

12 Elektromagnetisme

vwo

12.0 Inleiding

Barnsteen (Engels: amber) is versteend hars dat miljoenen jaren geleden uit naaldbomen is gedropen. Het heeft een opvallende geeloranje kleur en is vaak doorzichtig. Al in de prehistorie wordt barnsteen gebruikt als sieraad, bijvoorbeeld door rendierjagers die 13000 jaar geleden in Nederland en het noorden van Duitsland woonden. Ook in het oude Egypte en het oude Griekenland is barnsteen geliefd en wordt het via handelsroutes uit Noord-Europa aangevoerd. Maar behalve dat barnsteen mooi is heeft het nog een andere eigenschap die in het oude Griekenland de aandacht trekt. Want als je met een vacht over barnsteen wrijft gaat het kleine voorwerpen aantrekken. Het Griekse woord voor barnsteen is "elektron" (ηλεκτρον).



Barnsteen (amber)

De vreemde kracht die gewreven barnsteen uitoefent op kleine voorwerpen is een raadsel dat lange tijd door niemand wordt begrepen. Pas in de 17^e eeuw komen elektrische verschijnselen weer in de belangstelling en gaan natuurkundigen onderzoeken hoe het zit. Een belangrijke stap wordt gezet door Pieter van Musschenbroek (1692–1761) uit Leiden, die 1745 de "Leidse fles" uitvindt, waardoor systematisch onderzoek aan elektriciteit mogelijk wordt. In Amerika laat **Benjamin Franklin** (1706–1790) in 1750 tijdens onweer bliksem inslaan op vliegers en vergelijkt dit met de vonken die je met een Leidse fles kan opwekken. Franklin ziet elektriciteit als een soort vloeistof en ontdekt dat er positieve en negatieve elektriciteit bestaat. Ook het inzicht dat elektrische lading behouden is wordt door hem vastgesteld.



Benjamin Franklin

De hoeveelheid elektrische lading die je in een Leidse fles kan opslaan is beperkt en vandaar dat wordt gezocht naar manieren om elektriciteit voor langere perioden te laten stromen. Dit lukt uiteindelijk dankzij de uitvinding van **Alessandro Volta** (1745 – 1827) die door middel van chemische reacties de eerste batterij maakt die bekend staat als de zuil van Volta. Om tot zijn uitvinding te komen maakt Volta gebruik van het werk van **Luigi Galvani** (1737–1798) die elektrische verschijnselen in dieren onderzoekt.



Alessandro Volta

Zo ontdekt Galvani in 1780 dat de spieren in kikkerpoten samen-trekken als ze elektrisch worden gestimuleerd. De biologische benadering van Galvani en de natuurkundige benadering van Volta leidt tot felle discussies maar is erg waardevol voor de verdere ontwikkeling. Want in 1775 ontleeft John Hunter het elektrische orgaan van sidderalen en toont hij aan dat dit bestaat uit een groot aantal zuilen van op elkaar gestapelde gebieden gescheiden door een vloeistof. Dit brengt Volta op het idee om het elektrische orgaan na te bootsen met op elkaar gestapelde plaatjes koper en zink gescheiden door een zoutoplossing. In 1799 lukt dit en is de eerste batterij een feit.



Luigi Galvani

Hans Christian Oersted (1777–1851) ontdekt in 1820 bij toeval dat een kompasnaald van richting verandert als je stroom door een draad laat lopen. Hiermee toont hij aan dat elektriciteit en magnetisme met elkaar te maken hebben. Een magnetische kracht kan worden opgewekt met elektrische stroom. Een verklaring hiervoor kan hij niet geven, maar zijn bijzondere ontdekking trekt de aandacht van **André-Marie Ampère** (1775–1836) die het verschijnsel nauwkeurig gaat onderzoeken.



Hans Christian Oersted

Ampère ziet dat twee stroomvoerende draden elkaar aantrekken of afstoten en dat deze kracht recht evenredig is met de lengte van de draad en de grootte van de stroomsterkten en omgekeerd evenredig met de afstand. Dit lijkt op de elektrische kracht, zoals gemeten door **Charles-Augustin de Coulomb** (1736–1806) met de door hem uitgevonden torsiebalans. Twee bollen met tegengestelde lading trekken elkaar aan en deze kracht is recht evenredig met de lading en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.

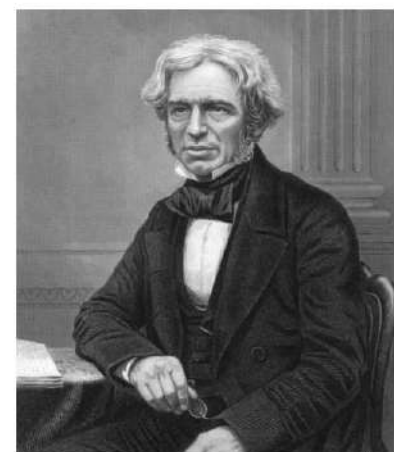


Charles-Augustin de Coulomb



André-Marie Ampère

De ontdekking van elektromagnetisme krijgt grote vooruitgang door het werk van **Michael Faraday** (1791–1867). Bij hem wil ik wat langer stilstaan, vanwege zijn opmerkelijke levensloop en zijn grote bijdrage aan de natuurkunde. Met alleen lagere school wordt hij als dertienjarige jongen leerling bij een boekbinder. Gedreven door nieuwsgierigheid leest hij veel en gaat hij naar lezingen over allerlei wetenschappelijke onderwerpen. Zijn belangstelling gaat vooral uit naar scheikunde en natuurkunde, met in het bijzonder de elektriciteit. Op zijn twintigste volgt hij lezingen van de scheikundige Humphry Davy die de elektrochemie uitvindt. Davy raakt onder de indruk van Faraday en stelt hem aan als laboratorium assistent. Met Davy reist hij door Europa

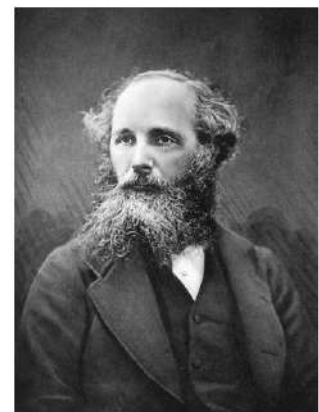


Michael Faraday

en ontmoet hij Volta en Ampère. Terug in Londen besluit Faraday om zelfstandig onderzoek te gaan doen aan elektromagnetisme. In 1824 wordt hij lid van de Royal Society en een jaar later directeur van de Royal Institution. Daar start hij zijn vermaarde lezingen, waarin hij zijn ontdekkingen presenteert aan kinderen en leken.

Als assistent van Davy ontdekt Faraday hoe chloorgas vloeibaar gemaakt kan worden, ontdekt hij benzeen en maakt hij verbindingen tussen koolstof en chloor. Faraday is de grondlegger van de elektrolyse en gebruikt daarbij de begrippen anode, kathode, elektrode en ion. De mogelijkheid om met elektrische stroom beweging te veroorzaken brengt hem op het idee om een elektromotor te ontwerpen, wat hem in 1821 lukt. Daarna ontdekt hij dat magnetisme invloed heeft op lichtstralen. In 1831 doet hij experimenten waarmee hij elektromagnetische inductie aantoonde. Met inductie kan elektriciteit worden verkregen uit beweging, waardoor grootschalig gebruik van elektriciteit mogelijk is. Verder hebben we aan Faraday ook het idee van elektrische en magnetische velden te danken, wat voor de verdere ontwikkeling van de natuurkunde van onschatbare waarde is. Tenslotte nog iets over zijn persoonlijke leven. Faraday is een toegewijd Christen en leeft sober. Hij weigert tal van eerbewijzen en wil niet benoemd worden tot ridder. Ook wil hij niet in de Westminster Abbey worden begraven.

Om alle elektrische en magnetische verschijnselen met elkaar in verband te brengen stelt **James Clerk Maxwell** (1831–1879) in 1861 twintig vergelijkingen op die later tot vier vergelijkingen worden samengevat. Dit zijn de beroemde Maxwellvergelijkingen die nog altijd de basis zijn van de klassieke elektrodynamica. De aanwezigheid van elektrisch en magnetisch velden is hiervan de essentie. Uit de vergelijkingen van Maxwell volgt dat elektromagnetische golven zich voorplanten met een vaste snelheid. Deze theoretisch afgeleide snelheid is gelijk aan de lichtsnelheid, waaruit volgt dat licht een elektromagnetische golf is. **Heinrich Hertz** levert hiervoor in 1886 het doorslaggevende bewijs.



James Clerk Maxwell

Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) toont aan dat breking van licht uit de Maxwellvergelijkingen kan worden afgeleid. In 1895 bewijst hij dat elektrische en magnetische velden kracht op een geladen deeltje uitoefenen. Deze kracht kennen we nu als de Lorentzkracht en heeft als bijzonderheid dat het magnetische deel van deze kracht afhankelijk is van de snelheid van het deeltje. Lorentz laat zien dat voor waarnemers die ten opzichte van elkaar bewegen de Maxwellvergelijkingen aangeven dat tijd en ruimte afhankelijk zijn van de snelheid. Hij stelt de formules op waarmee dit kan worden berekend. Einstein maakt hiervan gebruik in zijn speciale relativiteitstheorie.



Hendrik Antoon Lorentz

Inhoud

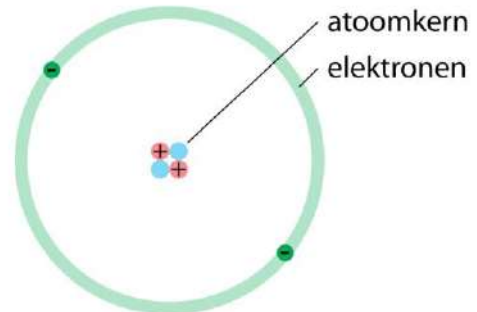
12.1	Elektrische kracht	6
–	Elektrisch geladen deeltjes	6
–	Elektrisch geladen voorwerpen	6
–	De wet van Coulomb	8
–	Het elektrisch veld	9
–	Elektrische veldlijnen	10
–	Homogeen E-veld	11
–	Radiaal E-veld	12
–	Geen E-veld in een holle geleider	12
–	Elektrische velden optellen	13
12.2	Elektrische energie	14
–	Arbeid en energie in een homogeen elektrisch veld	14
–	Elektrische spanning en elektrische energie	15
12.3	Deeltjes versnellen	17
–	Geladen deeltjes versnellen	17
–	Elektronvolt als eenheid van energie	18
–	Het elektronenkanon	18
–	Kathodestraal monitor (CRT)	19
–	Röntgenbuis	21
–	Lineaire deeltjesversneller	21
12.4	Het magnetisch veld	22
–	Permanente magneten	22
–	Atomaire oorzaak van magnetisme	22
–	Magnetische influentie	23
–	Magnetisch veld	23
–	Magnetische veldlijnen	24
–	Magnetisch veld om een staafmagneet	24
–	Homogeen magnetisch veld	25
12.5	Elektromagnetisme	26
–	Het magnetisch veld om een stroomvoerende draad	26
–	Een gebogen stroomdraad	27
–	Het magnetisch veld van een stroomspoel	27
–	Elektromagneet	27
12.6	Lorentzkracht	29
–	De grootte van de lorentzkracht op een stroomvoerende draad	30
–	De grootte van de lorentzkracht op een geladen deeltje	30
–	De richting van de lorentzkracht	31
–	Lorentzkracht op een stroomvoerende draadraam	32
–	Lorentzkrachten in een elektromotor	33

– Evenwijdige stroomvoerende draden	34
– Geladen deeltje in een magnetisch veld	34
– Cyclotron	35
– Large Hadron Collider	36
– Massaspectrometer	37
– E-veld en B-veld aanwezig	38
12.7 Inductiespanning	40
– Magnetische flux	40
– De inductiewet van Faraday	41
– Inductiespanning in een bewegend draadraam	42
– Generator (dynamo)	43
12.8 Richting van de inductiestroom	44
– De wet van Lenz	44
– Tegenflux en meeflux	44
– Wet van Lenz en de arbeid van de lorentzkracht	45
– Wet van Lenz en behoud van energie	46
12.9 Samenvatting	47
– Grootheden en eenheden	47
– Weten	47
– Formules	49
– Figuren	50

12.1 Elektrische kracht

Elektrisch geladen deeltjes

Atomen hebben een kern met protonen en neutronen met daaromheen elektronen. Protonen en elektronen hebben een elektrische lading. De lading van een proton is $1,6022 \cdot 10^{-19}$ C en die van een elektron $-1,6022 \cdot 10^{-19}$ C. Neutronen hebben geen elektrische lading. Omdat tegengestelde ladingen elkaar aantrekken blijven de protonen en elektronen bij elkaar, waarbij het aantal protonen gelijk is aan het aantal elektronen. Zie figuur 1.



Figuur 1 Een heliumatoom.

De massa van een proton is $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg en is vrijwel gelijk aan die van een neutron. De massa van een elektron is 1836 keer zo klein. Bij atomen wordt de massa meestal gegeven in de atomaire massa eenheid u. Dit is 1/12 van de massa van een koolstof-12 atoom en is $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg. In de hoofdstukken kernfysica en kwantummechanica ga je hier meer over leren.

Elektrisch geladen voorwerpen

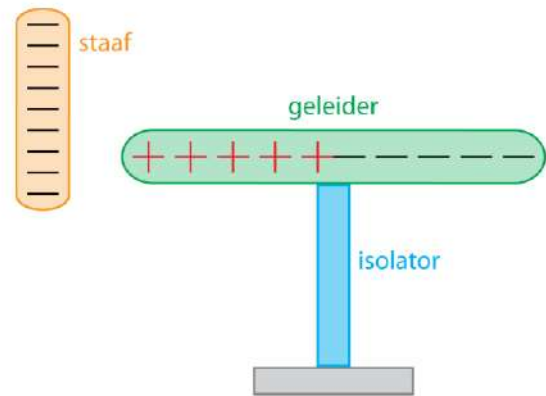
Voorwerpen zijn gemaakt van atomen en omdat atomen geen elektrische lading hebben zijn voorwerpen normaalgesproken ongeladen. Door erover te wrijven kan een voorwerp een elektrische lading krijgen. Wrijf je met een zijden doek over een glazen staaf, dan springen er elektronen van het glas naar de doek, waardoor de zijden doek een negatieve lading en de glazen staaf een positieve lading krijgt. De staaf en het doek gaan elkaar aantrekken en de elektrische kracht die hiervoor zorgt werkt door de lege ruimte heen. Voorwerpen hoeven elkaar dus niet aan te raken om elkaar aan te trekken of af te stoten. Er moet iets aanwezig zijn om een geladen voorwerp waardoor een ander voorwerp in de buurt zich anders gaat gedragen. De beïnvloeding van de omgeving door een geladen voorwerp noem je **influentie**.

– polarisatie van een geleider –

Als voorbeeld nemen we een elektrische geleider die geïsoleerd is opgesteld. Zie figuur 2. Breng je 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 van de staaf zijn er minder elektronen dan aan de andere kant. 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 dichtbij de staaf is dan de minpool trekken de staaf en de geleider elkaar aan.

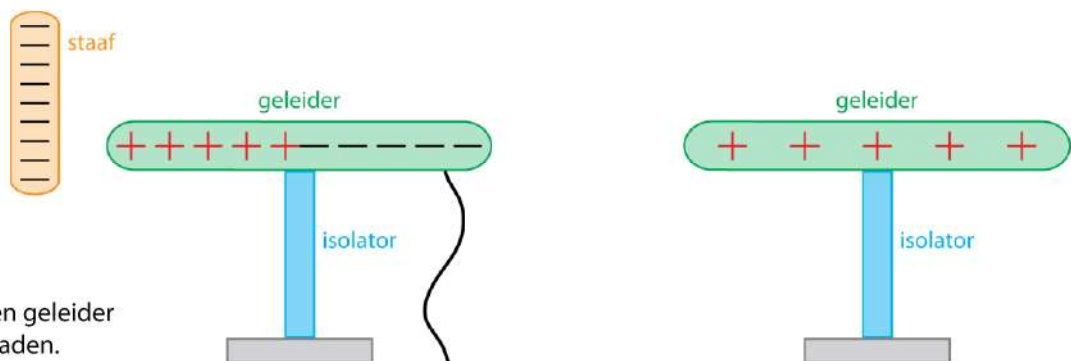
Influentie veroorzaakt een herverdeling van elektronen in een geleider.

De herverdeling van de elektronen blijft bestaan zolang de staaf in de buurt is. Neem je 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 2 Een geleider wordt door een negatief geladen staaf gepolariseerd.

