cdot 10^5 \text{ eV} = 5,0 \cdot 10^5 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} = 8,0 \cdot 10^{-14} \text{ J}$

12.4 Het magnetisch veld

Permanente magneten

Magneten hebben bijzondere eigenschappen. Ze trekken ijzeren voorwerpen wél aan maar houten of plastic voorwerpen niet. Een magneet trekt ieder ijzeren voorwerp aan, behalve als dit voorwerp ook een magneet is. Dan kan de kracht zowel **aantrek-kend** als **afstotend** zijn. De aantrekkende kracht verandert in een afstotende kracht als één van de magneten wordt omgedraaid. Net als bij de elektrische kracht gaat ook de magnetische kracht door de lege ruimte heen.

Hieruit concluderen we dat magneten twee polen hebben, een **noordpool** en een **zuidpool**. Magnetische noordpolen stoten elkaar af. Hetzelfde geldt voor magnetische zuidpolen. Noord- en zuidpolen trekken elkaar aan. De namen noordpool en zuidpool zijn bedacht omdat als een magneet vrij kan draaien één kant naar de geografische Noordpool van de aarde wordt gericht en de ander kant naar de geografische Zuidpool. De kant die zich naar de geografische Noordpool richt is de noordpool van de magneet. De andere pool is de zuidpool.

Het is niet mogelijk een magneet te maken met maar één pool. Als je een magneet tussen de noordpool en de zuidpool doormidden breekt krijg je twee magneten met ieder een noordpool en een zuidpool. Hieronder vind je de belangrijkste eigenschappen van permanente magneten.

Permanente magneten

- Een permanente magneet blijft gedurende lange tijd magnetisch. Van maar enkele materialen kan een permanente magneet worden gemaakt.
- Een permanente magneet trekt magnetisch materiaal aan.
- Een magneet heeft altijd een noordpool en een zuidpool.
- Magnetische noordpolen stoten elkaar af. Hetzelfde geldt voor magnetische zuidpolen. Noord- en zuidpolen trekken elkaar aan.
- Als je een magneet tussen de noordpool en de zuidpool doormidden breekt krijg je twee magneten met ieder een noordpool en een zuidpool.

Van maar weinig materialen kunnen **permanente magneten** worden gemaakt. Bekende magnetische elementaire metalen zijn ijzer, nikkel en kobalt. Metaaloxiden, zoals Fe_3O_4 (magnetiet) en CrO_2 zijn ook magnetisch. In 1980 is ontdekt dat van legeringen met zeldzame aardmetalen ook permanente magneten gemaakt kunnen worden. De sterkste magneten worden nu gemaakt van **Nd₂Fe₁₄B** (een legering van neodymium, ijzer en boor) en **SmCo₅** (een legering van samarium en kobalt).

Atomaire oorzaak van magnetisme

Magnetisch wordt voornamelijk veroorzaakt door de elektronen. Elektronen zijn minuscule magneetjes. Het lijkt wel of ze, net als de aarde, om hun eigen as tollen. Dit rondtollen wordt de **elektronspin** genoemd. Behalve het rondtollen om hun as bewegen elektronen ook om de atoomkern. Ook dit draagt bij aan het magnetisme. Verder in dit hoofdstuk leer je dat magnetisme wordt veroorzaakt door bewegende lading. Elektronen spelen hierbij een hoofdrol. Zie figuur 24.



Figuur 24 Magnetisme wordt voornamelijk veroorzaakt door de inwendige "spin" van de elektronen (links) en doordat elektronen om de atoomkernen bewegen (rechts).

Magnetische influentie

We bekijken het effect van een permanente magneet op ijzeren spijkers. Als spijker 1 in de buurt van een permanente magneet komt wordt het aangetrokken. Als nu spijker 2 bij het uiteinde van spijker 1 komt wordt hij door spijker 1 aangetrokken. Spijker 2 zal spijker 3 aantrekken zodra dat in de buurt komt. Uiteindelijk ontstaat een keten van spijkers die kop–staart zijn georiënteerd. Hieruit concluderen we dat een ijzeren spijker in de buurt van een magneet zelf tijdelijk ook een magneet wordt en een andere spijker kan aantrekken. Deze beïnvloeding heet **influentie**. Hoe groter de afstand is hoe zwakker de influentie wordt.



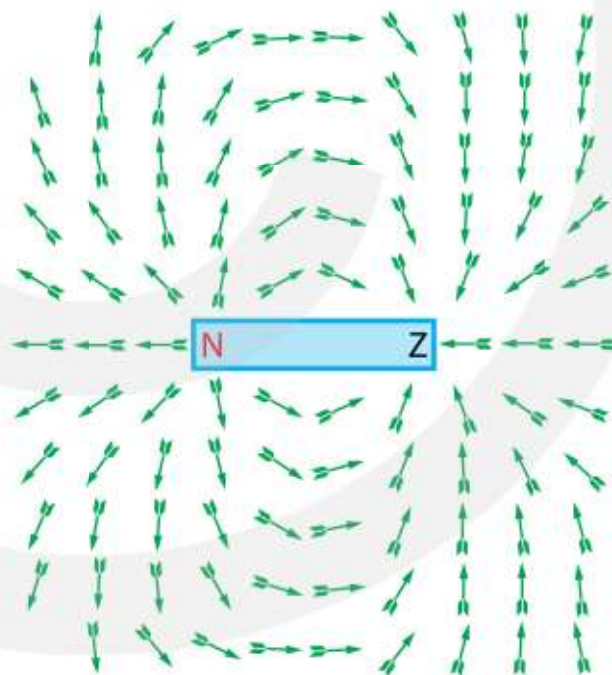
Figuur 25 Magnetische influentie.

Zodra de permanente magneet wordt verwijderd verliezen alle spijkers hun magnetisme en valt de keten uit elkaar. De spijkers waren slechts **tijdelijk magnetisch**. Het verschijnsel dat een materiaal tijdelijk magnetisch wordt onder invloed van een magneet heet **magnetische influentie**.

Door magnetische influentie wordt een materiaal tijdelijk magnetisch als het in de buurt van een permanente magneet komt.

Magnetisch veld

Het verschijnsel influentie toont aan dat magnetische krachten door de lege ruimte op afstand werken. Net als bij elektrische krachten is er ook nu een veld aanwezig, het **magnetisch veld: B-veld**. Om een magneet bevindt zich een magnetisch veld. Als een tweede magneet zich in dit veld bevindt oefenen de magneten krachten op elkaar uit. De richting van de magnetische kracht op iedere plaats in de ruimte wordt gegeven door magnetische veldlijnen. Deze veldlijnen kunnen zichtbaar gemaakt worden door draaibare kompasnaaldjes in een plat vlak te plaatsen. Als een staafmagneet in de buurt komt richten de kompasnaaldjes zich in het magnetisch veld van de staafmagneet. De magnetische velden die de kompasnaaldjes zelf veroorzaken zijn verwaarloosbaar klein ten opzichte van het magnetische veld van de staafmagneet.

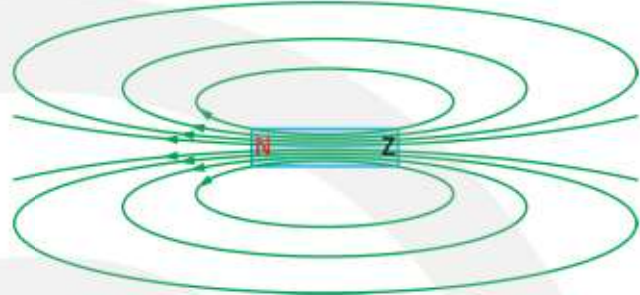
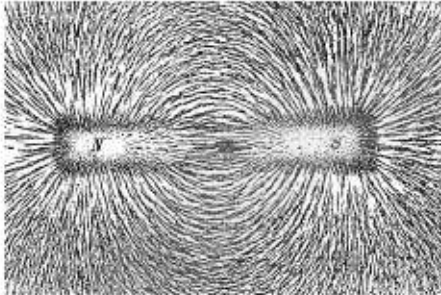


Figuur 26 Kompasnaaldjes richten zich in het B-veld en geven daarmee de magnetische veldlijnen aan.

Magnetische veldlijnen

Op een magneet die zich in een magnetisch veld bevindt werkt een magnetische kracht. Deze kracht is een vector en heeft een grootte en een richting. Om te bepalen wat de richting van de magnetische kracht is brengen we een kleine **proefmagneet**, in het B-veld. De magnetische kracht zorgt ervoor dat de proefmagneet zich gaat oriënteren. Op iedere plaats is de richting van de proefmagneet gelijk aan de richting van de magnetische kracht. De lijnen die ontstaan door de georiënteerde proefmagneten met elkaar te verbinden zijn de magnetische veldlijnen. Magnetische veldlijnen kunnen ook zichtbaar gemaakt worden door ijzervijlsel op een doorzichtige plaat te

strooien en eronder een permanente staafmagneet te houden. Vanwege magnetische inductie worden de ijzerkorrels proefmagneetjes die zich in het B-veld gaan oriënteren. De noordpool van een ijzerkorrel trekt de zuidpool van een naburige korrel aan. Hierdoor rijgen ze zich als kralen aan elkaar en vormen ze lijnen. Deze lijnen hebben dezelfde richting als de magnetische veldlijnen.



Figuur 27 Magnetische veldlijnen zichtbaar gemaakt. Rechts een schematische illustratie.

Eigenschappen van een magnetisch veld (B-veld)

- Het magnetische veld is een vectorgrootheid en heeft een grootte en een richting.
- De sterkte van het magnetisch veld heet de magnetische inductie.
- Het symbool voor magnetische inductie is $\vec{B}$.
- De eenheid van magnetische inductie is de tesla (T).
- Een magnetische veldlijn is de lijn waarlangs een proefmagneet zich oriënteert.
- De richting van het magnetische veld is de richting van de noordpool van een proefmagneet.
- Door iedere punt van de ruimte gaat één magnetische veldlijn.
- Magnetische veldlijnen zijn gesloten krommen.
- Buiten de magneet lopen de veldlijnen van de noord- naar de zuidpool.
- Binnenin de magneet lopen de veldlijnen van de zuid- naar de noordpool.
- Veldlijnen komen niet altijd loodrecht uit een magneet.
- Veldlijnen snijden elkaar niet.
- In een tekening geef je de sterkte van het B-veld aan door de afstand tussen de getekende veldlijnen groter of kleiner te maken. Hoe kleiner de afstand tussen de veldlijnen is hoe sterker het B-veld is.