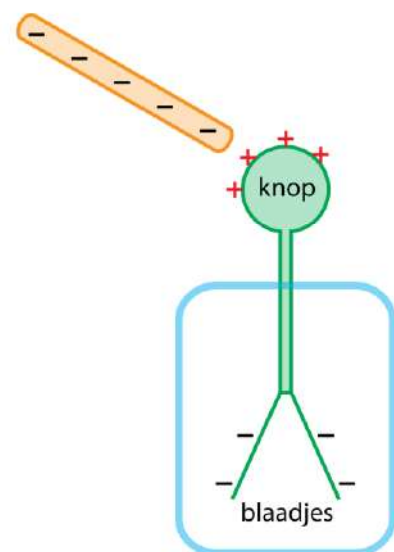
Door influentie kan een geleider een permanente elektrische lading krijgen. Dat gaat als volgt. Net als in figuur 2 polariseren we een geleider met een negatief geladen staaf. Vervolgens raken we de negatieve pool kort aan met een koperdraad die met de aarde is verbonden. Negatieve lading (elektronen) stroomt hierdoor weg naar de aarde, waardoor de geleider als geheel een tekort aan negatieve lading krijgt en dus positief wordt geladen. Zie figuur 3. 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.



Figuur 3 Een geleider wordt opgeladen.

– 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 stromen. De blaadjes krijgen een negatieve lading en gaan elkaar afstoten. Als je de staaf wegneemt 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 nu niet meer terug naar de knop. Ook als je de staaf wegneemt stoten de blaadjes elkaar af.

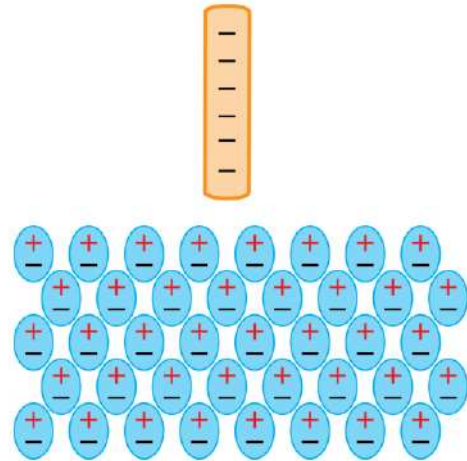


Figuur 4 Elektroscop.

– 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**.

Breng je 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 5. Polarisation van een isolator heet **diëlektrische polarisatie**.



Figuur 5 Diëlektrische polarisatie.

De wet van Coulomb

De aanwezigheid van influentie duidt op de aanwezigheid van een elektrische kracht die over een afstand werkt. Als twee geladen voorwerpen stilstaan ten opzichte van elkaar wordt de grootte van de elektrische kracht 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: $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ m}^{-2} \text{ N}^{-1}$
- 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 wat

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 een "boodschapper" te zijn die de kracht overdraagt. Bij de elektrische kracht is de boodschapper het **foton** die je in latere hoofdstukken gaat tegenkomen. Voor de gravitatiekracht is de boodschapper veel minder duidelijk. Het bestaan van het **graviton** wordt gesuggereerd, maar dit hypothetische deeltje is tot nu toe nog nooit waargenomen.

Behalve de 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**, maar voor zover nu bekend trekken materie en antimaterie elkaar ook aan.

Het tweede verschil is de sterkte. Elektrische kracht is onnoemelijk veel sterker dan de gravitatiekracht. Dit zie je bijvoorbeeld in een waterstofatoom dat bestaat uit een proton en een elektron op een afstand van $5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$. Het proton en elektron trekken elkaar aan vanwege de ladingen en vanwege de massa. Laten we deze krachten eens met elkaar vergelijken.

Elektrische aantrekkende kracht tussen het proton en het elektron in een H-atoom.

- $q_1 = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad | \quad q_2 = -1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad | \quad r = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m} \quad | \quad F_{\text{el}} = \dots \text{ N}$
- $F_{\text{el}} = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \rightarrow F_{\text{el}} = 8,988 \cdot 10^9 \cdot \frac{-(1,6022 \cdot 10^{-19})^2}{(5,29 \cdot 10^{-11})^2} = -8,24 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Gravitatiekracht tussen het proton en het elektron in een H-atoom.

- $m_1 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad | \quad m_2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad | \quad r = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m} \quad | \quad F_{\text{G}} = \dots \text{ N}$
- $F_{\text{G}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \rightarrow F_{\text{G}} = 6,674 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}}{(5,29 \cdot 10^{-11})^2} = 3,63 \cdot 10^{-47} \text{ N}$

Hieraan zie je dat de gravitatiekracht ongeveer 10^{40} keer zwakker is dan de elektrische kracht. In de scheikunde speelt gravitatiekracht dan ook geen enkele rol. Alle chemische processen worden veroorzaakt door elektrische krachten.

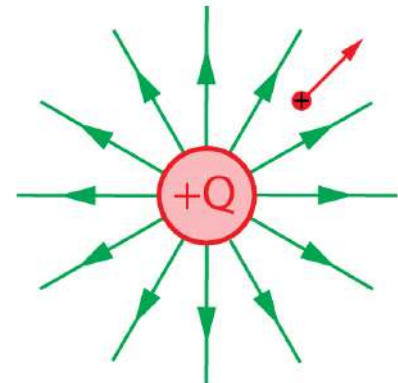
Het elektrisch veld

Elektrische kracht werkt door de lege ruimte. Om dit te beschrijven introduceren we het **elektrische veld, E-veld**. Aan punt P in de omgeving van een elektrisch geladen voorwerp ken je een vector toe. Dit is de E-veld vector. De grootte van het E-veld is de grootte van de kracht die een lading van één coulomb in punt P ondervindt. De richting van de E-veld is de richting van de elektrische kracht die een positieve lading in punt P ondervindt. De eenheid van elektrisch veldsterkte is newton per coulomb N/C.

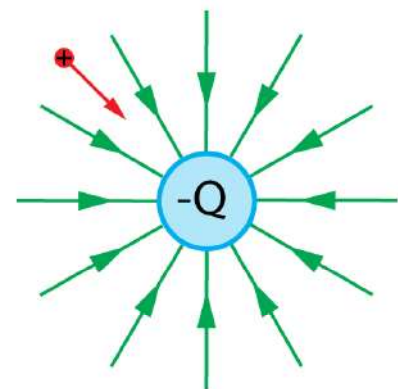
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{el}}}{q}$$

- $\vec{E}$ 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)

In figuur 6 boven zie je een positief geladen voorwerp. De groene lijnen stellen het elektrisch veld voor. Een positieve lading (rode stip) bevindt zich in de buurt van het voorwerp. De ladingen stoten elkaar af in de richting van de veldlijnen.



In figuur 6 onder zie je een negatief geladen voorwerp die een positieve lading (rode stip) aantrekt 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.

Figuur 6 Elektrisch veld om een positief en een negatief geladen voorwerp.

Elektrische veldlijnen

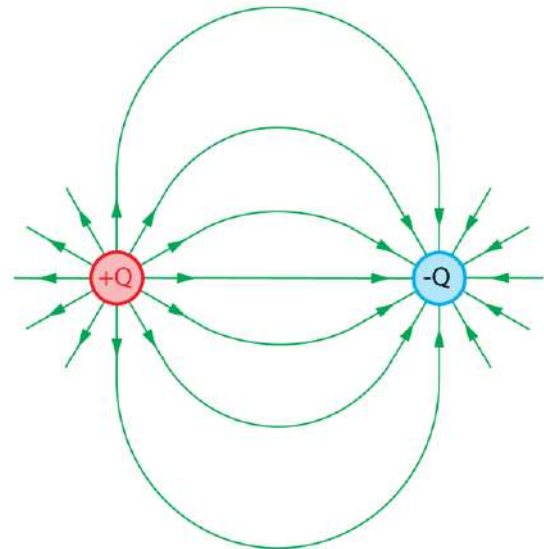
De groen getekende lijnen in figuur 6 die de richting aangeven van de elektrische kracht noem je **elektrische veldlijnen**. Hiervoor geldt:

- 1) **De richting van de elektrische kracht op een positieve lading in punt P is gelijk aan de richting van de raaklijn aan de E-veldlijn in P.**
- 2) **Door ieder punt in de ruimte gaat één elektrische veldlijn.**

Elektrische veldlijnen kun je zichtbaar maken door korreltjes isolerend materiaal (griesmeel) in olie te brengen tussen een positieve en negatieve pool van een spanningsbron. Om deze polen is een elektrisch veld, waardoor de griesmeelkorrels worden gepolariseerd. De positieve kant van een griesmeelkorrel trekt de negatieve kant van een naburige korrel aan waardoor ze zich als kralen aan elkaar rijgen en lijnen vormen. Deze lijnen hebben dezelfde richting als de elektrische veldlijnen. In figuur 7 zie je de elektrische veldlijnen tussen een positief en een negatief geladen voorwerp.

Elektrische velden hebben de volgende eigenschappen:

- 1 Elektrische veldlijnen beginnen op een positieve lading en eindigen op een negatieve lading.
- 2 Door ieder punt van de ruimte gaat één E-veldlijn. Veldlijnen snijden elkaar niet.
- 3 Veldlijnen beginnen en eindigen loodrecht op een geladen voorwerp.
- 4 De afstand tussen de veldlijnen geeft de sterkte van het E-veld aan. Hoe kleiner deze afstand is hoe sterker het E-veld.



Figuur 7 Elektrische veldlijnen.

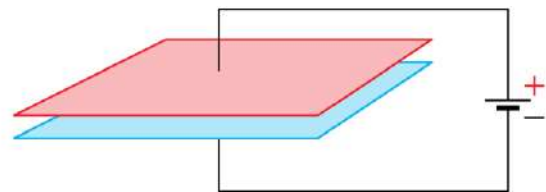
Homogeen E-veld

Twee evenwijdige metalen platen met een isolerende tussenruimte noem je een **condensator**. In een condensator kan elektrische energie worden opgeslagen.



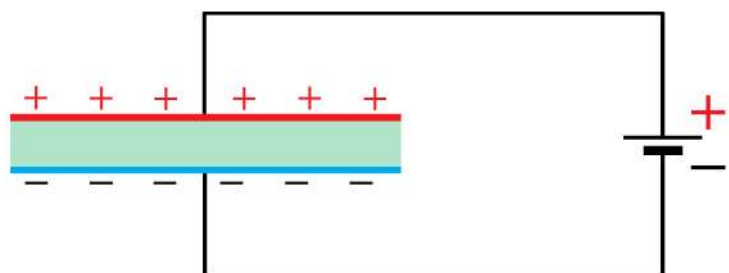
Figuur 8 Een condensator.

Een condensator wordt aangesloten op een spanningsbron, zie figuur 9. 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 waardoor de bovenste plaat een positieve lading krijgt en de onderste plaat een negatieve lading.



Figuur 9 Een condensator aangesloten op een spanningsbron.

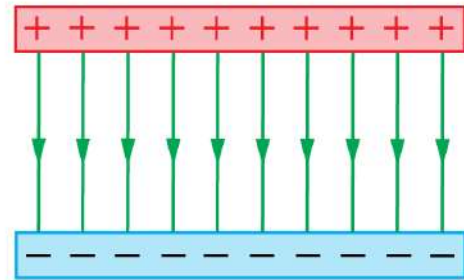
De negatieve lading van de onderste plaat zorgt ervoor dat het steeds moeilijker wordt om nog meer elektronen van de bovenste naar de onderste plaat te brengen. Het opladen van een condensator kost arbeid, en deze arbeid wordt opgeslagen als elektrische energie. Op een bepaald moment houdt het pompen van elektronen op en is de condensator helemaal opgeladen. Zie figuur 10. Tussen de platen van een condensator bevindt zich nu een **homogeen** E-veld. Zie figuur 11.



Figuur 10 Opgeladen condensator. Tussen de positief en negatief geladen plaat bevindt zich een homogeen E-veld.

Een homogeen E-veld heeft de volgende eigenschappen:

- 1 de veldlijnen zijn recht
- 2 de veldlijnen zijn evenwijdig aan elkaar
- 3 de dichtheid van de veldlijnen is overal gelijk



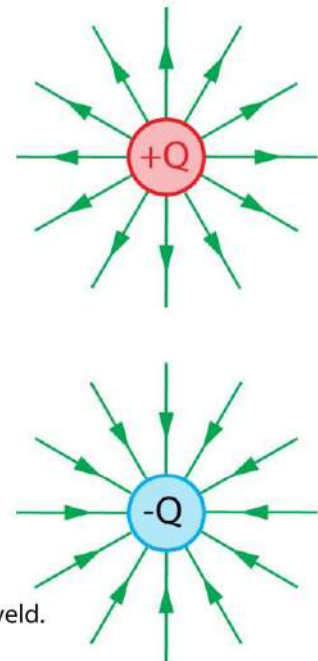
Figuur 11 Homogeen E-veld.

Radiaal E-veld

Om een bolvormig geladen voorwerp bevindt zich een **radiaal E-veld**. Zie figuur 12. Dichtbij het voorwerp is de veldsterkte groter dan verder weg, wat wordt weergegeven door de veldlijnen dichter bij elkaar te tekenen.

Een radiaal E-veld heeft de volgende eigenschappen:

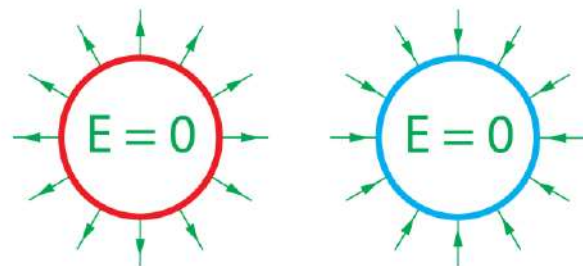
- 1 de veldlijnen zijn recht
- 2 verlengde veldlijnen komen samen in één punt
- 3 de dichtheid van de veldlijnen neemt naar buiten toe af



Figuur 12 Radiaal E-veld.

Geen E-veld in een holle geleider

De elektrische veldsterkte binnen een holle geleider is altijd nul. Dit komt omdat bij een geleider de lading zich over het oppervlak kan verplaatsen. Zolang een E-veld aanwezig is binnen in de geleider past de verdeling van de lading op het oppervlak zich aan totdat binnenin de veldsterkte nul is.



Figuur 13 Binnen in een holle geleider is de elektrische veldsterkte altijd nul.

De elektrische veldsterkte in een holle geleider is altijd nul.

Deze eigenschap wordt toegepast in een **Faradaykooi**. Dit is een metalen kooi die om gevoelige meetapparatuur wordt geplaatst. Door de Faradaykooi 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 14.

Figuur 14 Demonstratie van een Faraday kooi. Zelfs zeer sterke ontladingen zijn ongevaarlijk, omdat het E-veld niet in de kooi kan binnendringen.

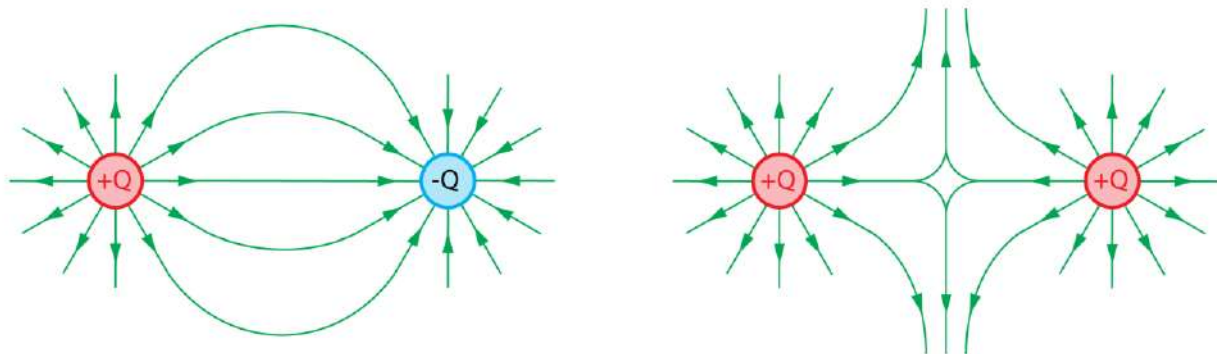


Elektrische velden optellen

Net zoals je krachten bij elkaar mag optellen om de resulterende elektrische kracht te vinden kun je ook elektrische velden bij elkaar optellen. Je moet daarbij rekening houden met de richting. Zoals je in het hoofdstuk kracht hebt geleerd moet je bij het optellen van elektrische velden de kop-staartmethode of de parallelogrammethode gebruiken.

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

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



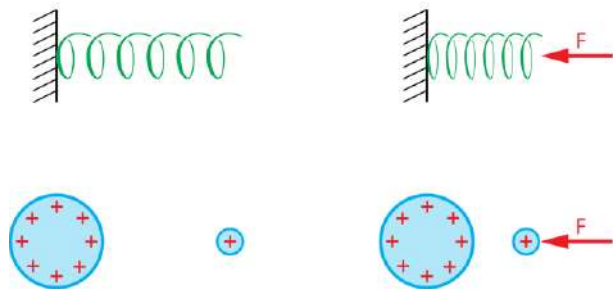
Figuur 15 Optellen van de E-velden. De veldlijnen geven de richting aan van de resulterende kracht.

12.2 Elektrische energie

Arbeid en energie in een homogeen elektrisch veld

In figuur 16 vergelijken we het indrukken van een veer met het bij elkaar brengen van twee positieve ladingen. Om een veer in te drukken moet je kracht zetten en verplaats je daarmee de achterkant van de veer. De kracht die je uitoefent verricht arbeid en deze arbeid kan worden opgeslagen als veerenergie. Zie figuur 16 boven. Als we twee positieve ladingen naar elkaar toe brengen doen we iets vergelijkbaars. We oefenen kracht uit om de ladingen bij elkaar te brengen. Deze kracht verricht arbeid en deze arbeid kan worden opgeslagen als elektrische energie. Zie figuur 16 onder.

Voor de arbeid die kracht F uitoefent geldt $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$. Hierin is α de hoek tussen de richting van de kracht en de richting van de verplaatsing. Combineer je dit met $F_{el} = q \cdot E$ dan vind je voor de elektrische energie $W = q \cdot E \cdot s \cdot \cos \alpha$.

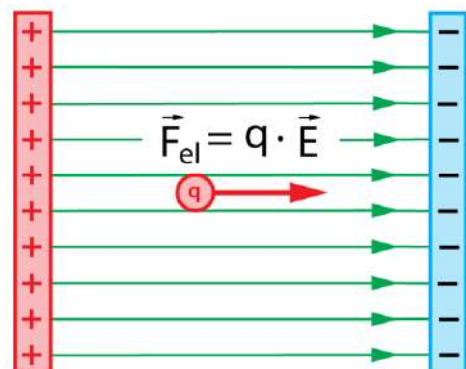


Figuur 16 Veerenergie en elektrische energie.

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

- 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 ($^\circ$)
- 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 16 maken we veerenergie (boven) en elektrische energie (onder). Als de veer ontspant oefent de veerkracht arbeid uit. Hetzelfde geldt voor elektrische energie. Als de afstand tussen de positieve ladingen groter wordt oefent de elektrische kracht arbeid uit. In figuur 17 zie je een geladen deeltje in een homogeen E-veld. De elektrische kracht heeft dezelfde richting als het E-veld en oefent arbeid uit op het geladen deeltje.



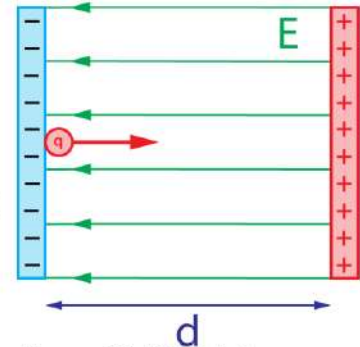
Figuur 17 Elektrische kracht verricht arbeid.

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 spanning en elektrische energie

De verandering van energie hangt alleen af van het begin en het eind. Hoe je van begin naar eind gaat maakt niet uit. In figuur 18 brengen we een lading +q van een negatief geladen plaat naar een positief geladen plaat. Hierdoor verandert de elektrische energie $\Delta E_{el} = q \cdot E \cdot d$, waarbij d de afstand is tussen de platen. Hoe het deeltje van de ene naar de andere plaat is gegaan heeft geen invloed op de uitkomst en vandaar dat het handig is om de grootte **spanning U** in te voeren waarvoor geldt $U = E \cdot d$. We vinden nu $\Delta E_{el} = q \cdot U$.



Figuur 18 Elektrische energie en spanning.

$$U = E \cdot d$$

- U is de spanning in volt (V)
- E is de elektrische veldsterkte in newton per coulomb (N/C) of volt per meter (V/m)
- d is de afstand langs een elektrische veldlijn in meter (m)

De eenheid van elektrische veldsterkte is newton per coulomb (N/C) of volt per meter (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 toename 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. Het kogeltje wordt 40 cm verplaatst tegen de richting van het veld.

Bereken de spanning tussen begin en eindplaats.

- $E_{el} = q \cdot E \cdot s \rightarrow E_{el} = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 0,4 = 6,0 \text{ J}$
- $\Delta E_{el} = q \cdot U \rightarrow 6 = 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot U \rightarrow U = 1200 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ V}$

MERK OP 3000 volt per meter = 1200 volt per 0,40 meter → KLOPT

VOORBEELD batterij

Een penlight batterij geeft 1,5 V spanning en heeft een capaciteit is 2500 mAh. Dit betekent dat de batterij één uur 2,5 A stroom kan leveren.

Hoeveel elektrische energie kan een penlight batterij leveren?

- $q = A \cdot t \rightarrow q = 2,5 \cdot 3600 = 9000 \text{ C}$
- $\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U \rightarrow \Delta E_{\text{el}} = 9000 \cdot 1,5 = 1,35 \cdot 10^4 = 1,4 \cdot 10^4 \text{ J}$



VOORBEELD supercondensator

Een condensator kan ook energie opslaan. Een supercondensator geeft 2,7 V spanning en heeft een capaciteit van 3000 F. Dit betekent dat de condensator $3000 \cdot 2,7$ coulomb lading kan opslaan.

Hoeveel elektrische energie kan een supercondensator leveren?

- $q = 3000 \cdot 2,7 = 8100 \text{ C}$
- $\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U \rightarrow \Delta E_{\text{el}} = 8100 \cdot 2,7 = 2,187 \cdot 10^4 = 2,2 \cdot 10^4 \text{ J}$



12.3 Deeltjes versnellen

Geladen deeltjes versnellen

Op een geladen deeltje in een E-veld werkt een elektrische kracht waardoor het deeltje wordt versneld. De elektrische kracht verricht arbeid en deze arbeid wordt omgezet in kinetische energie. De totale energie blijft gelijk $\Delta E_{\text{el}} + \Delta E_{\text{K}} = 0$ en de afname van de elektrische energie is daarom gelijk aan de toename van de kinetische energie.

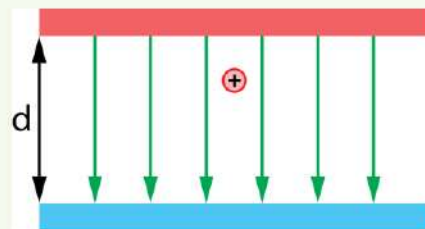
$$-\Delta E_{\text{el}} = \Delta E_{\text{K}} \rightarrow -q \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{eind}}^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{begin}}^2$$

- $-\Delta E_{\text{el}}$ is de afname van de elektrische energie in joule (J)
- q is de lading van het deeltje in coulomb (C)
- U is de spanning tussen eind en begin in volt (V)
- ΔE_{K} is de toename 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)

Een positief geladen deeltje wordt versneld door een negatieve spanning. Voor $-q \cdot U$ vind je dus een positief getal. Een negatief geladen deeltje wordt versneld door een positieve spanning en ook nu is $-q \cdot U$ een positief getal.

VOORBEELD versnellen van lading in een condensator

Bij condensator is de spanning tussen de platen -300 V . De afstand tussen de platen is $4,0 \text{ mm}$. 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 19.



Figuur 19

Bereken de snelheid waarmee het deeltje de onderste plaat treft.

- $U = \frac{3}{4} \cdot (-300) = -225 \text{ V} \mid q = 40 \cdot 10^{-6} \text{ C} \mid \Delta E_{\text{K}} = \dots \text{ J}$
- $-q \cdot U = \Delta E_{\text{K}} \rightarrow 40 \cdot 10^{-6} \cdot 225 = \Delta E_{\text{K}} \rightarrow \Delta E_{\text{K}} = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
- $9,0 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 300 = 3,0 \cdot 10^2 \text{ m/s}$

OOK GOED

- $U = E \cdot d \rightarrow 300 = E \cdot 4,0 \cdot 10^{-3} \rightarrow E = 7,5 \cdot 10^4 \text{ V/m}$
- $F_{\text{el}} = q \cdot E \rightarrow F_{\text{el}} = 40 \cdot 10^{-6} \cdot 7,5 \cdot 10^4 = 3,0 \text{ N}$
- $W = F_{\text{el}} \cdot s \rightarrow W = 3,0 \cdot 3,0 \cdot 10^{-3} = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
- $W = \Delta E_{\text{K}} \rightarrow 9,0 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 300 = 3,0 \cdot 10^2 \text{ m/s}$

Elektronvolt als eenheid van energie

De lading van een proton is de kleinst 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**: $\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U \rightarrow \Delta E_{\text{el}} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

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 elektron

Een elektron wordt met een spanning van 5000 V uit stilstand versneld.

Bereken hoeveel de elektrische energie van het elektron verandert in eV.

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

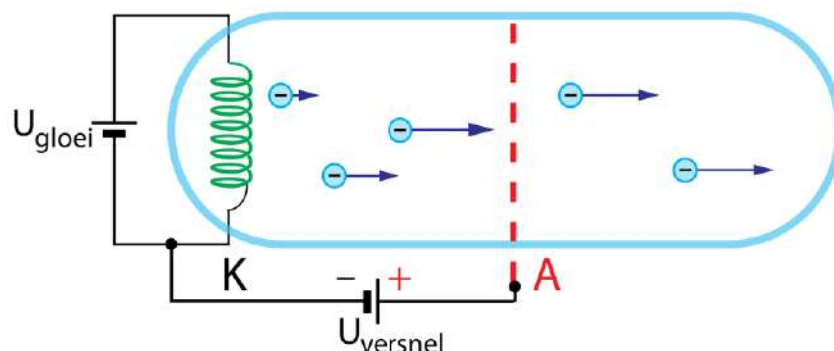
Bereken de eindsnelheid van het elektron.

- $\Delta E_{\text{el}} = -5000 \text{ eV} \rightarrow \Delta E_{\text{el}} = -5000 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} = -8,0109 \cdot 10^{-16} \text{ J}$
- $\Delta E_{\text{el}} = -8,0109 \cdot 10^{-16} \text{ J} \mid m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \mid v_{\text{begin}} = 0 \text{ m/s}$
- $-\Delta E_{\text{el}} = \Delta E_K \rightarrow 8,0109 \cdot 10^{-16} = \frac{1}{2} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow v_{\text{eind}} = 4,2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

MERK OP dat het elektron een hele grote snelheid krijgt

Het elektronenkanon

Aan bovenstaand voorbeeld zie je dat atomaire deeltjes een grote snelheid kunnen krijgen. Dit komt omdat de massa klein is en de elektrische kracht groot. Omdat $\Sigma F = m \cdot a$ geeft een grote kracht in combinatie met een kleine massa een grote versnelling. Om elektronen een hoge snelheid te geven wordt een elektronenkanon gebruikt. In figuur 20 zie je hoe het werkt.

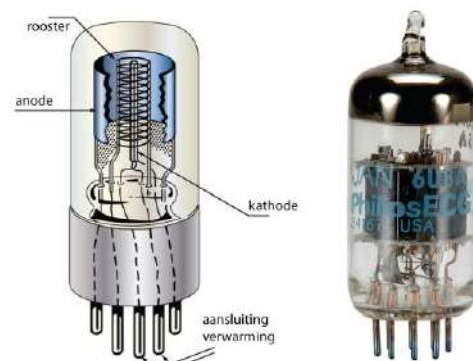


Figuur 20
Elektronenkanon.

- een elektronenkanon bevindt zich in een **vacuümbuis**
- tussen een **gloeidraad** en een **metaalgaasje** wordt spanning U_{versnel} aangebracht
- de gloeidraad krijgt een negatieve spanning en is de **kathode**
- het metaalgaasje krijgt een positieve spanning en is de **anode**
- de gloeidraad heeft spanning $U_{\text{gloeï}}$ waardoor het een hoge temperatuur krijgt
- 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 **kathodestralen** 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** $E_K = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- behoud van energie $-q \cdot U_{\text{versnel}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ neem aan $v_{\text{begin}} = 0$

Omdat elektronen altijd van de kathode naar de anode bewegen en nooit andersom is het elektronenkanon in 1904 voor het eerst toegepast als **diode**. In een diode loopt elektrische stroom maar in één richting. Diodes worden daarom toegepast als **gelijkrichter** waarmee wisselstroom wordt omgezet in gelijkstroom.

In 1906 wordt de **triode** uitgevonden. Tussen de kathode en de anode bevindt zich nu een rooster waarop een spanning kan worden aangebracht. Met deze derde elektrode (vandaar de naam triode) kunnen elektronen worden afgeremd. Een kleine verandering van de roosterspanning veroorzaakt een grote verandering van de elektronenstroom. Vandaar dat een triode wordt gebruikt als **versterker**. De triode is de voorloper van de **transistor**.



Figuur 21 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 versnellingsspanning tussen 10^3 en 10^5 volt. Met een elektronenmicroscop kunnen voorwerpen tot tienmiljoen keer worden vergroot.

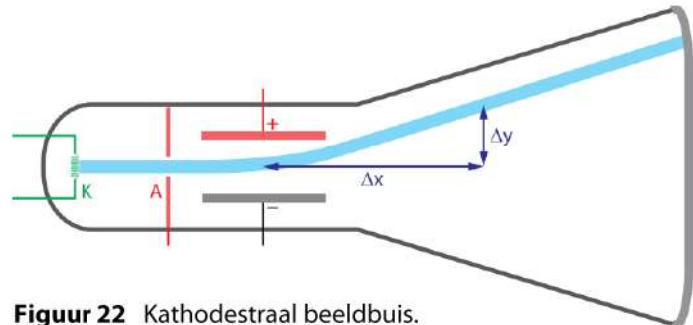
Kathodestraal monitor (CRT)

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 22 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. In figuur 22 zijn alleen de verticale afbuigplaten weergegeven.

Punt voor punt wordt het scherm bestraald, zodat een afbeelding ontstaat. Als deze afbeelding snel wordt aangepast ontstaat een bewegend beeld.



Figuur 22 Kathodestraal beeldbuis.

VOORBEELD beeldbuis

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

Bereken de snelheid van de elektronen bij de anode.

- $\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U_{\text{versnel}} \rightarrow E_{\text{el}} = -1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 2,0 \cdot 10^4 = -3,20436 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- $-\Delta E_{\text{el}} = \Delta E_K \rightarrow 3,20436 \cdot 10^{-15} = \frac{1}{2} \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot v_{\text{eind}}^2$
- $v_{\text{eind}} = 8,38757 \cdot 10^7 = 8,4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

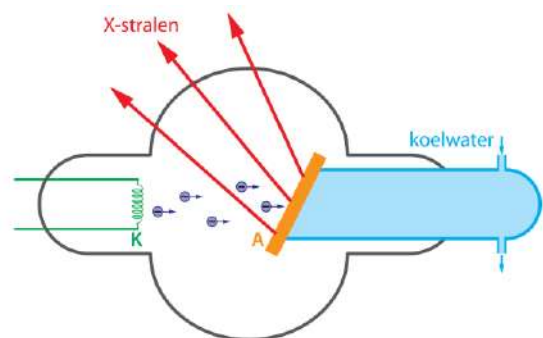
Je wil de elektronen een snelheid in de y-richting geven van $7,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Zie figuur 22.

Bereken de afbuigspanning die hiervoor nodig is.

- $\Delta E_K = \frac{1}{2} m \cdot v_{\text{eind}}^2 \rightarrow \Delta E_K = \frac{1}{2} \cdot 9,10983 \cdot 10^{-31} \cdot (7,5 \cdot 10^6)^2 = 2,56214 \cdot 10^{-17} \text{ J}$
- $-\Delta E_{\text{el}} = \Delta E_K \rightarrow -q \cdot U = 2,56214 \cdot 10^{-17}$
- $1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot U = 2,56214 \cdot 10^{-17} \rightarrow U = 1,59916 \cdot 10^2 = 1,6 \cdot 10^2 \text{ V}$

Röntgenbuis

In een röntgenbuis worden elektronen versnelt tot ze tussen 10 keV en 100 keV kinetische energie hebben. De elektronen botsen op een watergekoelde anode van bijvoorbeeld koper. Een elektron van de binnenste schil van een koperatoom wordt losgeslagen en dit geeft röntgenstraling. Zie figuur 23.