Homogeen magnetisch veld

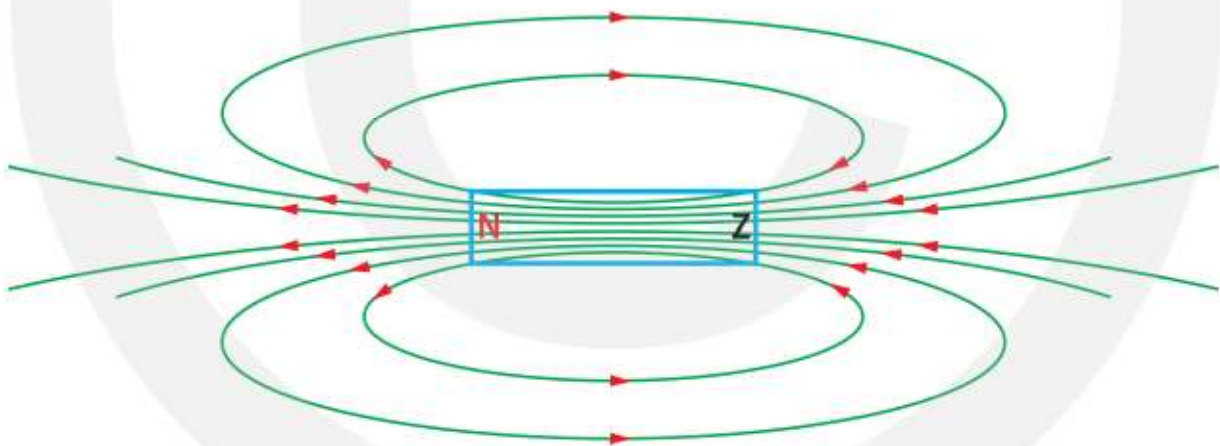
Een homogeen magnetisch veld heeft op iedere plaats dezelfde grootte en dezelfde richting. De veldlijnen zijn recht en evenwijdig aan elkaar en de dichtheid van de veldlijnen is overal even groot. Zie figuur 28.

Homogeen B-veld

- de veldlijnen zijn recht
- de veldlijnen zijn evenwijdig aan elkaar
- de dichtheid van de veldlijnen is overal even groot

Magnetisch veld om een staafmagneet

Een veel voorkomend magnetisch veld is het veld om een staafmagneet. Buiten de magneet zijn de veldlijnen gekromd en gaan van de noordpool naar de zuidpool. Aan het oppervlak van de polen is de veldsterkte op zijn grootst, hier hebben de veldlijnen de grootste dichtheid. Naarmate de afstand groter wordt neemt de veldsterkte, en daarmee de dichtheid van de veldlijnen, af.

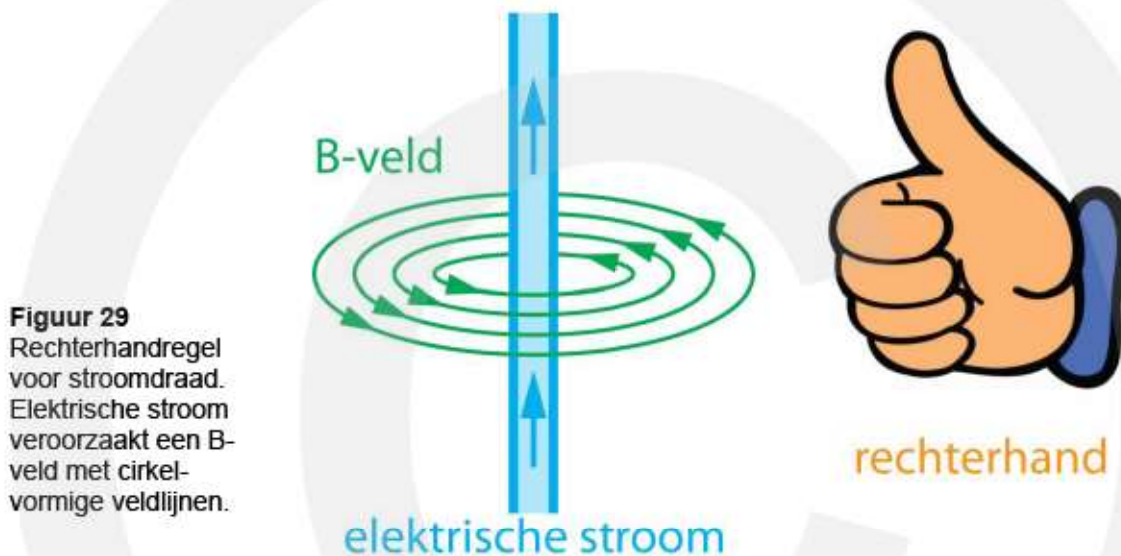


Figuur 28 Magnetische veldlijnen bij een staafmagneet.

12.5 Elektromagnetisme

Het magnetisch veld om een stroomvoerende draad

Een **stroomvoerende draad** is een stroomdraad waar elektrische stroom doorheen gaat. De elektrische stroom veroorzaakt een magnetisch veld. De veldlijnen van dit opgewekte B-veld zijn cirkelvormig om de stroomdraad. Zie figuur 29. De richting van het B-veld vind je door de rechterhandregel voor elektrische stroom toe te passen.



Figuur 29
Rechterhandregel
voor stroomdraad.
Elektrische stroom
veroorzaakt een B-
veld met cirkel-
vormige veldlijnen.

Rechterhandregel voor een stroomvoerende draad

- Wijs met je rechterduim in de richting van de elektrische stroom.
- Het magnetisch veld cirkelt om de draad in de richting van je vingers.

LET OP

De richting waarin elektronen bewegen is tegengesteld is aan de richting van de elektrische stroom.

Bij een stroomvoerende draad die **loodrecht op het papier** staat is het lastig om aan te geven of de elektrische stroom naar je toekomt of van je af gaat. Vandaar de volgende afspraak.

Stroom van je af (het papier in)	→	kruisje.
Stroom naar je toe (het papier uit)	→	stip.

× papier in • papier uit

Deze afspraak kun je onthouden door te denken aan een **dartpijl**. Als het pijltje van je af vliegt (het papier in) zie je de kruisvormige veertjes. Als het pijltje naar je toe komt (het papier uit) zie je de punt.

Figuur 30

Van je af (papier in) → kruisje.
Naar je toe (papier uit) → stip.



Een gebogen stroomdraad

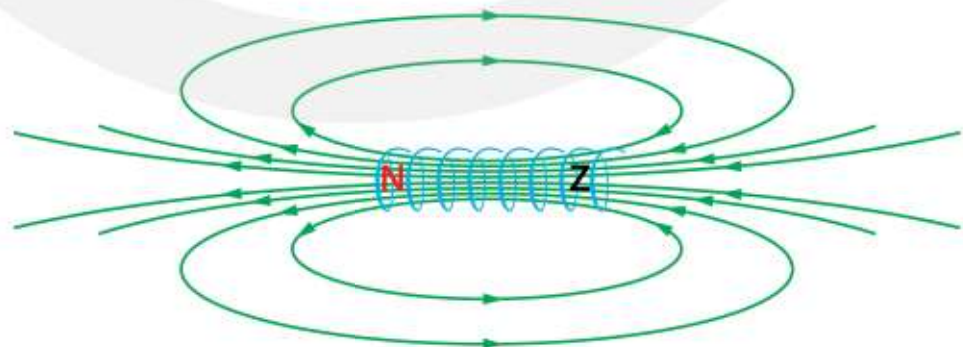
Bij een gebogen stroomdraad is het niet anders dan bij een rechte stroomdraad. De rechterhandregel voor draad geldt altijd. Als de stroomdraad sterk is gebogen overlapt het B-veld van één kant van de draad met dat van de andere kant. Het resulterende B-veld is dan de vectorsom van beide velden.

Als twee magnetische velden $\vec{B}_1$ en $\vec{B}_2$ elkaar overlappen is het resulterende veld de vectorsom van beide velden.

$$\Sigma \vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

Het magnetisch veld van een stroomspoel

Bij een stroomspoel is de stroomdraad opgewonden. Als er stroom loopt, gaat om ieder stukje stroomdraad een cirkelvormig B-veld. Deze velden overlappen en het resulterende B-veld is de vectorsom van deze overlappende velden. Het resultaat is een magnetisch veld zoals te zien in figuur 31. Binnen in de spoel is het B-veld vrijwel homogeen. De veldlijnen verlaten de spoel bij de noordpool en komen terug in de spoel bij de zuidpool. Buiten de spoel gaan de B-veldlijnen van noord naar zuid, binnen in de spoel van zuid naar noord.

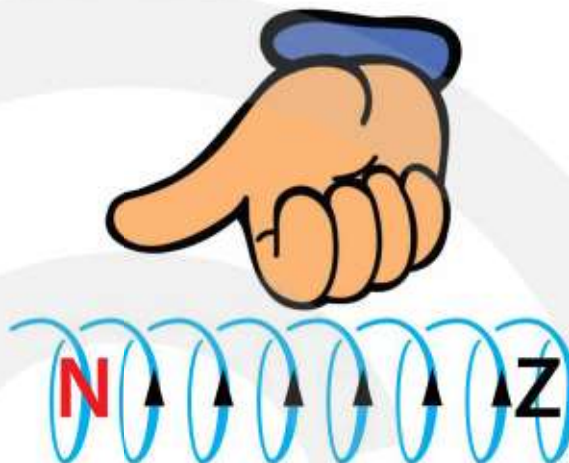


Figuur 31
Magnetische veldlijnen bij een stroomspoel.

Om te bepalen in welke richting de stroom door een spoel gaat kun je opnieuw een rechterhandregel gebruiken. In dit geval gebruik je de **rechterhandregel voor spoelen**.