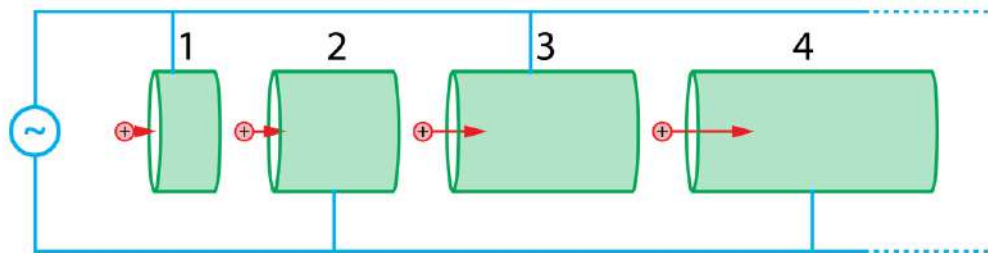


Figuur 23 Röntgenbuis

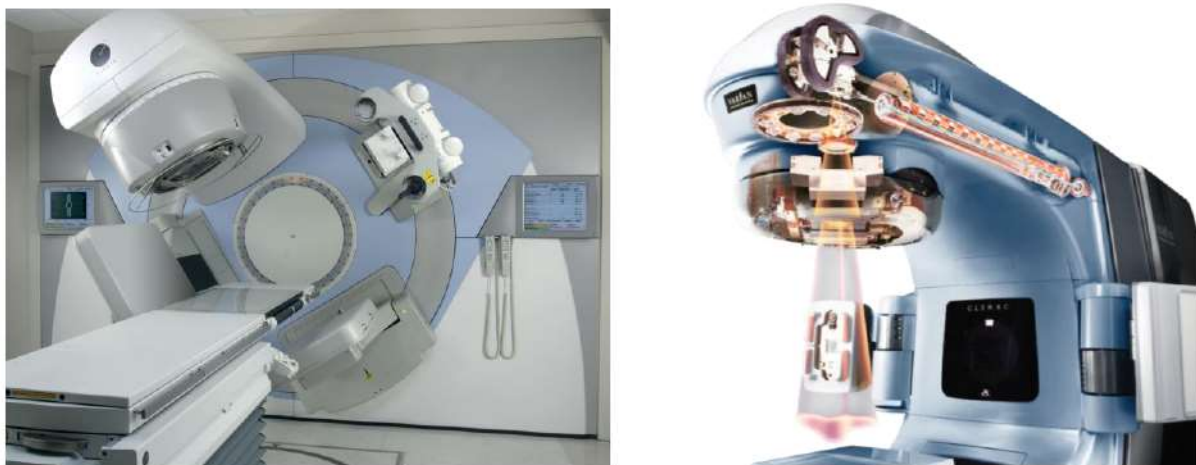
Lineaire deeltjesversneller

Lineaire deeltjesversnellers worden gebruikt om atoomkernen te onderzoeken. Hierbij worden atoomkernen beschoten met deeltjes die genoeg energie hebben om kernen te splijten. De deeltjes worden in stappen versneld tot bijna de lichtsnelheid. De versneller bestaat uit buizen die steeds langer worden. Zie figuur 24. Tussen de buizen wordt een spanning aangelegd, waarmee de deeltjes worden versneld. Als de deeltjes binnenin een buis zijn wordt de spanning snel omgekeerd, zodat ze bij het verlaten van de buis opnieuw worden versneld. Hierdoor wordt de snelheid steeds groter. De oneven buizen 1, 3, 5, ... zijn aangesloten op de ene pool en de even buizen 2, 4, 6, ... op de andere pool. Met een vaste frequentie verandert de spanning van teken. Dit noem je een **wisselspanning**. Omdat de snelheid groter wordt moeten de buizen steeds langer worden, zodat de verblijftijd in een buis gelijk blijft.

Figuur 24
Lineaire
deeltjesversneller.



Lineaire elektronenversnellers worden ook gebruikt in het ziekenhuis bij de afdeling radio-
logie voor bestraling van patiënten met kanker. Zie figuur 25.



Figuur 25 Lineaire elektronenversneller in een ziekenhuis voor radiotherapie.

12.4 Het magnetisch veld

Permanente magneten

Magneten hebben bijzondere eigenschappen. Ze trekken ijzeren voorwerpen wél aan maar houten of plastic voorwerpen niet. Net als bij de elektrische kracht gaat ook de magnetische kracht door de lege ruimte heen. Een magneet trekt ieder ijzeren voorwerp aan, behalve als dit voorwerp ook een magneet is. Dan kan de kracht zowel **aantrekkend** als **afstotend** zijn. De aantrekkende kracht verandert in een afstotende kracht als één van de magneten wordt omgedraaid. Hieruit kun je concluderen dat magneten twee polen hebben, een **noordpool** en een **zuidpool**. Magnetische noordpolen stoten elkaar af en magnetische zuidpolen ook. 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 wijst en de ander kant naar de geografische Zuidpool. De kant die naar de geografische Noordpool wijst is de noordpool van de magneet en 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

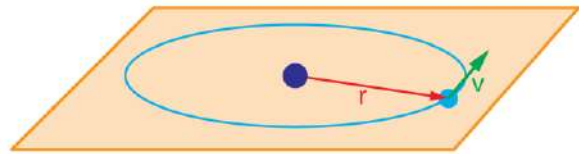
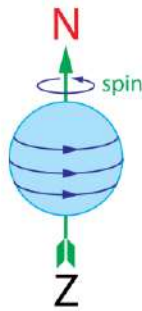
- Van maar weinig stoffen kan een permanente magneet worden gemaakt.
- Een permanente magneet trekt alleen stof aan die ook magnetisch kan zijn.
- Een magneet heeft altijd een noordpool en een zuidpool.
- Magnetische noordpolen stoten elkaar af en magnetische zuidpolen stoten elkaar ook af; noordpolen en zuidpolen trekken elkaar aan.
- Als je een magneet doormidden breekt krijg je twee magneten met ieder een noordpool en een zuidpool.

Van maar enkele materialen kun je een permanente magneet maken. Er zijn maar drie elementen die permanent magnetisch kunnen zijn: **ijzer**, **nikkel** en **kobalt**. Metaaloxiden, zoals Fe_3O_4 (magnetiet) en CrO_2 zijn ook magnetisch. In 1980 is ontdekt dat je van legeringen met zeldzame aardmetalen ook permanente magneten kunt maken. De sterkste magneten worden gemaakt van $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (een legering van neodymium, ijzer en boor) en SmCo_5 (een legering van samarium en kobalt).

Atomaire oorzaak van magnetisme

Magnetisme wordt voornamelijk veroorzaakt door elektronen. Elektronen zijn minuscule magneten. Het lijkt wel of ze voortdurend om hun eigen as tollen. Dit wordt de **elektron-spin** genoemd naar het Engelse "spinning" (rondtollen). Behalve het rondtollen bewegen elektronen om de atoomkern en ook dit draagt bij aan het magnetisme. Zie figuur 26. Het rondtollen van elektronen mag je niet letterlijk opvatten. Het is maar een beeld, want de werkelijkheid is veel ingewikkelder. Spin is een kwantummechanische eigenschap en kan niet worden begrepen met klassieke ideeën over bewegende deeltjes. Later in dit hoofdstuk leer je dat magnetisme ook wordt veroorzaakt door bewegende lading.

Figuur 26 Magnetisme wordt veroorzaakt door de spin van de elektronen (links) en doordat elektronen om de atoomkernen draaien (rechts).



Magnetische influentie

We bekijken het effect van een permanente magneet op ijzeren spijkers. Als een spijker in de buurt van een permanente magneet komt wordt hij aangetrokken. Een andere spijker wordt nu door deze spijker aangetrokken en als dat gebeurt kan de tweede spijker ook weer een andere spijker aantrekken. Er ontstaat een keten van spijkers die kop–staart zijn georiënteerd, waaruit we concluderen dat een ijzeren spijker in de buurt van een magneet zelf tijdelijk ook een magneet wordt en een andere spijker kan aantrekken. Dit heet **magnetische influentie** (beïnvloeding).



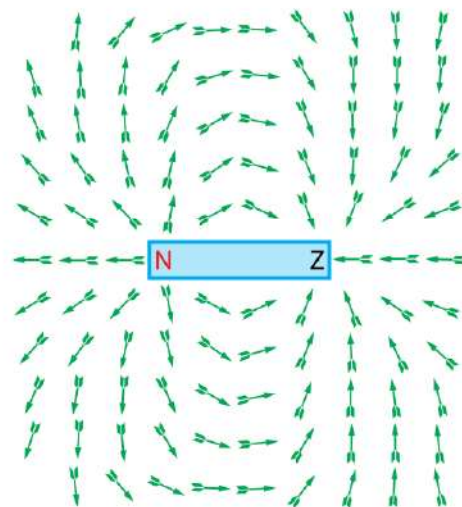
Figuur 27 Magnetische influentie.

Zodra de permanente magneet wordt verwijderd verliezen alle spijkers hun magnetisme en valt de keten uit elkaar. De spijkers waren slechts **tijdelijk magnetisch**.

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

Magnetisch veld

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.



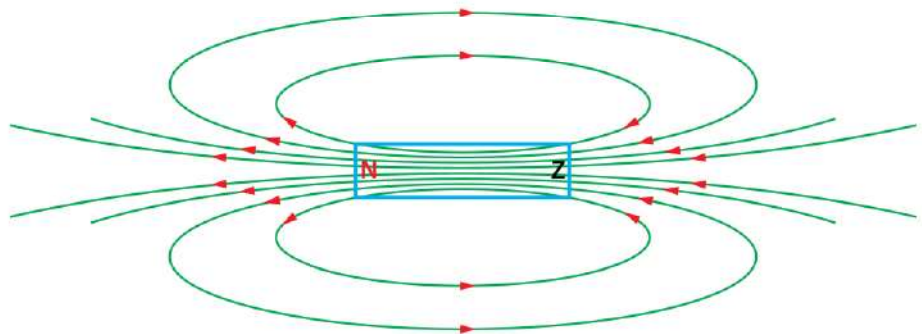
Figuur 28 Kompasnaaldjes geven de magnetische veldlijnen aan.

Magnetische veldlijnen

Een magnetisch veld oefent een kracht uit op een magneet dat zich in dit veld bevindt. Door deze kracht gaat de magneet draaien en komt het in een bepaalde richting te staan. Om te bepalen welke richting dit is brengen we een kleine **proefmagneet**, in het B-veld. De proefmagneet gaat zich oriënteren (richten) en op iedere plaats is de richting van de proefmagneet gelijk aan de richting van het magnetisch veld. 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 onder deze plaat een permanente staafmagneet te houden. Vanwege magnetische inductie worden de ijzerkorrels proefmagneetjes die zich in het B-veld 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.

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. Zie figuur 29.



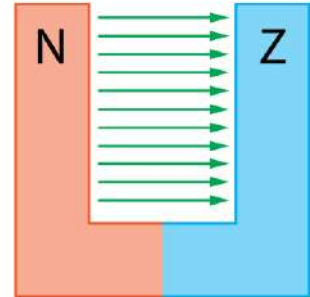
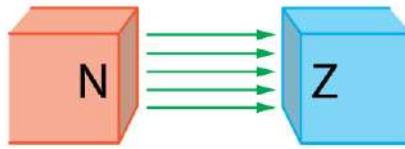
Figuur 29
Magnetische veldlijnen
bij een staafmagneet.

Magnetische velden hebben de volgende eigenschappen:

- 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.
- Door iedere punt van de ruimte gaat één magnetische veldlijn.
- Magnetische veldlijnen zijn gesloten krommen.
- Buiten de magneet lopen de veldlijnen van een noordpool naar een zuidpool.
- Binnenin de magneet lopen de veldlijnen van de zuidpool naar de noordpool.
- Veldlijnen komen niet altijd loodrecht uit een magneet.
- Veldlijnen snijden elkaar niet.
- De sterkte van het B-veld geef je aan door de veldlijnen dicht bij elkaar te tekenen.

Homogeen magnetisch veld

Een homogeen magnetisch veld ontstaat als je twee magneten dicht bij elkaar brengt. Zie figuur 30 links. Een andere mogelijkheid is een magneet in de vorm van een hoefijzer. Zie figuur 30 rechts.



Figuur 30 Homogeen B-veld.

Een homogeen B-veld heeft de volgende eigenschappen:

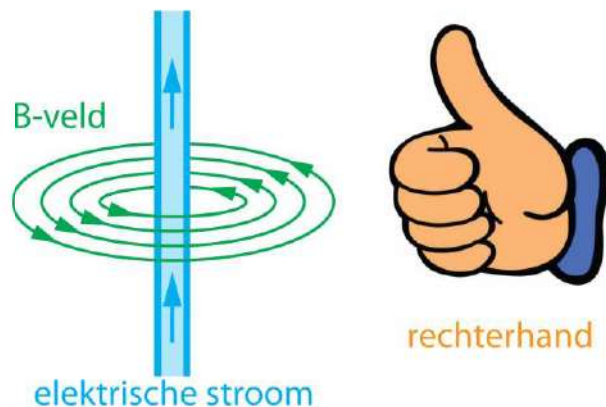
- 1 de veldlijnen zijn recht
- 2 de veldlijnen zijn evenwijdig aan elkaar
- 3 de dichtheid van de veldlijnen is overal gelijk

12.5 Elektromagnetisme

Het magnetisch veld om een stroomvoerende draad

Tot toe zijn we elektriciteit en magnetisme als losse onderwerpen tegengekomen, maar dat is niet terecht want ze horen onlosmakelijk bij elkaar. Vanaf nu gaan we elektrische en magnetische verschijnselen met elkaar verbinden en vandaar het samengestelde woord **elektromagnetisme**. Het begint allemaal met de ontdekking in 1820 van Hans Christian Oersted (1777–1851). Hij stuurde elektrische stroom door een draad en zag dat een kompasnaald hierdoor van richting verandert. Hieruit volgt dat elektrische stroom een magnetisch veld veroorzaakt.

In figuur 31 zie je een draad waar elektrische stroom doorheen gaat. De stroom veroorzaakt een magnetisch veld. De veldlijnen van dit B-veld zijn cirkelvormig om de stroomdraad. De richting waarin het B-veld om de draad krult vind je met de rechterhandregel voor een **stroomvoerende draad**.



Figuur 31 Rechterhandregel voor stroomdraad.

Rechterhandregel voor een stroomvoerende draad

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

Elektronen bewegen tegengesteld aan de richting van de elektrische stroom.

In figuur 31 zie je dat we te maken hebben met drie richtingen. De stroom gaat van onder naar boven en de B-veldlijnen cirkelen in het vlak loodrecht op de draad. Als de draad loodrecht op het papier staat is het lastig om aan te geven of de elektrische stroom van je af gaat of naar je toe komt. Vandaar de volgende afspraak.

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

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 32 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 overlappen de B-velden en het resulterende B-veld is dan de **vectorsom** van beide velden.

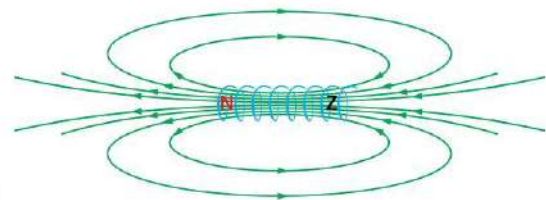
Als twee magnetische velden $\vec{B}_1$ en $\vec{B}_2$ aanwezig zijn is het resulterende B-veld de vectorsom van beide velden.

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

Het magnetisch veld van een stroomspoel

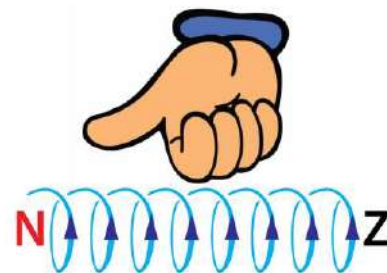
Een stroomspoel maak je door stroomdraad te wikkelen. Als er stroom loopt ontstaat om ieder stukje stroomdraad een cirkelvormig B-veld. Deze B-velden overlappen en het resulterende B-veld is te zien in figuur 33.

Binnen in de spoel is het B-veld homogeen. De veldlijnen verlaten de spoel bij de noordpool en komen terug in de spoel bij de zuidpool. Buiten de spoel gaan de B-veld-lijnen van noord naar zuid, binnen in de spoel van zuid naar noord.



Figuur 33 B-veldlijnen bij een spoel.

Om te bepalen in welke richting de stroom door een spoel gaat moet je een andere rechterhandregel gebruiken, namelijk de **rechterhandregel voor een spoel**. Zie figuur 34 waarin de pijlen de richting van de stroom aangeven en je duim naar de noordpool wijst.



Figuur 34 Rechterhandregel voor een spoel.

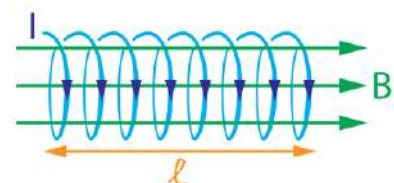
Rechterhandregel voor een stroomspoel

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

Elektromagneet

De magnetische veldlijnen in en om een stroomspoel lijken precies 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.