Rechterhandregel voor een stroomspoel

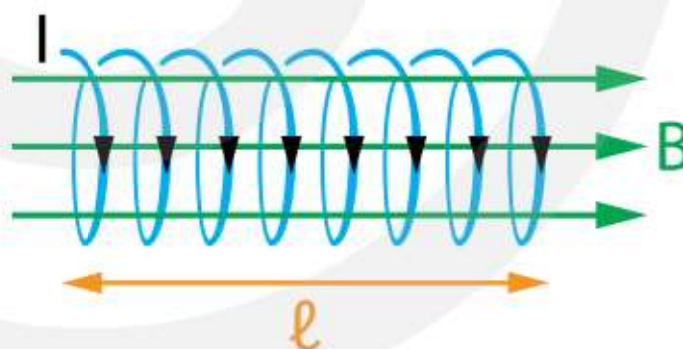
- Krul de vingers van je rechterhand in de richting van de stroom.
- Je duim wijst naar de noordpool.



Figuur 32 Rechterhandregel voor een spoel. De pijlen geven de richting van de stroom aan. Je duim wijst naar de noordpool.

Elektromagneet

Als er stroom door een spoel loopt wordt er een magnetisch veld opgewekt. Er ontstaan magnetische veldlijnen in en om de stroomspoel die precies lijken op die van een staafmagneet. De spoel krijgt een noordpool en een zuidpool en wordt een **elektromagneet**. Binnen in een lange spoel is het magnetisch veld vrijwel homogeen.



Figuur 33 Door een spoel met N wikkelingen en lengte ℓ loopt een stroom van I ampère. Binnen in de spoel is het B-veld homogeen.

De grootte van de magnetische inductie (veldsterkte) binnen in een lege spoel wordt gegeven door de volgende formule:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

- B is de magnetische inductie in tesla (T)
- μ_0 is de magnetische permeabiliteit van vacuüm: $4\pi \cdot 10^{-7}$ (T·m·A⁻¹)
- N is het aantal windingen van de spoel (geen eenheid)
- I is de stroomsterkte door de draad in ampère (A)
- ℓ is de lengte van de spoel in meter (m)

Deze formule geldt voor een spoel in vacuüm. Als de spoel gevuld is met een bepaalde stof wordt de magnetische inductie groter. Voor een spoel in lucht is de versterking klein en is bovenstaande formule een goede benadering. Maar als bijvoorbeeld een metalen staaf (een kern) in de spoel wordt aangebracht treedt er een flinke versterking op van het B-veld. De versterkingsfactor is μ waaruit volgt:

$$B_{\text{met stof}} = \mu \cdot B_{\text{vacuum}}$$

Om de sterkte van het magnetische veld zo groot mogelijk te maken kun je het volgende doen:

- grote stroom I
- veel wikkelingen N
- kleine lengte ℓ
- kern in de spoel met grote μ

Als kern wordt vaak **weekijzer** gebruikt. Weekijzer kan namelijk heel snel magnetisch worden gemaakt en kan zijn magnetisme ook weer snel verliezen. Deze eigenschap is belangrijk als een elektromagneet vaak aan en uit wordt gezet. Sterke elektromagneten worden gebruikt bij schrootverwerkende bedrijven, bij magnetische zweeftreinen en in een MRI- apparaat.



Figuur 34 Elektromagneet.

Het is niet altijd nodig om een elektromagneet zo sterk mogelijk te maken. Soms is de snelheid waarmee het veld aan en uit kan worden gezet belangrijker. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het schrijven van data op een **harde schijf**. In een moderne harde schijf wordt het magnetisch veld 10^8 keer per seconde aan en uit gezet.



Figuur 35 Harde schijf.

Ook bij een **relais** wordt een elektromagneet aan en uitgeschakeld, waardoor een metalen plaatje in beweging komt. De schakelsnelheid van een relais is 10 – 100 keer per seconde. Als er voldoende stroom door de spoel gaat is het magnetische veld sterk genoeg om een ijzeren plaatje aan te trekken, waardoor er elektrisch contact ontstaat. Zodra de stroom wordt uitgeschakeld trekt een veer het ijzeren plaatje terug, waardoor het contact wordt verbroken. Een relais gebruik je om met een kleine stroom een grote stroom aan of uit te schakelen.

VOORBEELD elektromagneet

Een elektromagneet heeft een spoel met 2000 wikkelingen. Bij een stroom van 0,50 A is de magnetische inductie B in de spoel 0,10 T. In de spoel bevindt zich een weekijzeren kern, waardoor het B-veld met een factor 20 wordt versterkt.

Bereken de lengte van de spoel.

- $B = 0,10 \text{ T} \quad | \quad \mu = 20 \quad | \quad N = 2000 \quad | \quad I = 0,50 \text{ A} \quad | \quad \ell = \dots \text{ m}$
- $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$ met $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,25664 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$
- $0,1 = 20 \cdot 1,25664 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2000 \cdot 0,5}{\ell} \rightarrow \ell = 0,251327 = 0,25 \text{ m}$

12.6 Lorentzkracht

Beweegt een elektrisch geladen deeltje in een magnetisch veld in een richting die **niet evenwijdig** is met de veldlijnen, dan oefent het B-veld een kracht uit op het deeltje. Deze kracht heet de lorentzkracht F_L , genoemd naar Hendrik Antoon Lorentz (Nederland, 1853 – 1928) die in 1902 de Nobelprijs voor natuurkunde heeft gekregen. Net als iedere kracht heeft ook de lorentzkracht een grootte en richting.

De lorentzkracht werkt op een elektrisch geladen deeltje als:

- het deeltje beweegt in een B-veld
- de bewegingsrichting niet evenwijdig is aan het B-veld

Het vreemde van de lorentzkracht is dat hij alleen werkt op **bewegende lading** als de bewegingsrichting niet gelijk is aan de richting van het B-veld. Staat de elektrische lading stil, dan werkt de lorentzkracht niet. Maar stilstaan of bewegen zijn relatieve begrippen. Voor waarnemer 1 beweegt het geladen deeltje maar voor waarnemer 2, die met het deeltje meebeweegt, staat het deeltje stil. Beide waarnemers zien dat er een kracht op het geladen deeltje werkt. Maar over de oorzaak van deze kracht zijn ze het niet eens. Waarnemer 1 zegt dat er een lorentzkracht werkt, veroorzaakt door het magnetisch veld. Waarnemer 2 zegt dat er een elektrische kracht werkt veroorzaakt door het elektrisch veld.

Beide waarnemers hebben gelijk. Wat voor de ene waarnemer een B-veld is, is voor een andere waarnemer een E-veld. Dit betekent dat het E-veld en het B-veld hetzelfde natuurkundig verschijnsel is gezien vanuit verschillende waarnemers. Er bestaat alleen een **elektromagnetisch veld** waarin het E-veld en het B-veld met elkaar zijn verenigd. Deze conclusie is voor Albert Einstein een belangrijk uitgangspunt dat hij gebruikt bij de ontwikkeling van zijn relativiteitstheorie.



Figuur 36 Een cilinder wordt oor verschillende waarnemers anders waargenomen. Dit geldt ook voor het E-veld en het B-veld. Beide velden zijn met elkaar verenigd.

De grootte van de lorentzkracht op een stroomvoerende draad

Als voorbeeld nemen we een stroomvoerende draad in een magnetisch veld. In de draad bewegen geladen deeltjes, namelijk elektronen. Volgens afspraak is de richting van de stroomsterkte gelijk aan de richting waarin positieve lading wordt verplaatst. De stroomrichting is dus tegengesteld aan de bewegingsrichting van de elektronen. Staan de stroomdraad en het B-veld loodrecht op elkaar staan (hoek van 90°) dan geldt voor de grootte van de lorentzkracht:

$$F_L = B \cdot I \cdot \ell$$

- F_L is de grootte van de lorentzkracht in newton (N)
- B is de sterkte van het B-veld (de magnetische inductie) in tesla (T)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)
- ℓ is de lengte van de stroomdraad die zich in het B-veld bevindt (m)

Is de hoek tussen de stroomdraad en het B-veld niet 90° maar hoek α , dan moet je de factor $\sin \alpha$ toevoegen en geldt:

$$F_L = B \cdot I \cdot \ell \cdot \sin \alpha$$

- α is de hoek tussen B en I ($\sin \alpha$ heeft geen eenheid)

MERK OP

Als je in bovenstaande formule $\alpha = 90^\circ$ invult vind je: $F_L = B \cdot I \cdot \ell$

VOORBEELD stroomdraad

Door een stroomdraad loopt een stroomsterkte van 10A. De stroomdraad gaat door een B-veld van 5,0 T onder een hoek van 90° .

Bereken de grootte van F_L op 1,0 meter van deze draad.

- $B = 5,0 \text{ T} \quad | \quad I = 10 \text{ A} \quad | \quad \ell = 1,0 \text{ m} \quad | \quad F_L = \dots \text{ N}$
- $F_L = B \cdot I \cdot \ell$
- $F_L = 5 \cdot 10 \cdot 1 = 50 \text{ N}$

De grootte van de lorentzkracht op een geladen deeltje

Zoals we hebben gezien kunnen geladen deeltjes, zoals protonen en elektronen, worden versneld en daarna vrij door de ruimte vliegen. Komen ze in een gebied met een B-veld én is hun bewegingsrichting niet evenwijdig is aan dit veld, dan wordt er op de deeltjes een lorentzkracht uitgeoefend.

Is de bewegingsrichting loodrecht op het B-veld (hoek van 90°), dan geldt voor de grootte van de lorentzkracht op een deeltje met lading q en snelheid v :

$$F_L = B \cdot q \cdot v$$

- F_L is de grootte van de lorentzkracht in newton (N)
- B is de sterkte van het B-veld (de magnetische inductie) in tesla (T)
- q is de lading van het deeltje in coulomb (C)
- v is de snelheid van het deeltje in meter per seconde (m/s)

Is de hoek tussen de bewegingsrichting en het B-veld niet 90° maar hoek α , dan moet je de factor $\sin \alpha$ toevoegen en geldt:

$$F_L = B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha$$

- α is de hoek tussen B en v ($\sin \alpha$ heeft geen eenheid)

VOORBEELD

Ca²⁺ ionen versnellen

Een deeltjesversneller produceert Ca²⁺ ionen met een snelheid van $1,0 \cdot 10^6$ m/s. Ze komen in een B-veld van 5,0 T onder een hoek van 90° .