De grootte van de magnetische veldsterkte binnen in een lege spoel kun je met onderstaande formule uitrekenen. In figuur 35 zie je een spoel met lengte ℓ en $N = 8$ wikkelingen.



Figuur 35 Homogeen B-veld in een spoel.

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

- B is de magnetische inductie (veldsterkte) 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 je de spoel vult met een bepaalde stof wordt de magnetische inductie groter. Voor een spoel in lucht is de versterking klein en is de formule een goede benadering, maar als je bijvoorbeeld een metalen staaf (een kern) in de spoel brengt ontstaat een **versterking van het B-veld met factor μ** .

Als kern wordt vaak weekijzer gebruikt omdat deze stof heel snel magnetisch kan worden gemaakt en het zijn magnetisme ook snel kan verliezen. Dit 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 36 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 37 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.

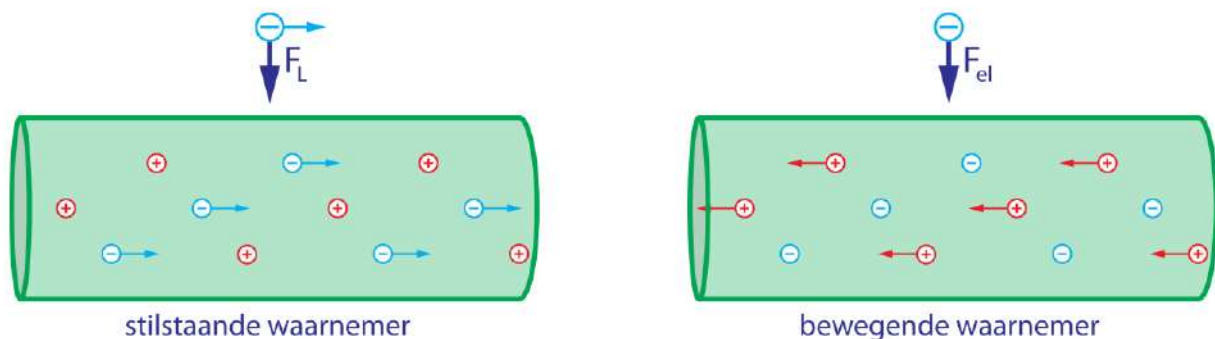


Figuur 38 Relais.

12.6 Lorentzkracht

In de vorige paragraaf heb je gezien dat een magneetveld wordt opgewekt door bewegende lading. Elektriciteit en magnetisme horen dus bij elkaar en behalve een elektrische kracht verwachten we dat er ook een magnetische kracht bestaat. Dat is ook zo en die kracht heet de lorentzkracht F_L , genoemd naar **Hendrik Antoon Lorentz** (1853–1928). Om een lorentzkracht te laten ontstaan moet een elektrisch geladen deeltje bewegen door een magneetveld en moet de richting van deze beweging niet evenwijdig zijn aan de magnetische veldlijnen.

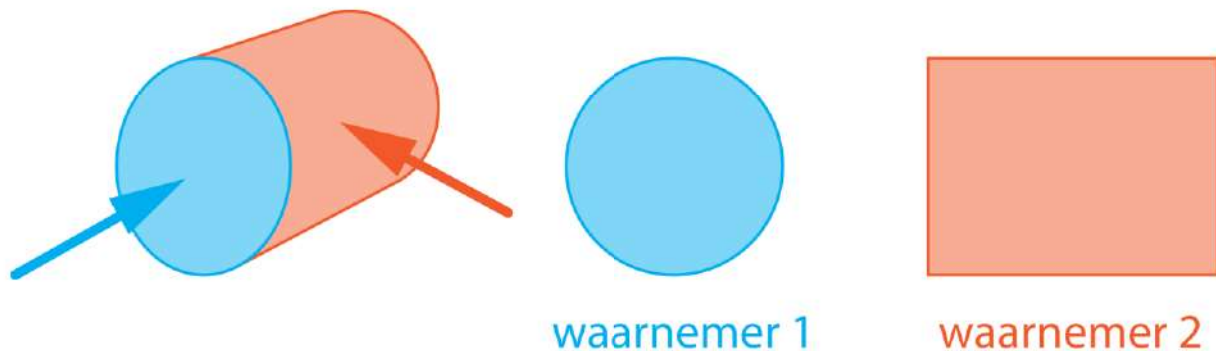
Het vreemde van de lorentzkracht is dat het alleen werkt op **bewegende lading**. Staat de elektrische lading stil, dan is er geen lorentzkracht. Maar in het hoofdstuk bewegen heb je geleerd dat stilstaan en bewegen **relatief** is. Een waarnemer die stilstaat ten opzichte van het magneetveld ziet een bewegend deeltje, maar een waarnemer die meebeweegt met het deeltje ziet een stilstaand deeltje. Dat zou betekenen dat voor de ene waarnemer op het geladen deeltje wel een lorentzkracht werkt en voor de andere waarnemer niet. En dat is niet te begrijpen, want beide waarnemers kijken naar dezelfde gebeurtenis. Beide waarnemers zien dat er een kracht op het geladen deeltje werkt. Maar over de oorzaak van deze kracht zijn ze het niet eens. De waarnemer die het deeltje ziet bewegen in een magneetveld zegt dat er een lorentzkracht werkt, veroorzaakt door een B-veld. De waarnemer voor wie het deeltje stilstaat zegt dat er een elektrische kracht werkt veroorzaakt door een E-veld. Laten we proberen om hier iets meer van te begrijpen. Zie figuur 39.



Figuur 39 Uitwisselbaarheid van elektrische en magnetische krachten.

In figuur 39 zie je links de situatie zoals gezien door een waarnemer die stilstaat ten opzichte van een stroomvoerende draad. Deze waarnemer ziet een negatief geladen deeltje dat boven de draad naar rechts beweegt. Om het eenvoudig te houden is de snelheid van de naar rechts bewegende elektronen even groot als de snelheid van het deeltje. Omdat er een B-veld om de draad cirkelt ziet hij dat het deeltje naar de draad wordt getrokken door de lorentzkracht. Later ga je leren dat de lorentzkracht inderdaad deze richting heeft. Rechts zie je de situatie volgens een waarnemer die meebeweegt met het deeltje. Voor hem staan de elektronen stil en beweegt de draad, samen met de positief geladen atoomkernen, naar links. Uit Einsteins relativiteitstheorie volgt dat voor deze waarnemer de draad in de lengterichting korter is en dat een meter draad meer positieve dan negatieve lading heeft. Hij ziet dus een elektrisch geladen draad en de positief geladen draad oefent een elektrische kracht uit op het negatief geladen deeltje.

Hieraan zie je dat wat voor de ene waarnemer een B-veld is, voor een andere waarnemer een E-veld kan zijn en omgekeerd. Het E-veld en het B-veld zijn hetzelfde natuurkundige verschijnsel. Er bestaat alleen een **elektromagnetisch veld** waarin het E-veld en het B-veld met elkaar zijn verenigd. In figuur 40 zie je links een verschijnsel (cilinder) zoals werkelijk bestaat. Waarnemer 1 bekijkt het van de voorkant en ziet een cirkel. Waarnemer 2 bekijkt het vanaf de zijkant en ziet een rechthoek.



Figuur 40 Een cilinder wordt oor verschillende waarnemers anders waargenomen. Dit geldt ook voor het E-veld en het B-veld. Beide velden zijn één natuurkundig verschijnsel.

De grootte van de lorentzkracht op een stroomvoerende draad

Op een stroomvoerende draad die zich in een magneetveld bevindt, waarbij de richting van de draad niet evenwijdig is aan de B-veldlijnen, wordt een lorentzkracht uitgeoefend. Op ieder bewegend elektron werkt een lorentzkracht en al deze krachten bij elkaar opgeteld geeft de lorentzkracht op de draad. Volgens afspraak is de richting van de stroomsterkte gelijk aan de richting waarin positieve lading beweegt. De stroomrichting is dus tegengesteld aan de richting waarin de elektronen bewegen. Als de stroomdraad en het B-veld loodrecht op elkaar staan (hoek van 90°) 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 dat 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 $F_L = B \cdot I \cdot \ell \cdot \sin \alpha$ waarbij α de hoek is tussen B en I .

De grootte van de lorentzkracht op een geladen deeltje

Zoals je hebt gezien kunnen geladen deeltjes, zoals elektronen en protonen, worden versneld en daarna vrij door de ruimte bewegen. Komen ze in een B-veld met een bewegingsrichting niet evenwijdig aan dit veld, dan wordt op de deeltjes een lorentzkracht uitgeoefend. Voor geladen deeltjes die loodrecht (hoek van 90°) op het B-veld bewegen geldt voor de grootte van de lorentzkracht:

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

- 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 bewegende deeltjes en het B-veld niet 90° maar hoek α , dan moet je de factor $\sin \alpha$ toevoegen en geldt $F_L = B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha$ waarbij α de hoek is tussen B en v .

VOORBEELD Ca^{2+} ionen versnellen

Een deeltjesversneller produceert Ca^{2+} 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 de lorentzkracht.

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

De richting van de lorentzkracht

Nu we de **grootte** van de lorentzkracht kunnen uitrekenen moeten we ook vaststellen wat de **richting** van de lorentzkracht is. Hiervoor krijg je opnieuw een handregel, maar dit keer moet je je **linkerhand** gebruiken. Zie figuur 41 links.

Linkerhandregel voor de richting van de lorentzkracht

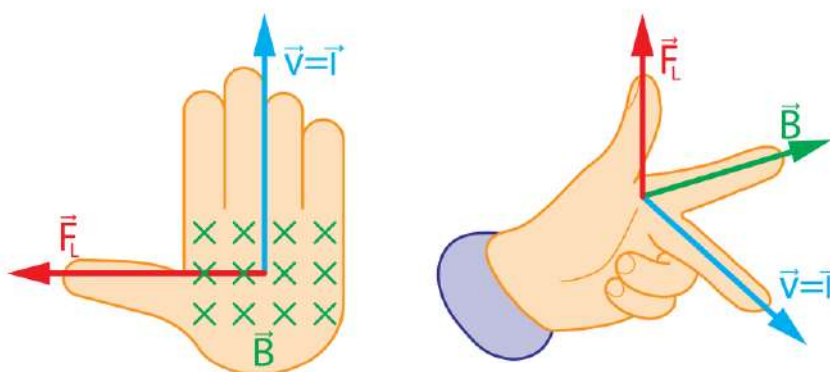
- Vang de B-veldlijnen op in de palm van je linkerhand.
- Richt je vingers in de bewegingsrichting van positief geladen deeltjes.*
- Je duim wijst in de richting van de lorentzkracht F_L .
- * Bij negatief geladen deeltjes moeten je vingers de andere kant op wijzen.

Behalve deze regel kun je met je **linkerhand** ook de FBI-regel gebruiken. Zie figuur 41 rechts. Dit gaat als volgt.

FBI-regel voor de richting van de lorentzkracht

- Houd je linkerhand in de vorm van een pistool.
- Richt je wijsvinger in de richting van het B-veld.
- Richt je middelvinger in de bewegingsrichting van positief geladen deeltjes.*
- Je duim wijst in de richting van de lorentzkracht F_L .
- * Bij negatief geladen deeltjes moet je middelvinger de andere kant op wijzen.

Figuur 41 Linkerhandregel voor de richting van de lorentzkracht. Rechts de FBI regel.

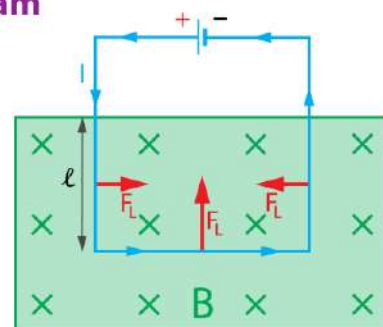


In figuur 41 zie je dat de lorentzkracht altijd loodrecht staat op het B-veld en loodrecht op de bewegingsrichting. Dit betekent dat een lorentzkracht nooit de versnelling van een deeltje veroorzaakt. Het enige wat een lorentzkracht kan doen is de richting van de snelheid veranderen.

F_L staat loodrecht op B en loodrecht op v en kan alleen de bewegingsrichting van een geladen deeltje veranderen.

Lorentzkrachten op een stroomvoerende draadraam

We gaan de linkerhandregel toepassen op stroomdraad dat 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 42. Op drie stukken stroomdraad werkt een lorentzkracht. Met de linkerhandregel vind je de richtingen van de lorentzkrachten, zoals aangegeven in figuur 42.



Figuur 42 Draadraam in een B-veld.

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, waardoor het draadraam naar boven gaat bewegen. Je ziet dat je met elektrische stroom in een magneetveld iets in beweging kan brengen, zoals gebeurt in een **elektromotor**.

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 42.

Bereken F_L op een verticaal draadstuk.

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

Leg uit of het draadraam horizontaal gaat bewegen.

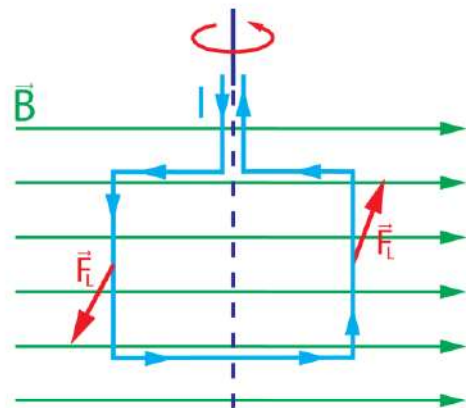
- F_L op de verticale draadstukken zijn tegengesteld gericht
- $\Sigma F_{hor} = 0 \rightarrow$ geen versnelling in horizontale richting

Bereken F_L op het horizontale draadstuk.

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

Lorentzkrachten in een elektromotor

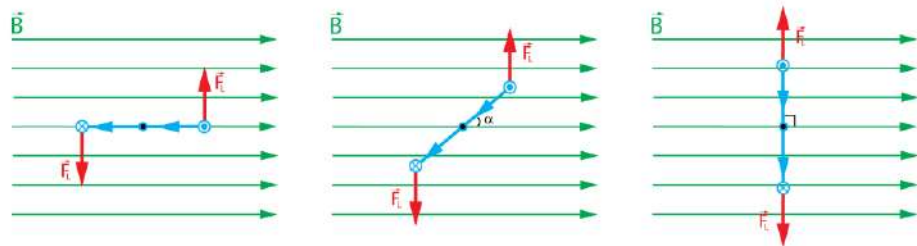
Om de lorentzkrachten in een elektromotor te onderzoeken bekijken we een rechthoekig draadraam in een homogeen magnetisch veld. Zie figuur 43. Het draadraam heeft maar één winding en kan draaien om een verticale centrale as. De horizontale draadstukken zijn evenwijdig aan het B -veld, waardoor de lorentzkrachten op deze stukken nul is. 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. Deze twee lorentzkrachten zorgen ervoor dat het draadraam gaat draaien.



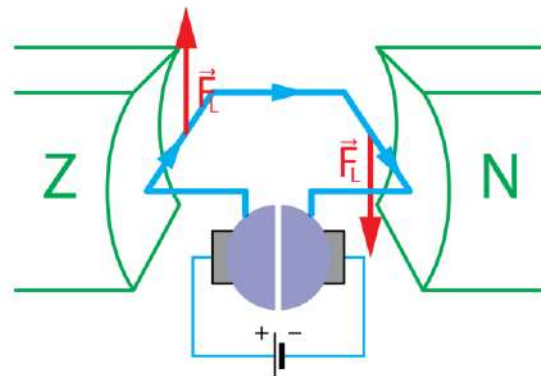
Figuur 43 Roterend draadraam.

In figuur 44 zie je het bovenaanzicht bij drie verschillende standen van het draadraam. Links is de situatie van figuur 43. 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 44
Bovenaanzicht van
roterend draadraam.



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 de stroomrichting omgekeerd. Hierdoor klappen de lorentzkrachten om en wijzen ze naar binnen. Het draadraam schiet een stukje door en draait verder vanwege de omgeklapte lorentzkrachten. Na iedere halve ronde keert de stroomrichting, en daarmee de lorentzkrachten om, zodat de elektromotor blijft draaien.