Bereken de grootte van F_L

- $B = 5,0 \text{ T} \quad | \quad q = 2 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad | \quad v = 1,0 \cdot 10^6 \text{ m/s} \quad | \quad F_L = \dots \text{ N}$
- $F_L = B \cdot q \cdot v$
- $F_L = 5 \cdot 2 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 1,0 \cdot 10^6 = 1,6022 \cdot 10^{-12} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ N}$

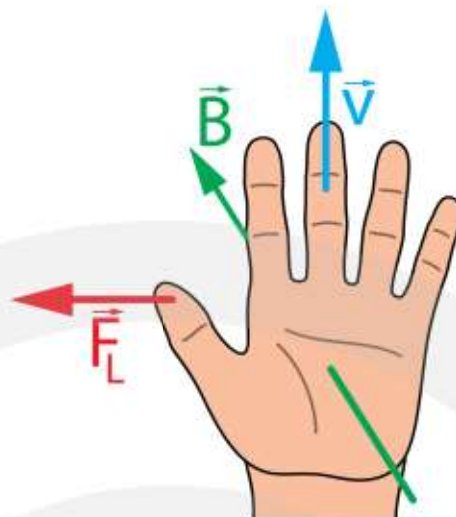
De richting van de lorentzkracht

We gaan ons nu met de richting van F_L bezighouden. Om de richting van F_L te bepalen gebruik je de linkerhandregel. Dat gaat als volgt:

Linkerhandregel voor de richting van de lorentzkracht

- Vang de B-veldlijnen op in de palm van je linkerhand.
- Richt je vingers in de bewegingsrichting van positief geladen deeltjes.*
- Je duim wijst in de richting van de lorentzkracht F_L .

* Bij negatief geladen deeltjes wijs je je vingers in tegengestelde richting.



Figuur 37 Linkerhandregel voor de richting van de lorentzkracht

De lorentzkracht staat altijd loodrecht op het B-veld en op de bewegingsrichting.

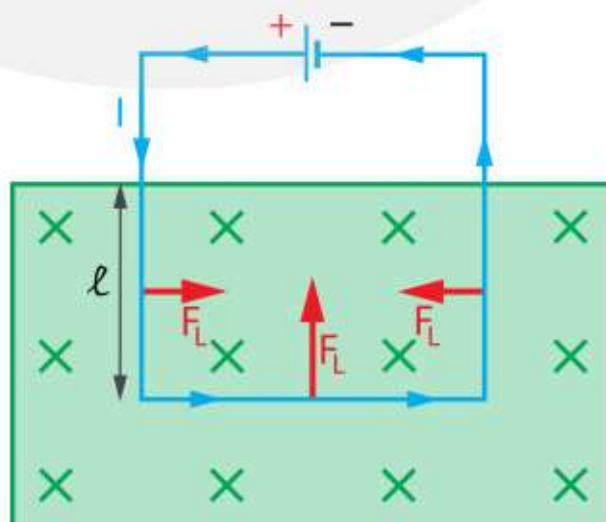
$\vec{F}_L$ staat loodrecht op $\vec{B}$ en loodrecht op $\vec{v}$

OPMERKING

Als $\vec{B}$ niet loodrecht op $\vec{v}$ staat moeten de veldlijnen schuin in je handpalm worden opgevangen.

Linkerhandregel bij een stroomvoerende draad

In een stroomvoerende draad is de richting van de stroom gelijk aan de bewegingsrichting van positief geladen deeltjes. Dat er in werkelijkheid elektronen, dus negatief geladen deeltjes, bewegen is niet belangrijk. We gaan de linkerhandregel toepassen op een rechthoekige stroomdraad die is aangesloten op een spanningsbron. In de stroomdraad loopt stroom in een kring. Een gesloten kring van stroomdraad noemen we een **draadraam**. Een gedeelte van het draadraam gaat door een gebied met een magnetisch veld. Zie figuur 38.



Figuur 38 Draadraam in een magnetisch veld.

Zoals aangegeven in figuur 38 werkt op drie stukken stroomdraad een lorentzkracht. Met de linkerhandregel vinden we de richtingen van de lorentzkrachten, zoals aangegeven in figuur 38.

De lorentzkrachten op de twee verticale draadstukken zijn even groot en tegengesteld gericht. Horizontaal is de resulterende kracht dus nul: $\Sigma F_{\text{hor}} = 0$. Op de bovenste horizontale draadstukken werken geen lorentzkrachten, want deze draadstukken bevinden zich niet in het B-veld. Het horizontale onderste draadstuk bevindt zich wél in het B-veld, zodat er een lorentzkracht op werkt. Verticaal is de resulterende kracht gelijk aan de lorentzkracht: $\Sigma F_{\text{ver}} = F_L$, waardoor het draadraam naar boven gaat bewegen.

We zien dat met een draadraam zoals hierboven is beschreven elektrische stroom wordt gebruikt om iets in beweging te brengen. Dit is het principe waarop een elektromotor werkt.

VOORBEELD draadraam in magnetisch veld

Een vierkant draadraam van 10 bij 10 cm wordt 7,0 cm in een B-veld gebracht met een sterkte van 2,0 T. Er loopt 3,0 A door het draadraam. Zie figuur 38.

Bereken F_L op een verticaal draadstuk.

- $B = 2,0 \text{ T} \quad | \quad I = 3,0 \text{ A} \quad | \quad \ell = 0,070 \text{ m} \quad | \quad F_L = \dots \text{ N}$
- $F_L = B \cdot I \cdot \ell$
- $F_L = 2 \cdot 3 \cdot 0,07 = 0,42 \text{ N}$

Leg uit of het draadraam horizontaal gaat bewegen.

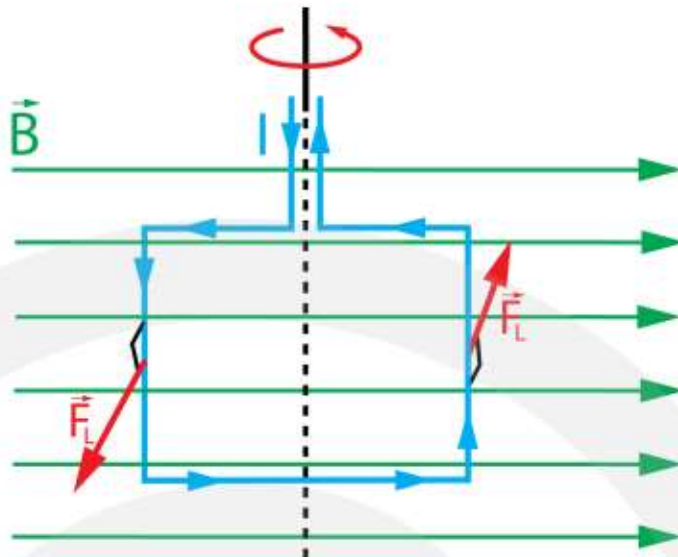
- op een verticaal draadstuk werkt een lorentzkracht van 0,42 N
- F_L op de verticale draadstukken zijn tegengesteld gericht
- de twee tegengestelde lorentzkrachten werken op hetzelfde voorwerp
- $\Sigma F_{\text{hor}} = 0 \rightarrow$ geen versnelling in horizontale richting

Bereken F_L op de horizontale draad.

- $B = 2,0 \text{ T} \quad | \quad I = 3,0 \text{ A} \quad | \quad \ell = 0,10 \text{ m} \quad | \quad F_L = \dots \text{ N}$
- $F_L = B \cdot I \cdot \ell$
- $F_L = 2 \cdot 3 \cdot 0,1 = 0,60 \text{ N}$ (het draadraam wordt verticaal versneld)

Lorentzkrachten in een elektromotor

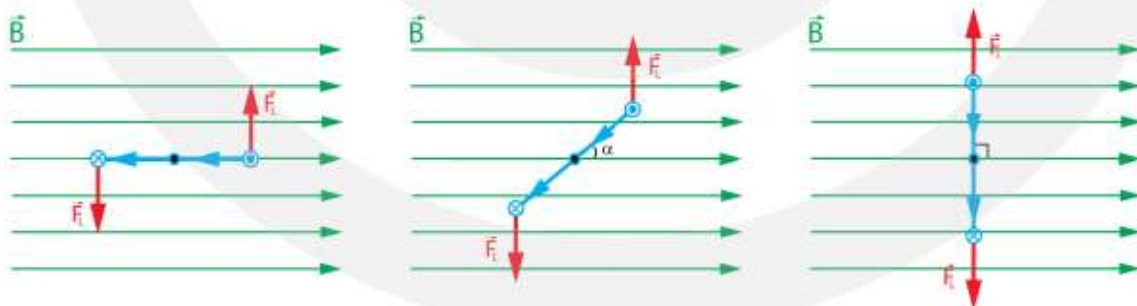
Om de lorentzkrachten in een elektromotor te onderzoeken nemen we een rechthoekig draadraam in een homogeen magnetisch veld, zoals te zien in figuur 39. Het draadraam heeft maar één winding en kan draaien om een verticale centrale as.



Figuur 39 Roterend draadraam.

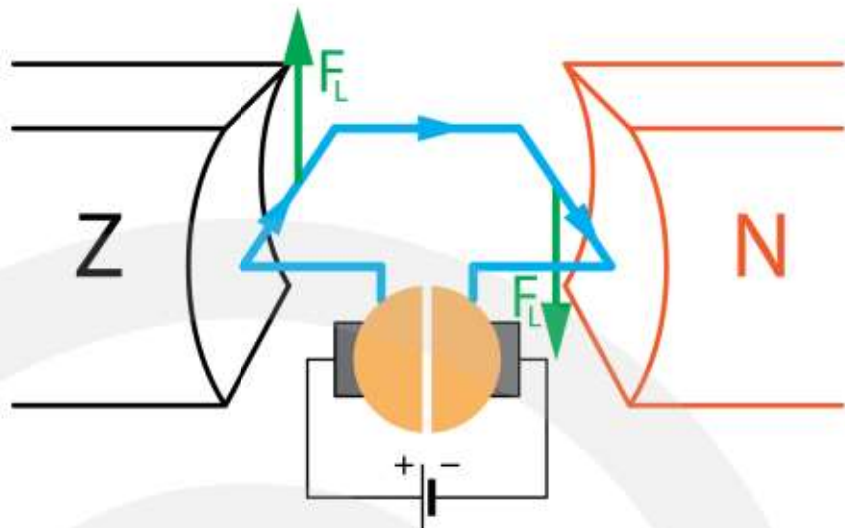
De horizontale draadstukken zijn evenwijdig aan het B-veld. De lorentzkracht op deze stukken is daarom nul. Op de verticale draadstukken werkt wel een lorentzkracht. Op het linker draadstuk is F_L naar voren gericht en op het achterste draadstuk naar achteren. Zie figuur 40. Deze twee lorentzkrachten zorgen ervoor dat het draadraam gaat draaien.