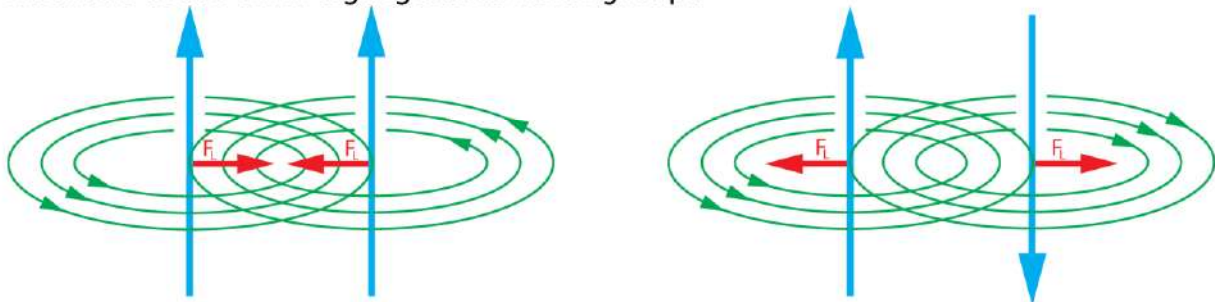


Figuur 45 Elektromotor op gelijkstroom.

In een elektromotor moet de stroomrichting iedere halve ronde omkeren. Bij een elektromotor op gelijkstroom, zoals in figuur 45, is een speciale constructie nodig om dit voor elkaar te krijgen. In figuur 45 zie je twee **sleecontacten** (grijs) die verbonden zijn met de + en de – pool van een spanningsbron. Sleepcontacten zijn vaak gemaakt van koolstof en worden **koolborstels** genoemd. De **commutator** bestaat uit twee halve schijven met een isolerende tussenlaag (paars). Dit zorgt ervoor dat de stroomrichting op de juiste momenten omkeert. Er zijn ook elektromotoren die op **wisselspanning** werken. In dat geval keren de + en – pool van de spanningsbron voortdurend om. Zo heeft de spanning uit het lichtnet een frequentie van 50 Hz, waardoor de polen honderd keer per seconde omkeren. Een elektromotor die op wisselspanning werkt heeft geen speciale constructie nodig om de stroomrichting te laten omkeren en zit daarom eenvoudiger in elkaar.

Evenwijdige stroomvoerende draden

Twee evenwijdige stroomvoerende draden oefenen lorentzkrachten op elkaar uit. Om iedere stroomvoerende draad 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. 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 46 ontstaat er een aantrekkende kracht tussen de draden als de stroom in dezelfde richting loopt en een afstotende kracht als de stroom in tegengestelde richting loopt.



Figuur 46 Twee evenwijdige stroomvoerende draden oefenen lorentzkrachten op elkaar uit.

Geladen deeltje in een magnetisch veld

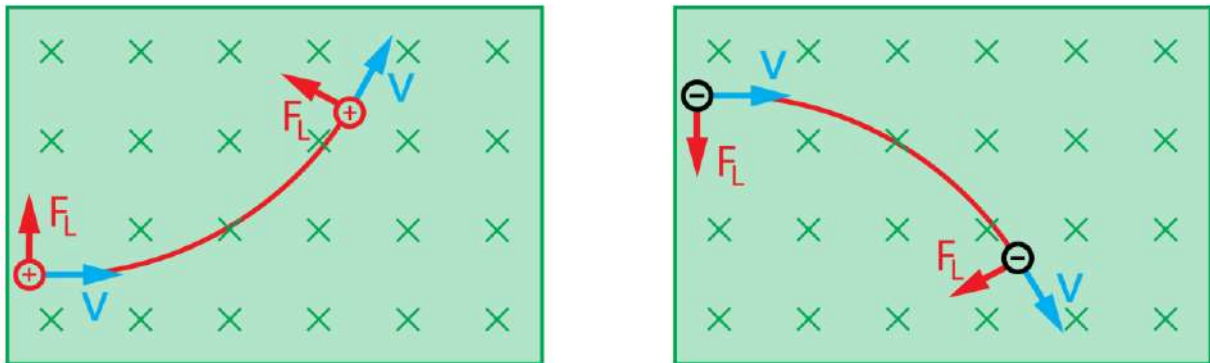
Op een geladen deeltje dat in een magneetveld beweegt in een richting die niet evenwijdig is aan het B-veld wordt een lorentzkracht uitgeoefend. De lorentzkracht staat loodrecht op het B-veld en loodrecht op de bewegingsrichting. Omdat de kracht loodrecht op de bewegingsrichting staat verandert de **grootte** van de snelheid niet maar de **richting** wel. Het geladen deeltje gaat een **eenparige cirkelbeweging** uitvoeren, waarbij de lorentzkracht gelijk is aan de middelpuntzoekende kracht.

$$F_L = F_{mpz} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

- 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)

In figuur 47 zie je links een positief geladen deeltje in een magneetveld dat het papier ingaat en rechts een negatief geladen deeltje. Met de linkerhandregel kun je de richting van de lorentzkracht (= middelpuntzoekende kracht) bepalen. Bij een negatief deeltje moet je de bewegingsrichting omkeren. Het negatieve deeltje in figuur 47 rechts behandel je dus als een positief deeltje dat de andere kant uit beweegt.

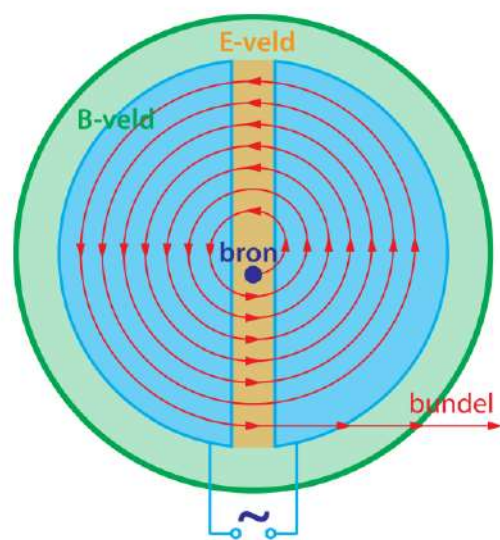


Figuur 47 Een geladen deeltje beweegt in een magnetisch veld met een bewegingsrichting loodrecht op de B-veldlijnen. Het deeltje krijgt een eenparige cirkelbeweging.

Cyclotron

Met een magnetisch veld kun je geladen deeltjes een cirkelbaan geven. Dit gebeurt bij het onderzoek naar elementaire deeltjes, waarbij de deeltjes veel energie moeten krijgen en ze daarvoor in een elektrisch veld moeten worden versneld. Dit kan met een lineaire deeltjesversneller maar het nadeel hiervan is dat je een hele lange versneller moet maken als je vaak moet versnellen. In 1930 ontwikkelt Ernest Lauwrens (1901–1958) een cyclotron waarin een elektrische veld wordt gebruikt om deeltjes te versnellen en een magnetisch veld om ze een cirkelbaan te geven. In figuur 48 zie je hoe een cyclotron werkt.

Twee D-vormige holle trommels (blauw) zijn aangesloten op een wisselspanningsbron, zodat tussen de trommels een wisselend E-veld ontstaat (oranje). In het midden zit een bron waaruit geladen deeltjes vrijkomen. Het geheel bevindt zich in een magneetveld (groen). Binnen in een trommel is er geen E-veld en doorlopen de deeltjes een cirkelbaan met constante snelheid. Tussen de trommels is een E-veld dat de deeltjes versnelt en een B-veld dat de deeltjes afbuigt. Omdat de deeltjes een steeds grotere snelheid krijgen wordt de straal van de cirkelbaan steeds groter. Met de linkerhandregel kun je vaststellen dat als de deeltjes in figuur 48 een positieve lading hebben het B-veld in het papier gaat, wat je aangeeft met kruisjes.



Figuur 48 Een cyclotron.

In een trommel doorloopt het deeltje een halve cirkel. Om de omlooptijd van een hele cirkel uit te rekenen stel je de lorentzkracht gelijk aan de middelpuntzoekende kracht. De cirkelbaan heeft lengte $2\pi \cdot r$ en voor de snelheid geldt $v = 2\pi \cdot r / T$, waarin T de omlooptijd is. Combineer je dit met $B \cdot q \cdot v = m \cdot v^2 / r$ dan vindt je $T = 2\pi \cdot m / (B \cdot q)$.

- $B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow v = \frac{B \cdot q \cdot r}{m}$
- $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \rightarrow \frac{2\pi \cdot r}{T} = \frac{B \cdot q \cdot r}{m} \rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$

Aan de berekening zie je dat de toename van de snelheid precies wordt gecompenseerd door het langer worden van de cirkelbaan. De tijd van één omloop verandert daardoor niet en de frequentie van de wisselspanning hoeft daarom niet te worden aangepast.

VOORBEELD cyclotron

In de cyclotron bewegen protonen in een homogeen magnetisch veld, waarbij de richting van snelheid loodrecht staat op de richting van het magneetveld. De eerste cyclotron komt uit 1931 en had een diameter van 11 cm. Hiermee werden protonen versneld tot 80 keV elektrische energie.

Bereken de snelheid van de protonen.

- $80 \text{ keV} = 80 \cdot 10^3 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} = 1,28174 \cdot 10^{-14} \text{ J}$
- $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow 1,28174 \cdot 10^{-14} = \frac{1}{2} \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \cdot v^2$
- $v = 3,91487 \cdot 10^6 = 3,9 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

Bereken de sterkte van het B-veld.

- $m = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \mid v = 3,91487 \cdot 10^6 \text{ m/s} \mid q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \mid r = 0,055 \text{ m}$
- $B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow B = \frac{m \cdot v}{q \cdot r}$
- $B = \frac{1,67262 \cdot 10^{-27} \cdot 3,91487 \cdot 10^6}{1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 0,055} = 0,74309 = 0,74 \text{ T}$

Large Hadron Collider

In het onderzoekscentrum CERN bij Geneve worden elementaire deeltjes bestudeerd. Hierbij worden protonen met heel veel energie op elkaar geschoten, waarbij ze uiteenspatten en er allerlei elementaire deeltjes tevoorschijn komen. Net als in een cyclotron worden de deeltjes versneld door een E-veld en afgebogen door een B-veld.

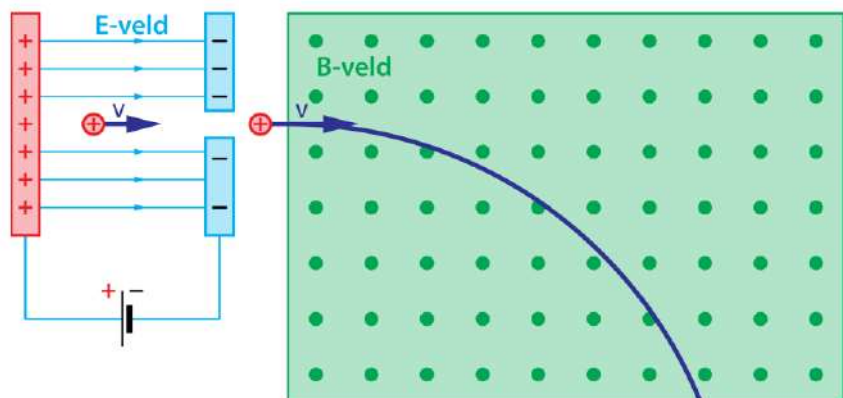
Figuur 49 Large Hadron Collider (LHC) in CERN bij Geneve.



De Large Hadron Collider (LHC) is de grootste versneller ter wereld met een omtrek van 27 kilometer en een magnetische veldsterkte van 8,3 T. Protonen worden versneld tot een energie van 7,0 TeV ($7,0 \cdot 10^{12}$ eV), waarbij ze een snelheid krijgen van 99,9999991 % van de lichtsnelheid. Omdat deze snelheid zo groot is mag je voor de kinetische energie niet de formule $E_k = \frac{1}{2}m \cdot v^2$ gebruiken met de rustmassa $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg voor protonen. Bij deze snelheid moet je de speciale relativiteitstheorie gebruiken en daaruit volgt dat de massa afhankelijk is van de snelheid. Normaal merk je dit niet, want bij 25% van de lichtsnelheid is de massa nog maar 3% toegenomen. Maar in de LHC wordt de massa van het proton 7460 keer zo groot als de rustmassa. Hoe je dit moet uitrekenen leer je in het hoofdstuk relativiteit.

Massaspectrometer

Door gebruik te maken van de afbuiging van een geladen deeltje in een magneetveld kun je de massa van een deeltje bepalen. Dit gebeurt in een **massaspectrometer**. Een deeltje waarvan je de lading weet wordt eerst versneld in een E-veld. Daarna komt het in een B-veld en gaat het een cirkelbaan doorlopen. Uit de straal van deze cirkelbaan volgt de verhouding tussen de lading en de massa van het deeltje en omdat je de lading weet kun je de massa berekenen. Zie figuur 50.



Figuur 50
Massaspectrometer.

Voor de verhouding tussen de lading q en de massa m van het deeltje geldt:

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

Hierin is U de spanning waarmee de deeltjes worden versneld, B de sterkte van het magneetveld en r de straal van de cirkelbaan.

BEWIJS

- $F_L = F_{mpz} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \rightarrow \frac{q^2}{m^2} = \frac{v^2}{B^2 \cdot r^2}$
- $q \cdot U = \frac{1}{2}m \cdot v^2 \rightarrow v^2 = 2U \cdot \frac{q}{m}$
- $\frac{q^2}{m^2} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2} \cdot \frac{q}{m} \rightarrow \frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2}$

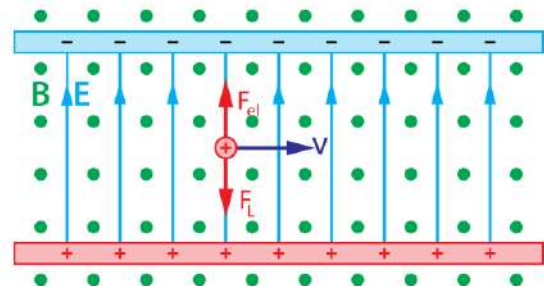
E-veld en B-veld aanwezig

Zoals je eerder hebt gezien zijn elektrische en magnetische velden aan elkaar verwant. Om een elektrisch geladen deeltje zit een E-veld en als deze lading beweegt ontstaat er een B-veld. Het komt vaak voor dat er zowel een E-veld als een B-veld zijn en daar gaan we nu naar kijken.

Voor de kracht veroorzaakt door een E-veld geldt $F_{el} = q \cdot E$, waarbij F_{el} en E dezelfde richting hebben. Voor de kracht veroorzaakt door een B-veld geldt $F_L = B \cdot q \cdot v$, waarbij F_L loodrecht staat op B en loodrecht staat op v volgens de linkerhandregel. Als beide velden aanwezig zijn is de resulterende kracht de vectorsom van deze krachten $\Sigma \vec{F} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L$.

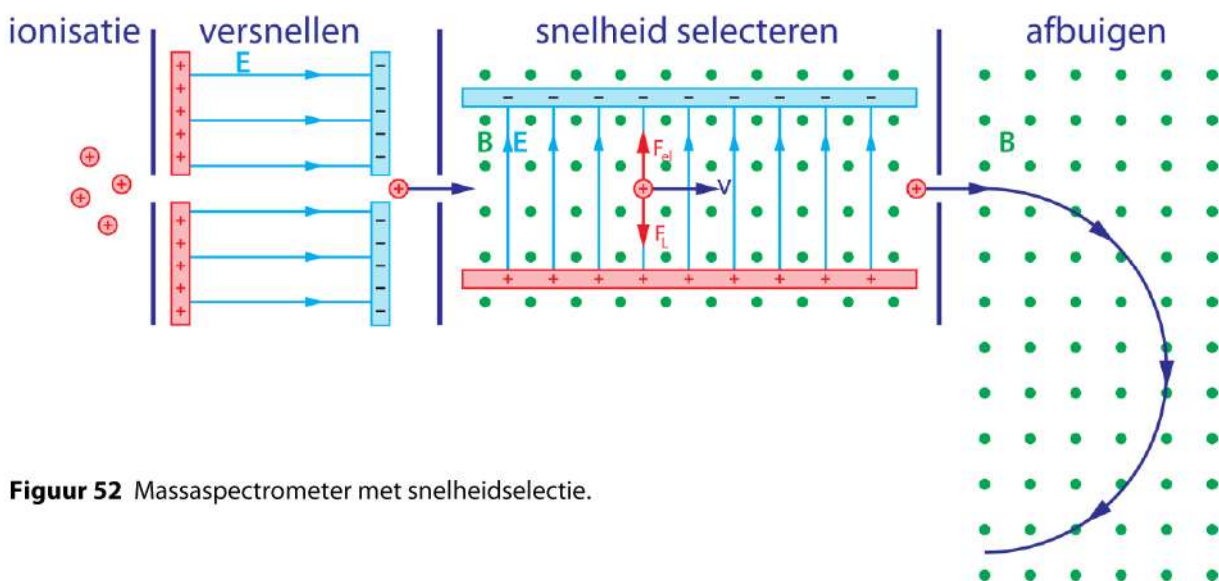
Afhankelijk van de grootten en de richtingen van de E- en B-velden zijn er allerlei situaties mogelijk met vaak ingewikkelde bewegingen als gevolg. Daar gaan we het verder niet over hebben. Het wordt een stuk eenvoudiger als de resulterende kracht nul is, want dan beweegt het deeltje met een constante snelheid in een rechte lijn.