In figuur 40 zie je een bovenaanzicht bij drie verschillende standen van het draadraam. Links is de situatie van figuur 39. Midden is het draadraam over hoek α gedraaid. Rechts zijn de twee lorentzkrachten precies tegengesteld. Het draadraam houdt op met draaien en blijft in deze stand staan.



Figuur 40 Bovenaanzicht van roterend draadraam. Als de lorentzkrachten in elkaars verlengde staan stopt de draaibeweging.

Bij een elektromotor is het niet de bedoeling dat het draaien stopt. Om dit te voorkomen wordt op het moment waarop de lorentzkrachten in elkaars verlengde staan (figuur 40, rechts) de stroomrichting omgekeerd. Hierdoor klappen de lorentzkrachten om en wijzen ze naar binnen. Het draadraam schiet een stukje door en draait verder vanwege de nu omgeklapte lorentzkrachten. Na iedere halve ronde keert de stroomrichting, en daarmee de lorentzkrachten om, zodat de elektromotor blijft draaien.

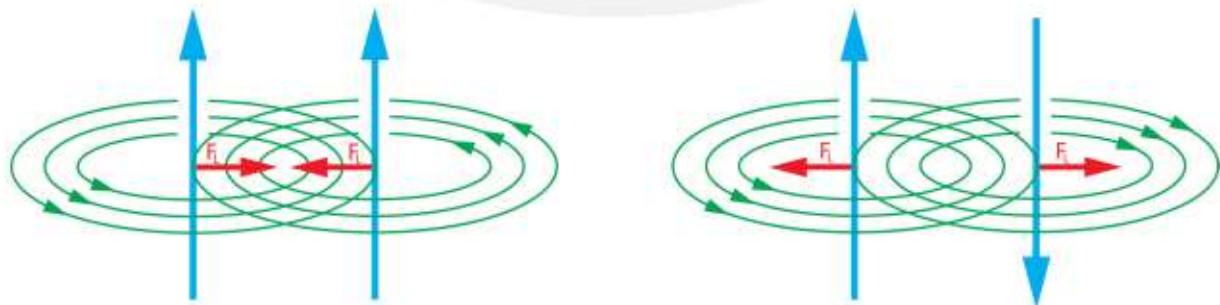


Figuur 41 Elektromotor op gelijkstroom.

In een elektromotor keert de stroomrichting door het draadraam iedere halve ronde om. Bij wisselspanning uit het lichtnet keert de spanning 100 keer per seconde om. Hiermee kan het wisselen van de spanning in een elektromotor eenvoudig worden gerealiseerd. Bij gelijkspanning, zoals uit een batterij, is er een speciale constructie nodig om ervoor te zorgen dat de stroom door het draadraam op het juiste moment omklapt. In figuur 41 zie je de binnenkant van een gelijkstroommotor. Twee **sleeppcontacten** zijn verbonden met de + en de - pool van de spanningsbron. Sleepcontacten zijn vaak gemaakt van koolstof en worden **koolborstels** genoemd. De **commutator** bestaat uit twee halve schijven met een isolerende tussenlaag. Dit zorgt ervoor dat de stroomrichting op het juiste moment omkeert.

Evenwijdige stroomvoerende draden

Twee stroomdraden 1 en 2 zijn evenwijdig aan elkaar. Door beide draden loopt stroom. Om de stroomdraden is een cirkelvormig B-veld aanwezig. Draad 2 bevindt zich in het B-veld van draad 1 en draad 1 bevindt zich in het B-veld van draad 2. Hierdoor oefenen de twee draden lorentzkrachten op elkaar uit. De richting van het B-veld om de draden vind je met de rechterhandregel voor stroomdraad. De richting van F_L vind je met de linkerhandregel. Zoals je ziet in figuur 42 ontstaat er een aantrekkende kracht tussen de draden als de stroom in dezelfde richting loopt. Een afstotende kracht ontstaat als de stroom in tegengestelde richting loopt.



Figuur 42 Twee evenwijdige stroomvoerende draden oefenen lorentzkrachten op elkaar uit. Als de stroom dezelfde kant uit gaat trekken de draden elkaar aan (links). Als de stroomrichting tegengesteld is stoten de draden elkaar af (rechts).

Geladen deeltje in een magnetisch veld

Als een geladen deeltje in een B-veld komt met een bewegingsrichting die niet evenwijdig is aan dit veld, dan wordt er op het deeltje een lorentzkracht uitgeoefend:

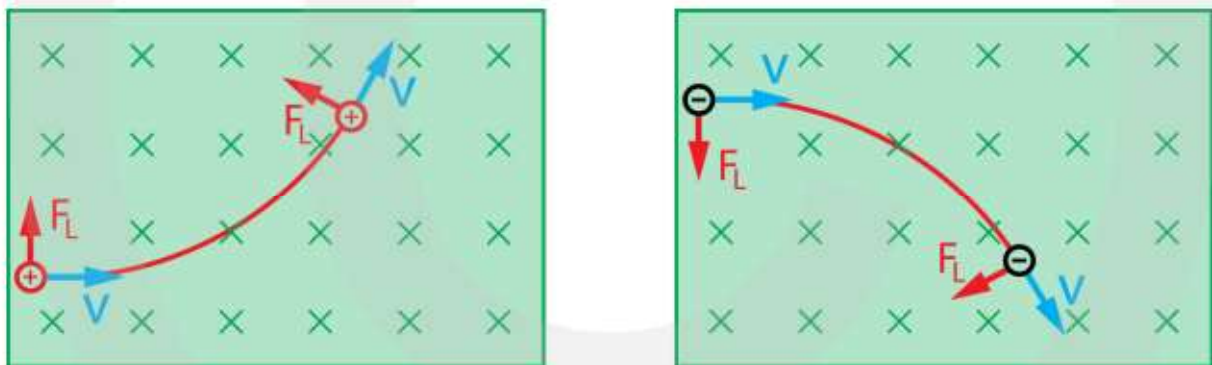
$$F_L = B \cdot q \cdot v$$

De lorentzkracht staat loodrecht op het B-veld en loodrecht op de bewegingsrichting. Zoals we in een eerder hoofdstuk hebben gezien gaat een voorwerp een **eenparige cirkelbeweging** uitvoeren als de resulterende kracht loodrecht op de bewegingsrichting staat. De resulterende kracht wijst dan steeds naar het middelpunt en wordt de middelpuntzoekende kracht F_{mpz} genoemd:

$$F_{mpz} = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Voor een geladen deeltje met een constante snelheid loodrecht op het B-veld geldt:

$$\Sigma F = F_L = F_{mpz}$$



Figuur 43 Een geladen deeltje beweegt in een magnetisch veld met een bewegingsrichting loodrecht op de B-veldlijnen. Het deeltje krijgt een eenparige cirkelbeweging.

Door F_L gelijk te stellen aan F_{mpz} vinden we:

$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

- B is de magnetische inductie in tesla (T)
- q is de lading van het deeltje in coulomb (C)
- v is de snelheid van het deeltje in meter per seconde (m/s)
- m is de massa van het deeltje in kilogram (kg)
- r is de straal van de cirkelbaan in meter (m)

Met behulp van een magnetisch veld kunnen geladen deeltjes in een cirkelbaan rondgaan. Hiervan wordt gebruikgemaakt bij het onderzoek naar elementaire deeltjes. In het onderzoekscentrum CERN bij Geneve worden elementaire deeltjes

bestudeerd. Om de deeltjes een zeer grote snelheid te geven worden ze met sterke magneten in een cirkelvormige baan gehouden. De grootste snelheid wordt bereikt in de Large Hadron Collider (LHC). Deze ondergrondse deeltjesversneller heeft een omtrek met een lengte van 27 kilometer en een magnetische inductie van 8,3 T.

Figuur 44 Large Hadron Collider (LHC) ring van het onderzoekscentrum CERN bij Geneve.



VOORBEELD deeltje in magnetisch veld

In de LHC-versneller bewegen protonen in een homogeen magnetisch veld. De bewegingsrichting van de protonen is loodrecht (hoek 90°) op het B-veld. De cirkelbaan heeft een lengte van 27 km. Bij een bepaalde veldsterkte hebben de protonen een snelheid van 20% van de lichtsnelheid.

Bereken de sterkte van het B-veld.