In figuur 51 zie je een positief geladen deeltje dat beweegt in een ruimte waarin zowel een E-veld als een B-veld aanwezig is. De E-veldlijnen (blauw) gaan van beneden naar boven en de B-veldlijnen (groen) komen uit het papier. In deze situatie wijst F_{el} omhoog en F_L omlaag. Bij een bepaalde snelheid geldt $F_{el} = F_L$ zodat het deeltje geen verticale versnelling krijgt. In dat geval geldt $q \cdot E = B \cdot q \cdot v$ waaruit volgt $v = E / B$.



Figuur 51 Aanwezigheid van E-veld en B-veld.

Als een E-veld en een B-veld aanwezig zijn, zoals in figuur 51, is er een unieke snelheid waarbij het deeltje met een constante snelheid in een rechte lijn beweegt. Hiervan kun je gebruik maken als je uit een verzameling deeltjes de deeltjes wil selecteren die dezelfde snelheid hebben. Dit kun je toepassen in een **massaspectrometer**. Zie figuur 52.



Figuur 52 Massaspectrometer met snelheidselectie.

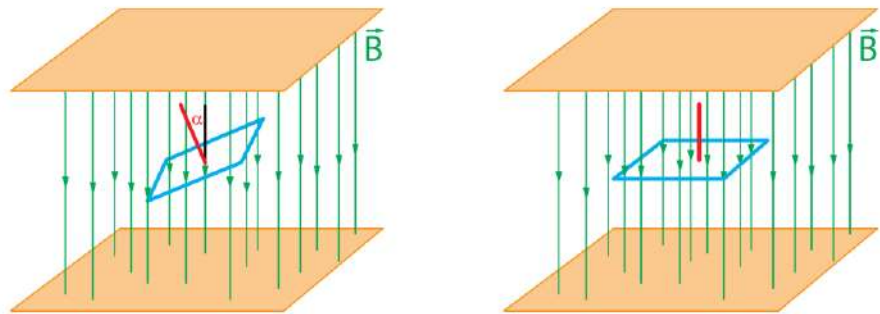
Er zijn vier stappen. In de eerste stap wordt het deeltje geïoniseerd, waarbij het een positieve lading krijgt. Daarna wordt het deeltje in een E-veld versneld. Omdat niet alle deeltjes dezelfde massa hebben krijgen ze ook niet allemaal dezelfde snelheid. Daarom gaan ze eerst door een ruimte waarin zowel een E-veld als een B-veld aanwezig is. Alleen deeltjes waarvan de snelheid gelijk is aan $v = E / B$ komen in het gebied met een B-veld, waar ze een cirkelbaan krijgen met als straal $r = m \cdot v / (B \cdot q)$. Als de sterkte van het B-veld bij het afbuigen gelijk is aan het B-veld bij het snelheid selecteren geldt $m = B^2 \cdot q \cdot r / E$. Door B, r en E te meten kun je de massa van een deeltje met lading q bepalen.

12.7 Inductiespanning

Magnetische flux

Als je een draadraam in een magnetisch veld brengt kun je het zo richten dat er magnetische veldlijnen doorheen gaan. Zie figuur 53. Het aantal veldlijnen door het draadraam is afhankelijk van de hoek tussen het draadraam en het B-veld. Je meet de hoek ten opzichte van de **normaal** die loodrecht op het oppervlak staat. Zie figuur 53, rode lijn. Bij een hoek van nul graden is het aantal veldlijnen door het draadraam maximaal.

Figuur 53 Magnetische flux door een oppervlak A. Rechts gaan de meeste veldlijnen door het oppervlak.



We definiëren nu de **magnetische flux Φ** . Dit is de sterkte van de loodrechte component van het B-veld vermenigvuldigd met de oppervlakte van het draadraam.

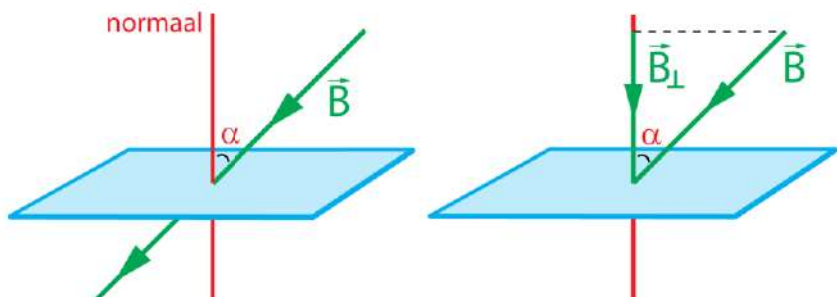
Magnetische flux Φ is de magnetische veldsterkte vermenigvuldigd met de oppervlakte A van een draadraam met als eenheid tesla keer vierkante meter (T m^2) of weber (Wb), waarbij één $\text{T m}^2 = \text{één Wb}$

$$\Phi = B_{\perp} \cdot A$$

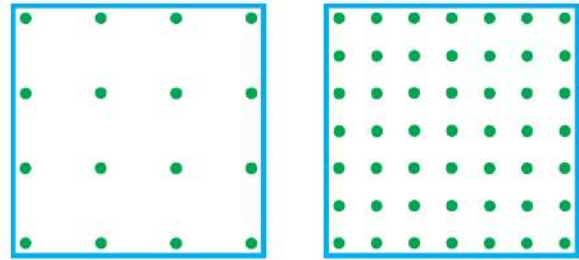
- Φ is de magnetische flux door een draadraam ($\text{T} \cdot \text{m}^2$) of (Wb)
- $B_{\perp}$ is de component van B loodrecht op het draadraam (T)
- A is de omsloten oppervlakte in vierkante meter (m^2)

De loodrechte component $B_{\perp}$ vind je door B te vermenigvuldigen met de cosinus van de hoek tussen B en de **normaal** van het draadraam, $B_{\perp} = B \cdot \cos \alpha$. Zie figuur 54. Als het B-veld loodrecht op het draadraam staat is $\cos \alpha$ gelijk aan 1 en geldt: $B_{\perp} = B$. Als je het draadraam 90° draait gaan er geen veldlijnen door het draadraam en geldt $B_{\perp} = 0$.

Figuur 54 Magnetische flux Φ door een draadraam
 $B_{\perp} = B \cdot \cos \alpha$



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



Figuur 55 Magnetische flux door een draadraam.

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 $\alpha = 0^\circ$.

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

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

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

De inductiewet van Faraday

Michael Faraday (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 N windingen dan gaan de veldlijnen er N keer door het draadraam. 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 ($\text{Wb} = \text{T m}^2$)
- dt is het tijdinterval waarin de fluxverandering plaatsvindt (s)

Het minteken geeft de richting aan van de inductiestroom. In de volgende paragraaf leer je hoe je deze richting kunt bepalen. Bij de berekening van de inductiespanning hoeft je geen rekening te houden met het minteken.

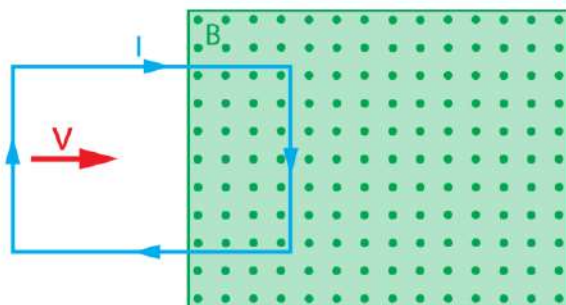
Uit bovenstaande formule kan een nieuwe eenheid voor de magnetische flux worden afgeleid. De eenheid van flux is $\text{T} \cdot \text{m}^2$ wat gelijk is aan de weber (Wb). Aangezien de eenheid van U_{ind} de volt is moeten we concluderen dat de eenheid van magnetische flux gelijk is aan $\text{V} \cdot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

De wet van Faraday legt het verband tussen de snelheid waarmee de flux verandert $d\Phi/dt$ en de geïnduceerde spanning U_{ind} . Zodra een spanning is opgewekt gaat er elektrische stroom lopen. Voor een stroomkring geldt de wet van ohm $U = I \cdot R$ en als je de weerstand weet kun je de inductiestroom I_{ind} uitrekenen. Als het draadraam niet gesloten is, is er geen flux en dus ook geen fluxverandering. Er is dan geen inductiespanning en dus ook geen inductiestroom.

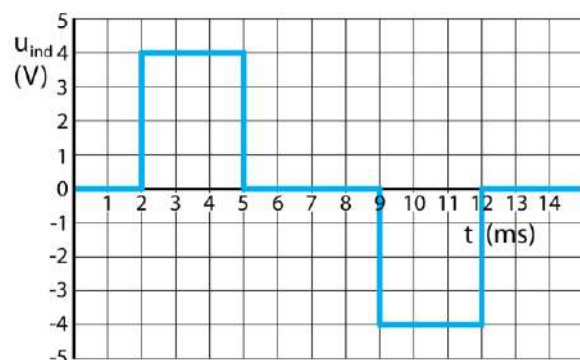
Inductiespanning in een bewegend draadraam

Laten we eens kijken naar een draadraam dat met constante snelheid door een magnetisch veld beweegt. Zie figuur 56. Bij het binnengaan in het veld neemt de magnetische flux toe, waardoor inductiespanning U_{ind} wordt opgewekt en een inductiestroom I_{ind} gaat lopen. Als het draadraam zich helemaal in het veld bevindt verandert de magnetische flux niet zodat er geen U_{ind} opgewekt en ook geen I_{ind} gaat lopen. Als het draadraam het veld verlaat neemt de magnetische inductie af, waardoor het teken van U_{ind} omkeert en ook I_{ind} de andere kant uitloopt. De grootte van U_{ind} wordt bepaald door de snelheid waarmee de flux toeneemt of afneemt.

In figuur 57 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 verlaat de achterkant van het draadraam het B-veld.



Figuur 56 Een draadraam beweegt door een magnetisch veld.



Figuur 57 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 veldlijnen staan loodrecht op het draadraam. Zie figuur 56. De magnetische inductie is 0,50 T.

Bereken hoelang een inductiespanning wordt opgewekt.

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

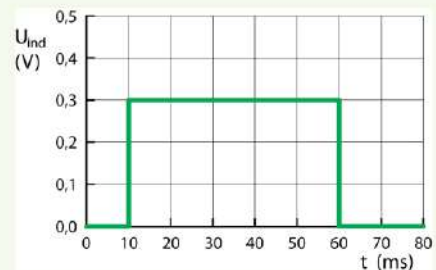
Bereken de grootte van de inductiespanning.

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

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 $60 \text{ ms} \rightarrow U_{\text{ind}} = 0,0 \text{ V}$



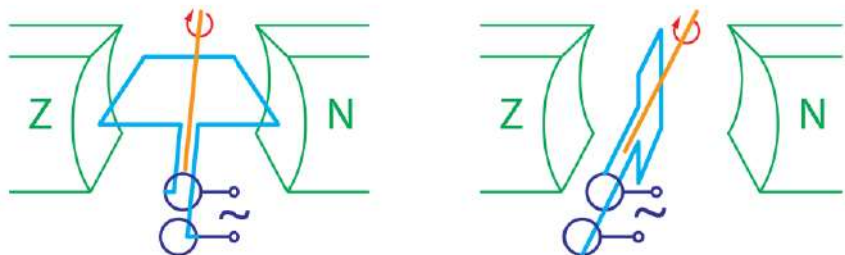
Figuur 58

Generator (dynamo)

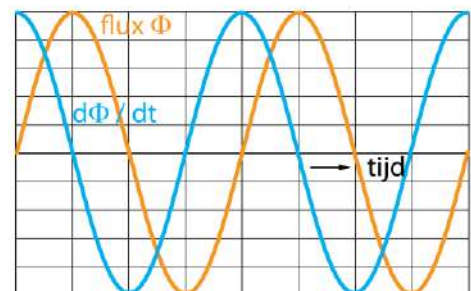
Om elektrische stroom op te wekken moet de flux door een draadraam veranderen waardoor inductiespanning ontstaat en er stroom gaat lopen. In een generator wordt een draadraam rondgedraaid tussen de polen van een magneet. De arbeid die hiervoor nodig is wordt geleverd door spierkracht, een verbrandingsmotor of een stoomturbine.

Een generator is het omgekeerde van een elektromotor. In een elektromotor wordt stroom gebruikt om een lorentzkracht op te wekken waardoor een draadraam gaat draaien. In een generator wordt een draadraam met een externe kracht in beweging gebracht waardoor inductiespanning en elektrische stroom wordt opgewekt.

Figuur 59 Generator (dynamo). Links is de flux nul en rechts is de flux maximaal.



Bij het ronddraaien van het draadraam verandert de flux voortdurend. In de stand van figuur 59 links is de flux nul en is de verandering van de flux maximaal. In de stand van figuur 59 rechts is de flux maximaal en is de verandering van de flux nul. In figuur 60 zie je de flux en de fluxverandering als het draadraam twee omwentelingen maakt.



Figuur 60 Φ en $d\Phi/dt$ in een generator.

12.8 Richting van de inductiestroom

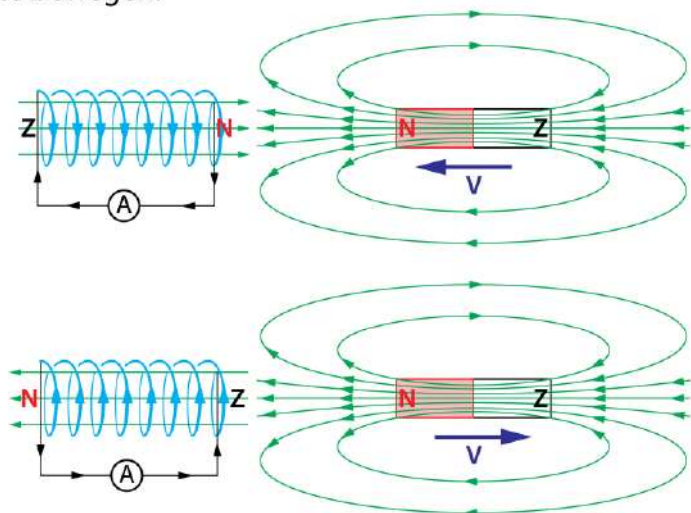
De wet van Lenz

Met de wet van Faraday kun je de inductiespanning uitrekenen als je de snelheid waarmee de flux verandert en het aantal wikkelingen weet. Door de inductiespanning gaat er een inductiestroom lopen. De richting van deze stroom wordt bepaald door hoe deze stroom is veroorzaakt. **Heinrich Friedrich Lenz** (1804 – 1865) heeft hiervoor een regel opgesteld die bekend staat als de **wet van Lenz**.

De inductiestroom werkt de verandering van de flux die de inductiestroom veroorzaakt tegen.

Als voorbeeld nemen we een spoel en een magneet. Zie figuur 61 boven. De noordpool van de magneet is gericht op de spoel. Als de magneet naar de spoel toe beweegt neemt de flux in de spoel toe, waardoor inductiespanning wordt opgewekt. De inductiestroom in de spoel veroorzaakt een magnetisch veld en de wet van Lenz zegt 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 tegenwerkt. Het kost arbeid om de magneet naar de spoel toe te bewegen.

Dezelfde redenering geldt als de magneet van spoel weggaat. Zie figuur 61 onder. Als de magneet van de spoel vandaan beweegt neemt de flux in de spoel af, waardoor er inductiespanning wordt opgewekt. De wet van Lenz zegt 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 tegenwerkt. Het kost arbeid om de magneet van de spoel vandaan te bewegen.



Figuur 61 Het opge-wekte B-veld in de spoel zorgt voor een kracht die de fluxverandering tegenwerkt. Hierdoor kost het veranderen van de flux arbeid.