- $2\pi \cdot r = 2,7 \cdot 10^4 \text{ m} \rightarrow r = 4,2972 \cdot 10^3 \text{ m}$
- $m = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \mid v = 0,2 \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s} \mid q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- $B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow B = \frac{m \cdot v}{q \cdot r}$
- $B = \frac{1,6726 \cdot 10^{-27} \cdot 5,9958 \cdot 10^7}{1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2972 \cdot 10^3} = 1,4566 \cdot 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

In bovenstaand voorbeeld zie je dat in de LHC-versneller een B-veldsterkte van $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ genoeg is om protonen een snelheid van 20% van de lichtsnelheid te geven. Bij een veldsterkte van 8,3 tesla verwacht je dan misschien een snelheid die veel groter is dan de lichtsnelheid, maar dat is niet mogelijk. De formule $B = \frac{m \cdot v}{q \cdot r}$

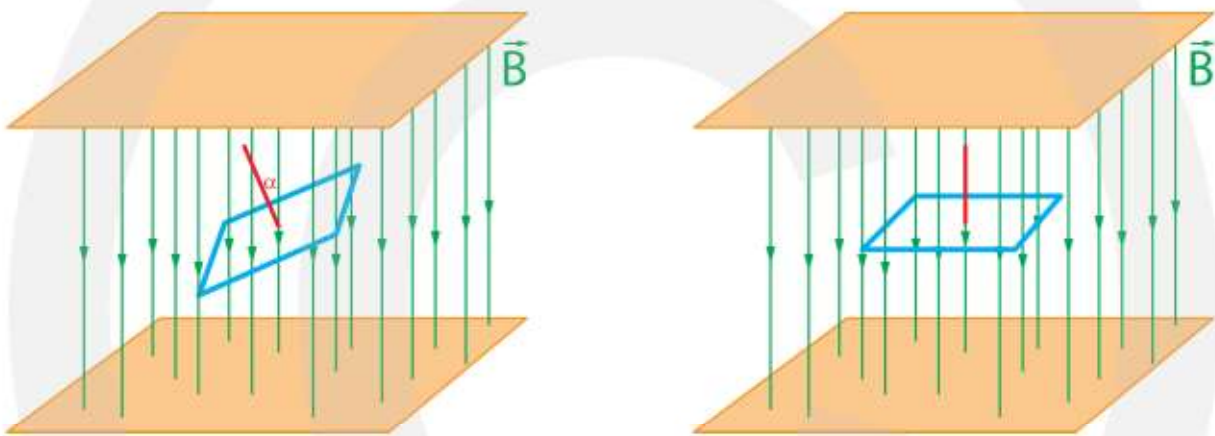
bevat namelijk ook de massa m van de protonen, en deze massa is afhankelijk van de snelheid. In het hoofdstuk relativiteit leer je hoe de massa van de snelheid afhangt.

12.7 Inductiespanning

Magnetische flux

Als een draadraam in een magnetisch veld wordt gebracht kan het zo worden gedraaid dat er magnetische veldlijnen doorheen gaan. Zie figuur 45. Het aantal veldlijnen door het draadraam is afhankelijk van de hoek die het draadraam met het B-veld maakt. Je meet de hoek ten opzichte van de **normaal**. Dat is een lijn die loodrecht op het oppervlak staat. In figuur 45 is de rode lijn de normaal.

Bij een hoek van nul graden ten opzichte van de normaal is het aantal veldlijnen door het draadraam maximaal.



Figuur 45 Magnetische flux door een oppervlak A. Rechts gaan de meeste veldlijnen door het oppervlak.

We definiëren nu een nieuwe grootheid: de **magnetische flux Φ** . Dit is de sterkte van het B-veld loodrecht op het draadraam vermenigvuldigd met de oppervlakte van het draadraam.

Magnetische flux is de magnetische veldsterkte vermenigvuldigd met de oppervlakte van een draadraam.

De eenheid van magnetische flux is tesla keer vierkante meter ($T \cdot m^2$) OF de weber (Wb)

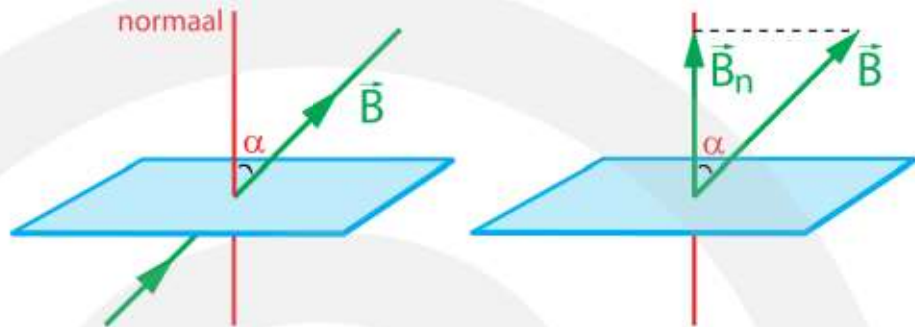
één $T \cdot m^2$ = één Wb

$$\Phi = B_n \cdot A$$

- Φ is de magnetische flux door een draadraam ($T \cdot m^2$) of (Wb)
- B_n is de component van B loodrecht op het draadraam (T)
- A is de omsloten oppervlakte in vierkante meter (m^2)

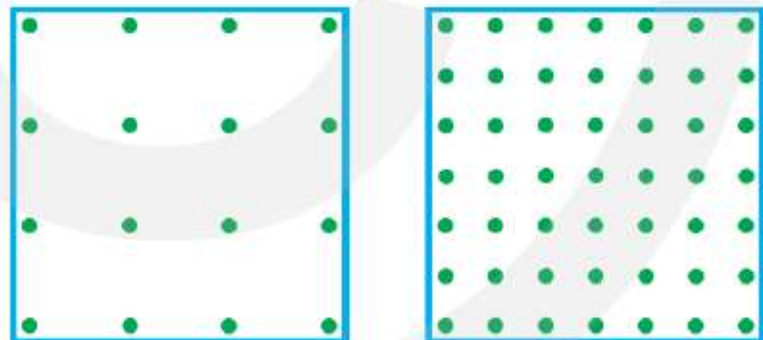
De loodrechte component B_n vind je door B te vermenigvuldigen met de cosinus van de hoek tussen B en de **normaal** van het draadraam. Zie figuur 46. Als het B -veld loodrecht op het draadraam staat is $\cos \alpha$ gelijk aan 1 en geldt: $B_n = B$. Wordt het draadraam 90° gedraaid dan gaan er geen veldlijnen door het draadraam en geldt $B_n = 0$. B_n wordt ook wel de **normaalcomponent** van B genoemd. In dit hoofdstuk gaan we steeds uit van een **homogeen magnetisch veld**.

Figuur 46
Magnetische flux Φ
door een draadraam
 $B_n = B \cdot \cos \alpha$



$$B_n = B \cdot \cos \alpha$$

In een tekening is de dichtheid van de B -veldlijnen een maat voor de sterkte van het B -veld. Als er veel veldlijnen door een draadraam gaan is magnetische flux groot.



Figuur 47 Magnetische flux
door een draadraam. Links is
de magnetische flux kleiner dan
rechts.

VOORBEELD magnetische flux

Een rechthoekig draadraam van 20 cm lang en 15 cm breed bevindt zich in een homogeen B -veld met een sterkte van 0,25 T

Bereken de magnetische flux door het draadraam als $\alpha = 0^\circ$.

- $B = 0,25 \text{ T} \quad | \quad A = 0,2 \cdot 0,15 = 0,030 \text{ m}^2 \quad | \quad \Phi = \dots \text{ Wb}$
- $\Phi = B_n \cdot A = 0,25 \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$

Bereken de magnetische flux door het draadraam als $\alpha = 55^\circ$.

- $\Phi = B_n \cdot A \cdot \cos \alpha = 0,25 \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \cos 55 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$

De inductiewet van Faraday

Michael Faraday (Engeland, 1791 – 1867) ontdekt dat als de magnetische flux door een draadraam **verandert** er een elektrische spanning wordt opgewekt. Het is dus niet de flux zelf die de inductiespanning U_{ind} opwekt maar de **verandering van de flux**.

Bij een draadraam gaan de B-veldlijnen er maar één keer doorheen, maar als je het draadraam de vorm geeft van een spoel met een aantal wikkelingen N dan gaan de veldlijnen er N keer doorheen. De inductiespanning wordt hierdoor N keer groter.

Voor de grootte van de inductiespanning geldt:

$$U_{\text{ind}} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

- U_{ind} is de inductiespanning in volt (V)
- N is het aantal windingen van de spoel (geen eenheid)
- $d\Phi$ is de verandering van de magnetische flux in tijdinterval dt in ($\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2$)
- dt is het tijdinterval waarin de fluxverandering plaatsvindt (s)

MERK OP

$\frac{d\Phi}{dt}$ is de afgeleide van de flux naar de tijd.

Uit bovenstaande formule kan een nieuwe eenheid voor de magnetische flux worden afgeleid. De eenheid van flux is $\text{T} \cdot \text{m}^2$ wat gelijk is aan de weber (Wb). Aangezien de eenheid van U_{ind} de volt is moeten we concluderen dat de eenheid van magnetische flux gelijk is aan $\text{V} \cdot \text{s}$

$$\text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}$$

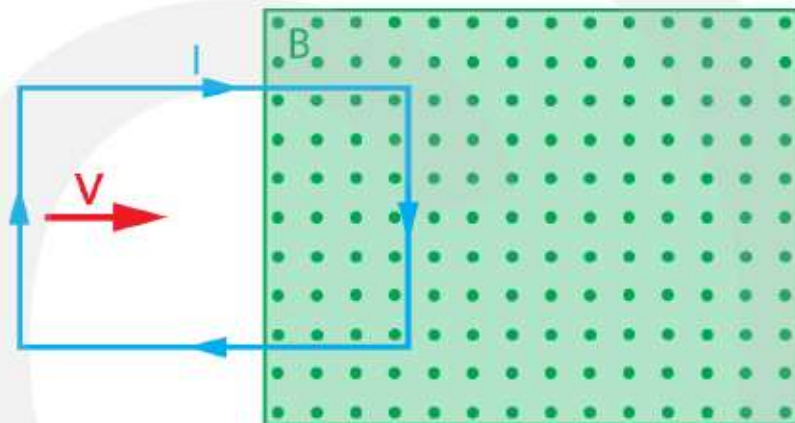
De wet van Faraday legt het verband tussen de snelheid waarmee de flux door een spoel verandert $\Delta\Phi/\Delta t$ en de geïnduceerde spanning U_{ind} . Zodra er een spanning is opgewekt gaat er elektrische stroom lopen. De grootte van de stroom hangt af van de weerstand van het circuit. Bij een kleine weerstand is de stroom groot en bij een grote weerstand klein.

Als de spoel niet in een gesloten elektrisch circuit is opgenomen ontstaat er geen inductiespanning, omdat het draadraam niet is gesloten. Zonder U_{ind} kan er ook geen inductiestroom lopen.

Soms verandert U_{ind} snel in de tijd. In dat geval mag je de wet van Ohm: $U = I \cdot R$ niet zomaar gebruiken. De weerstand van de spoel is namelijk afhankelijk van de snelheid waarmee U_{ind} verandert. Dit effect laten we buiten beschouwing.

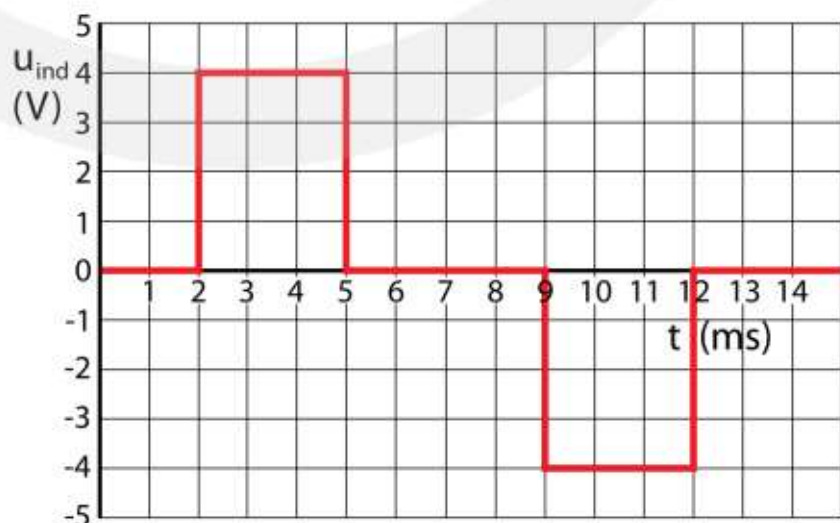
Inductiespanning in een bewegend draadraam

We bewegen een draadraam met een constante snelheid in een magnetisch veld, zie figuur 48. Bij het binnengaan in het veld neemt de magnetische flux toe, waardoor een positieve U_{ind} wordt opgewekt. Hierdoor gaat er een inductiestroom I lopen. Als het draadraam zich helemaal in het veld bevindt verandert de magnetische flux niet en wordt er geen U_{ind} opgewekt. Er loopt dan ook geen inductiestroom. Als het draadraam het veld verlaat neemt de magnetische inductie af, waardoor een negatieve U_{ind} wordt opgewekt. De inductiestroom loopt dan de andere kant uit. Het teken van U_{ind} tijdens de fluxafname is tegengesteld aan het teken van de U_{ind} tijdens de flux-toename. De grootte van de inductiespanning wordt bepaald door de snelheid waarmee de flux toe- of afneemt.



Figuur 48 Een draadraam wordt door een magnetisch veld getrokken.

In figuur 49 zie je de inductiespanning als een rechthoekig draadraam met constante snelheid door een gebied met een magnetisch veld beweegt. Op $t = 2$ ms komt de voorkant van het draadraam in het B -veld. Tussen 2 en 5 ms neemt de flux toe. Tussen 5 en 9 ms zit het draadraam helemaal in het B -veld. Tussen 9 en 12 ms neemt de flux af. Op $t = 12$ ms gaat de achterkant van het draadraam uit het B -veld.



Figuur 49 Inductiespanning.

VOORBEELD inductiespanning in een draadraam

Een rechthoekig draadraam van 20 bij 15 cm wordt met een constante snelheid van 4,0 m/s in een homogeen magnetisch veld gebracht. De normaal van het draadraam is evenwijdig de magnetische veldlijnen, zie figuur 48. De magnetische inductie is 0,50 T.

Bereken hoe lang er een inductiespanning wordt opgewekt.

- de flux neemt toe vanaf het moment waarop de voorkant in het veld komt en verandert niet meer nadat de achterkant in het veld komt
- het draadraam is 0,20 m lang en heeft een snelheid van 4,0 m/s
- $s = v_{\text{gem}} \cdot t \rightarrow 0,2 = 4 \cdot t \rightarrow t = 0,050 \text{ s}$

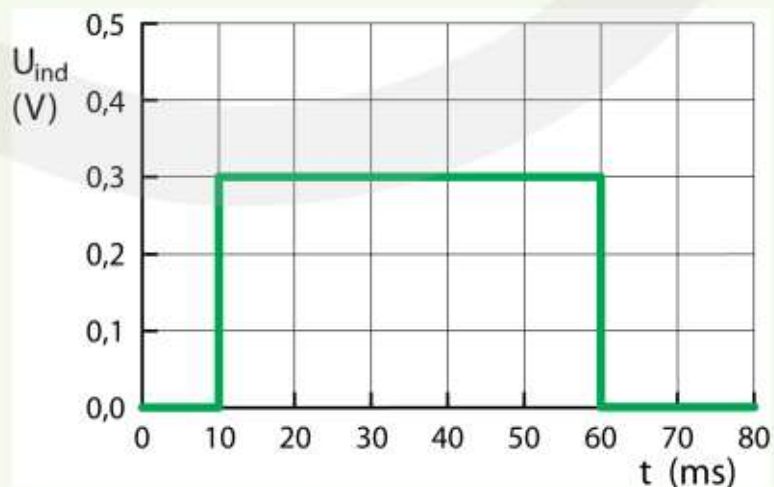
Bereken de grootte van de inductiespanning.

- $B_n = 0,50 \text{ T} \mid A = 0,20 \cdot 0,15 = 0,030 \text{ m}^2 \mid \Phi_{\text{max}} = \dots \text{ Wb}$
- maximale flux $\rightarrow \Phi_{\text{max}} = B_n \cdot A \rightarrow \Phi_{\text{max}} = 0,5 \cdot 0,03 = 0,015 \text{ Wb}$
- $N = 1 \mid \Delta\Phi = \Phi_{\text{max}} - 0 = 0,015 \text{ Wb} \mid \Delta t = 0,05 \text{ s} \mid U_{\text{ind}} = \dots \text{ V}$
- $U_{\text{ind}} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
- $U_{\text{ind}} = 1 \cdot \frac{0,015}{0,05} = 0,30 \text{ V}$

Na 10 ms komt de voorkant van het draadraam in het B-veld.

Teken de (U_{ind} , t)-grafiek voor het draadraam.

- tussen $t = 0$ en $t = 10 \text{ ms} \rightarrow U_{\text{ind}} = 0,0 \text{ V}$
- tussen $t = 10$ en $t = 60 \text{ ms} \rightarrow U_{\text{ind}} = 0,30 \text{ V}$
- na 60 ms $\rightarrow U_{\text{ind}} = 0,0 \text{ V}$



Figuur 50

12.8 Richting van de inductiestroom

De wet van Lenz

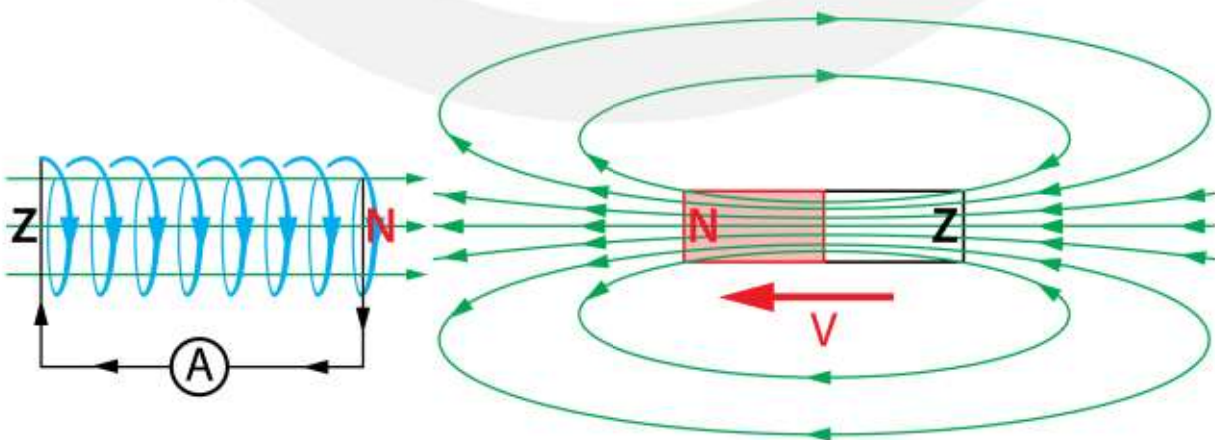
Met de wet van Faraday kunnen we de inductiespanning uitrekenen als we de snelheid waarmee de flux verandert en het aantal wikkelingen weten. Ten gevolge van deze inductiespanning gaat er een inductiestroom lopen. Om de richting waarin deze stroom loopt te bepalen heeft Heinrich Friedrich Lenz (Rusland, 1804 – 1865) een wet opgesteld:

Wet van Lenz

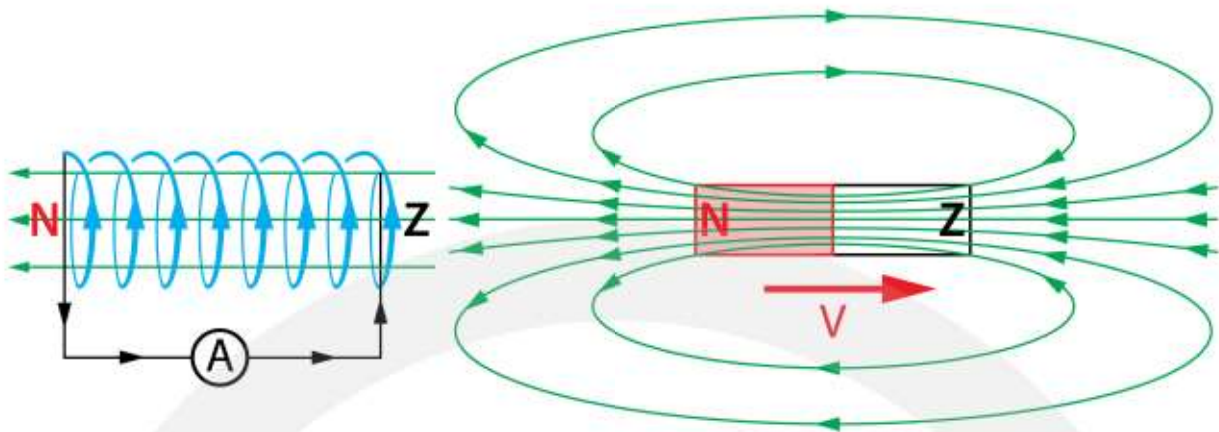
De opgewekte inductiestroom werkt de verandering van de flux die de inductiestroom heeft veroorzaakt altijd tegen.

Als voorbeeld nemen we een spoel en een magneet. Zie figuur 51. De noordpool van de magneet is gericht op de spoel. Als de magneet naar de spoel beweegt neemt de flux in de spoel toe, waardoor er een inductiespanning wordt opgewekt. De spoel is opgenomen in een stroomkring en de inductiestroom door de spoel veroorzaakt een magnetisch veld. De wet van Lenz zegt nu dat het opgewekte B-veld in de spoel een noordpool heeft in de richting van de naderende noordpool. Hierdoor wordt de naderende magneet afgestoten zodat de fluxtoename wordt tegengewerkt. Het kost extra veel kracht om de magneet naar de spoel toe te bewegen.

Eenzelfde redenering geldt als de magneet van spoel weggaat. Zie figuur 52. Als de magneet van de spoel vandaan beweegt neemt de flux in de spoel af, waardoor er een inductiespanning wordt opgewekt. De wet van Lenz zegt nu dat het opgewekte B-veld in de spoel een zuidpool heeft in de richting van de weggaande noordpool. Hierdoor wordt de weggaande magneet aangetrokken zodat de fluxafname wordt tegengewerkt. Het kost extra veel kracht om de magneet van de spoel weg te bewegen.



Figuur 51 Het opgewekte magneetveld in de spoel heeft een noordpool in de richting van de naderende noordpool van de magneet. Hierdoor wordt de fluxtoename tegengewerkt.



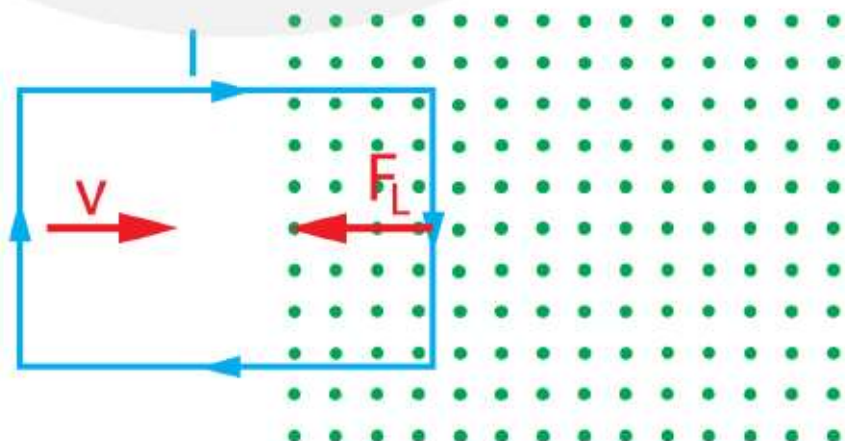
Figuur 52 Het opgewekte magneetveld in de spoel heeft een zuidpool in de richting van de wegaande noordpool van de magneet. Hierdoor wordt de fluxafname tegengewerkt.

Tegenflux en Meeflux

Bij een naderende magneet wordt er in de spoel **tegenflux** opgewekt. Bij een zich verwijderende magneet wordt er in de spoel **meeflux** opgewekt. Omdat beweging relatief is maakt het niet uit of de magneet naar de spoel toe beweegt of de spoel naar de magneet. Een draadraam kan worden opgevat als een spoel met één winding. Ook in een draadraam wordt de fluxverandering door de inductiestroom tegengewerkt.

Tegenflux	→	het opgewekte B-veld werkt de fluxtoename tegen
Meeflux	→	het opgewekte B-veld werkt de fluxafname tegen

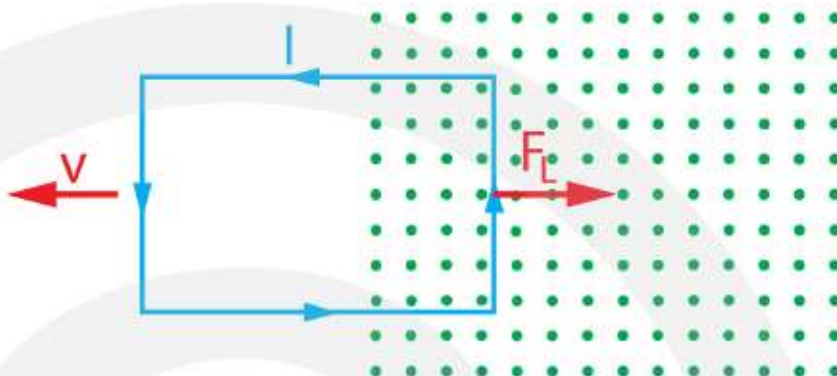
In figuur 53 wordt een draadraam in een extern B-veld gebracht. Vanwege de fluxverandering ontstaat er een inductiespanning en een inductiestroom, waardoor er een lorentzkracht ontstaat. De richting van de lorentzkracht is tegengesteld aan de richting van de snelheid. De inductiestroom door het draadraam wekt een B-veld op die tegengesteld is aan het externe B-veld. Er ontstaat **tegenflux**.



Figuur 53 De flux door het draadraam neemt toe. Opgewekt B-veld verzwakt extern B-veld → tegenflux.

In figuur 54 wordt een draadraad uit een extern B-veld getrokken. Vanwege de fluxverandering ontstaat er een inductiespanning en een inductiestroom, waardoor er een lorentzkracht ontstaat. De richting van de lorentzkracht is tegengesteld aan de richting van de snelheid. De inductiestroom door het draadraam wekt een B-veld op met dezelfde richting als het externe B-veld. Er ontstaat **meeflux**.

Figuur 54 De flux door het draadraam neemt af. Opgewekt B-veld versterkt extern B-veld → meeflux.



Wet van Lenz en lorentzkracht

Een draadraam wordt in een magnetisch veld getrokken waardoor de magnetische flux in het draadraam toeneemt. De fluxverandering veroorzaakt een inductiespanning en een inductiestroom. Het deel van het draadraam met lengte ℓ dat zich in het veld bevindt en dat loodrecht op $\vec{B}$ staat ondervindt een lorentzkracht.

$$F_L = B \cdot I \cdot \ell$$

De wet van Lenz houdt in dat de lorentzkracht op het draadraam altijd tegengesteld is gericht aan de bewegingsrichting van het draadraam. De opgewekte lorentzkracht werkt dus altijd als wrijvingskracht.

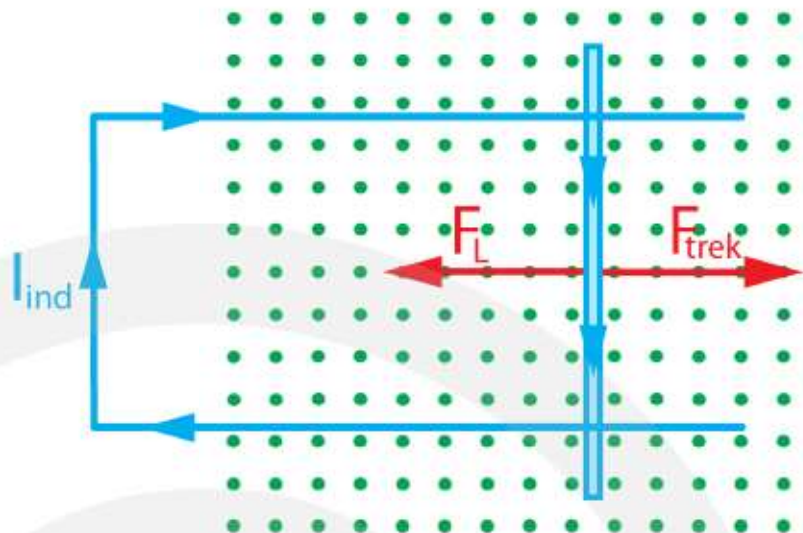
De wet van Lenz:

De richting van de lorentzkracht op een draadraam is tegengesteld aan de bewegingsrichting van het draadraam.

De opgewekte lorentzkracht werkt als wrijvingskracht.

In figuur 55 is een draadraam getekend waarvan de voorste staaf kan bewegen. Het draadraam bevindt zich in een magnetisch veld dat uit het vlak van de tekening komt. Aan de beweegbare staaf wordt met een kracht F getrokken zodat de flux door het draadraam toeneemt. Er gaat een inductiestroom I_{ind} lopen waardoor er op de staaf een lorentzkracht gaat werken. De richting van de lorentzkracht is tegengesteld aan de richting van de trekkracht. Met de linkerhandregel kan de richting van I_{ind} worden bepaald.

Figuur 55 De flux door het draadraam neemt toe doordat de voorste staaf naar rechts wordt getrokken. De opgewekte inductiestroom veroorzaakt een lorentzkracht die de trekkracht tegenwerkt.



Wet van Lenz en behoud van energie

Bij het draadraam van figuur 55 oefent de trekkracht arbeid uit op de voorste staaf. We gaan ervan uit dat deze staaf zonder wrijving kan bewegen. Als de trekkracht gelijk is aan de lorentzkracht, verplaatst de staaf zich met een constante snelheid. Hierdoor neemt de magnetische flux toe en gaat er een inductiestroom lopen. Vanwege de wet van behoud van energie is de arbeid die de trekkracht per seconde levert gelijk zijn aan de elektrische energie die per seconde wordt opgewekt. Arbeid wordt dus omgezet in elektrische energie.

Arbeid wordt omgezet in elektrische energie.

BEWIJS

- vermogen: $P = F_{\text{trek}} \cdot v$
- constante snelheid: $F_L = F_{\text{trek}}$
- ℓ is de lengte is van het bewegende deel van het draadraam
- per seconde neemt A toe met $\ell \cdot v$
- $\Phi = B_n \cdot A$ en $\frac{\Delta A}{\Delta t} = \ell \cdot v$
- $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_n \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = B_n \cdot \ell \cdot v$
- één winding: $U_{\text{ind}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_n \cdot \ell \cdot v$
- elektrische vermogen: $P = U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = (B_n \cdot \ell \cdot v) \cdot I_{\text{ind}}$
- $F_L = B_n \cdot I_{\text{ind}} \cdot \ell$
- $P = U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = F_L \cdot v$
- $U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = F_{\text{trek}} \cdot v$
- de arbeid die de trekkracht verricht wordt omgezet in elektrische energie