Tegenflux en Meeflux

Bij een naderende magneet wordt in de spoel **tegenflux** opgewekt. Bij een zich verwijderende magneet wordt 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

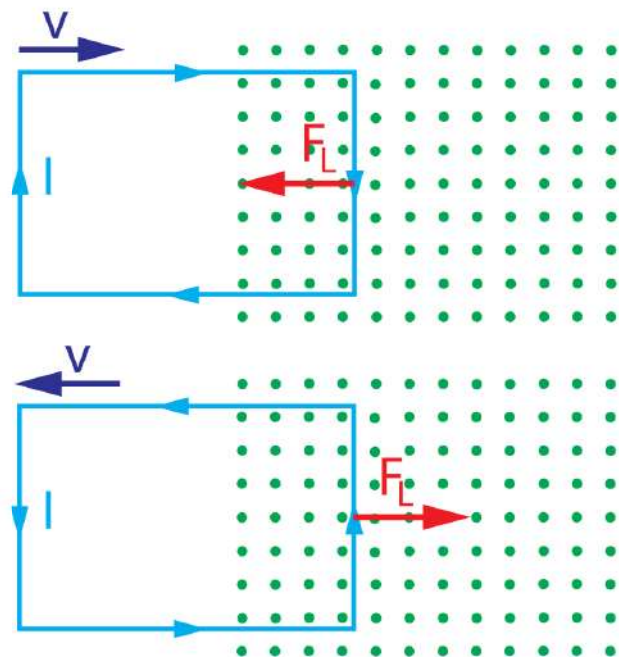
In figuur 62 boven wordt een draadraam in een B-veld gebracht. Vanwege de fluxverandering ontstaat een inductiespanning en een inductiestroom, waardoor een lorentzkracht ontstaat. De richting van de lorentzkracht is tegengesteld aan de richting van de snelheid. De inductiestroom door het draadraam wekt een B-veld op en de richting van dit opgewekte B-veld is tegengesteld is aan het externe B-veld. Er ontstaat **tegenflux**.

In figuur 62 onder gebeurt het omgekeerde. Een draadraad wordt uit een B-veld getrokken. Ook nu is de richting van de lorentzkracht tegengesteld aan de richting van de snelheid. De inductiestroom door het draadraam wekt een B-veld op maar in dit geval heeft het opgewekte B-veld dezelfde richting als het externe B-veld. Er ontstaat **meeflux**.

Figuur 62

Boven: de flux door het draadraam neemt toe. De lorentzkracht werkt de verandering tegen. Het opgewekte B-veld verzwakt het externe B-veld (tegenflux).

Onder: de flux door het draadraam neemt af. De lorentzkracht werkt de verandering tegen. Het opgewekte B-veld versterkt het externe B-veld (tegenflux).

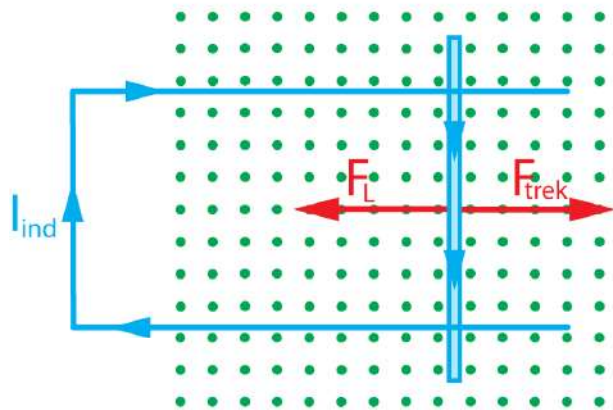


Wet van Lenz en de arbeid van de lorentzkracht

Als een draadraam in een magnetisch veld wordt gebracht neemt de flux toe en de fluxverandering veroorzaakt inductiespanning en inductiestroom. Het deel van het draadraam met lengte l dat zich in het B-veld bevindt en loodrecht op het B-veld staat ondervindt een lorentzkracht: $F_L = B \cdot I \cdot l$. De wet van Lenz geeft aan dat de richting van de lorentzkracht op het draadraam altijd tegengesteld is aan de bewegingsrichting van het draadraam. De opgewekte lorentzkracht werkt dus altijd de fluxverandering tegen.

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

In figuur 63 zie je een draadraam waarvan de voorste staaf kan bewegen. Het draadraam bevindt zich in een magnetisch veld dat naar je toe komt. Aan de beweegbare staaf trek je met kracht F , zodat de flux door het draadraam toeneemt. Er gaat een inductiestroom I_{ind} lopen waardoor 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 63 De flux door het draadraam neemt toe en de inductiestroom veroorzaakt een lorentzkracht die de trekkracht tegenwerkt.

Wet van Lenz en behoud van energie

Bij het draadraam van figuur 63 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 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 omgezet in elektrische energie.**

BEWIJS

- $P = F_{\text{trek}} \cdot v$ en $F_L = F_{\text{trek}}$
- per seconde neemt A toe met $\ell \cdot v \rightarrow \frac{\Delta A}{\Delta t} = \ell \cdot v$
- $\Phi = B_{\perp} \cdot A \rightarrow \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_{\perp} \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = B_{\perp} \cdot \ell \cdot v$
- één winding: $U_{\text{ind}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_{\perp} \cdot \ell \cdot v$
- $P = U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = (B_{\perp} \cdot \ell \cdot v) \cdot I_{\text{ind}} \rightarrow U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = (B_{\perp} \cdot I_{\text{ind}} \cdot \ell) \cdot v \rightarrow U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = F_L \cdot v$
- $F_L = F_{\text{trek}} \rightarrow U_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} = F_{\text{trek}} \cdot v$
- de arbeid die de trekkracht verricht wordt omgezet in elektrische energie

12.9 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- q, Q is de elektrische lading in coulomb (C)
- F_{el} is de elektrische kracht in newton (N)
- r is de afstand of de straal in meter (m)
- E is de sterkte van het elektrische veld in newton per coulomb (N/C) of in volt per meter (V/m).
- E_{el} is de elektrische energie in joule (J)
- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)
- B is de sterkte van het magnetische veld in tesla (T) magnetische inductie
- F_L is de lorentzkracht in newton (N)
- ℓ is de lengte in meter (m)
- Φ is de magnetische flux (Wb) of ($T \cdot m^2$) of ($V \cdot s$)
- $B_{\perp}$ is de component van B loodrecht op het draadraam (T)
- A is de omsloten oppervlakte in vierkante meter (m^2)
- U_{ind} is de inductiespanning in volt (V)
- I_{ind} is de inductie-stroomsterkte in ampère (A)
- N is het aantal windingen van de spoel (geen eenheid)
- $d\Phi$ is de verandering van de magnetische flux ($Wb = T \cdot m^2 = V \cdot s$)
- dt is de verandering van de tijd in seconde (s)

Weten

- Influentie is beïnvloeding door een elektrisch geladen voorwerp of door een magnetisch voorwerp.
- De elektrische kracht neemt recht evenredig toe met de lading en neemt af met het kwadraat van de afstand $\rightarrow$ (omgekeerde) kwadratenwet.
- De grootte van het E-veld is de kracht die op 1 coulomb lading wordt uitgeoefend.
- De richting van het E-veld is de richting van de elektrische kracht op een positieve lading.
- Een elektrische veldlijn begint op een positieve lading en eindigt op een negatieve lading.
- Door ieder punt gaat één E-veldlijn. Veldlijnen snijden elkaar niet.
- Veldlijnen staan loodrecht op een geladen voorwerp.
- De sterkte van het E-veld wordt aangegeven met de afstand tussen de getekende veldlijnen. Hoe kleiner de afstand is hoe sterker het E-veld.

- Homogeen E-veld → de veldlijnen zijn recht, zijn evenwijdig en hebben dezelfde onderlinge afstand.
- De arbeid die het kost om een geladen deeltje in een E-veld te verplaatsen wordt opgeslagen als de elektrische energie van het deeltje.
- $1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- Met een spanningsbron kun je geladen deeltjes versnellen (elektronenkanon).
- Een magneet heeft altijd een noordpool en een zuidpool.
- Noordpolen stoten elkaar af, zuidpolen stoten elkaar af, noord- en zuidpolen trekken elkaar aan.
- Een magnetische veldlijn is de lijn waarlangs een magneet zich oriënteert.
- Magnetische veldlijnen zijn gesloten. Ze hebben geen begin en geen einde.
- Door iedere punt van de ruimte gaat één magnetische veldlijn.
- Buiten de magneet lopen de veldlijnen van de noordpool naar de zuidpool. Binnenin lopen de veldlijnen van de zuidpool naar de noordpool.
- Homogeen B-veld → de veldlijnen zijn recht, zijn evenwijdig en hebben dezelfde onderlinge afstand.
- Richting aangeven: **x** papier in | • papier uit
- Rechterhandregel voor stroomdraad:
 - wijs met je rechterduim in de richting van de elektrische stroom
 - het magnetisch veld cirkelt om de draad in de richting van je vingers
- Rechterhandregel voor een stroomspoel:
 - krul de vingers van je rechterhand in de richting van de stroom
 - je duim wijst naar de noordpool
- 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
- FBI-regel voor de richting van de lorentzkracht:
 - hou je linkerhand in de vorm van een pistool
 - richt je wijsvinger in de richting van het B-veld
 - richt je middelvinger in de bewegingsrichting van positief geladen deeltjes.*
 - je duim wijst in de richting van de lorentzkracht
- * Bij negatief geladen deeltjes keer je de bewegingsrichting om.

- De lorentzkracht staat loodrecht op het magneetveld en loodrecht op de snelheid van de bewegende lading.
- De lorentzkracht verandert alleen de richting van de snelheid en oefent daarom geen arbeid uit.
- Als een geladen deeltje loodrecht op de veldlijnen van een B-veld beweegt krijgt het een cirkelbaan waarbij $F_L = F_{MPZ}$.
- De magnetische flux door een draadraam is de veldsterkte keer de oppervlakte.
- Magnetische flux heeft symbool Φ en de eenheid weber (Wb) ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{s}$).
- Inductiespanning U_{ind} ontstaat als de magnetische flux verandert.
- Inductiestroom I_{ind} wordt veroorzaakt door een inductiespanning $U^{\text{ind}} = I_{\text{ind}} \cdot R$
- Wet van Lenz: de inductiestroom werkt de verandering van de flux tegen.
- Tegenflux → het opgewekte B-veld werkt de flux-toename tegen.
Meeflux → het opgewekte B-veld werkt de flux-afname tegen.

Formules

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

grootte van de elektrische kracht

$$\vec{F}_{\text{el}} = q \cdot \vec{E}$$

E-veld keer de lading geeft de elektrische kracht

$$U = E \cdot d$$

spanning is E-veldsterkte keer de afstand

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

verband tussen elektrische energie E_{el} en veldsterkte E

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

deeltjes versnellen door een spanning

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

lorentzkracht op een stroomvoerende draad

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

lorentzkracht op een geladen deeltje

$$F_L = F_{\text{mpz}} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

deeltje beweegt in een B-veld met v loodrecht op B

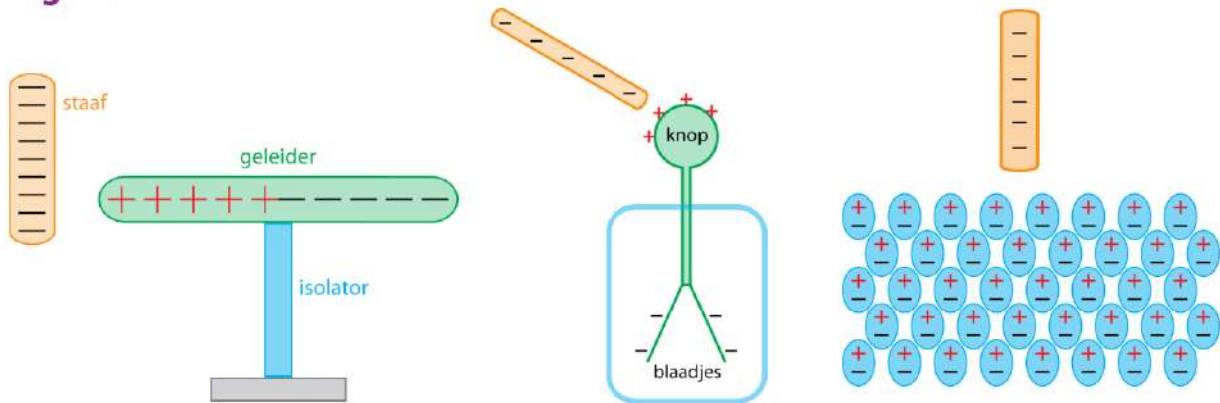
$$\Phi = B_{\perp} \cdot A$$

$B_{\perp}$ is de component van B loodrecht op het draadraam

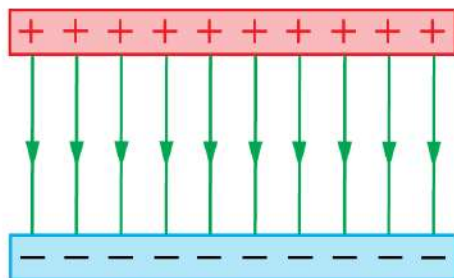
$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

N is het aantal windingen van de spoel

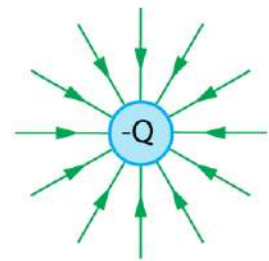
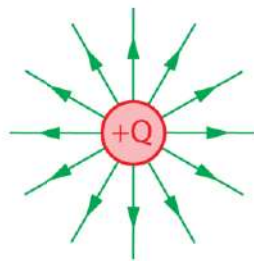
Figuren



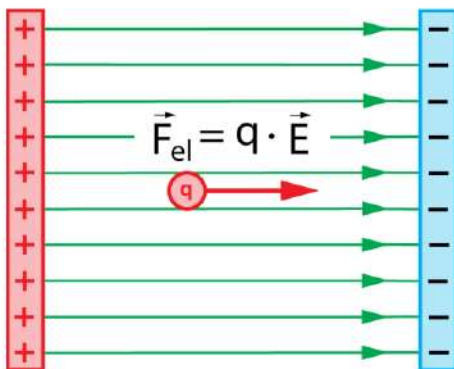
Influentie → een elektrische geladen voorwerp oefent kracht uit op ladingen in de omgeving.



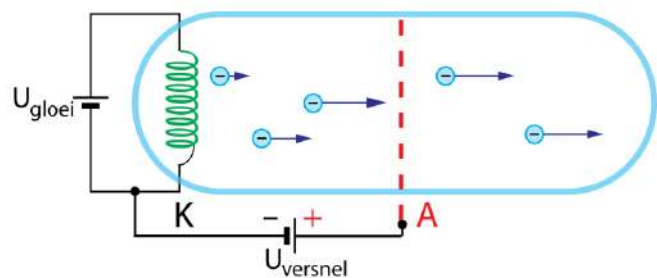
Homogeen E-veld tussen twee geladen platen.



Radiaal E-veld om een geladen deeltje.

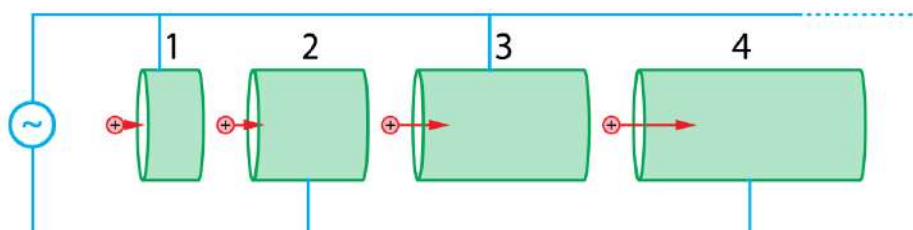


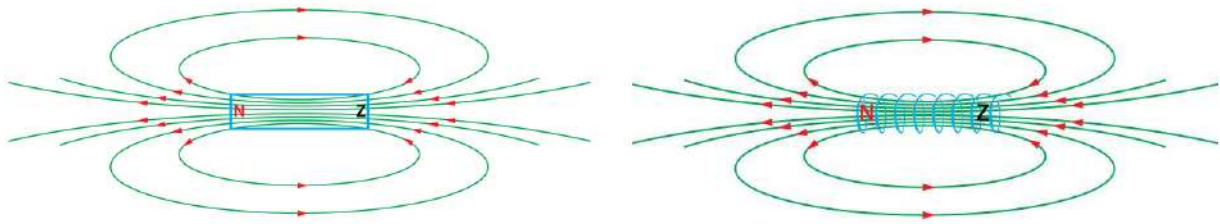
Op een geladen deeltje in een E-veld wordt een elektrische kracht F_{el} uitgeoefend.



In een elektronenkanon wordt een elektron versnelt en krijgt het een zeer grote snelheid: $-q \cdot U = \Delta E_K$

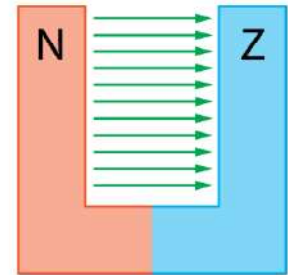
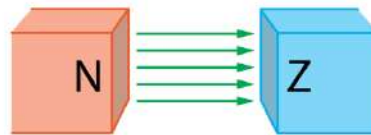
Geladen deeltjes krijgen een grote snelheid door energie in stappen toe te voegen. Bij iedere stap geldt: $-q \cdot U = \Delta E_K$.



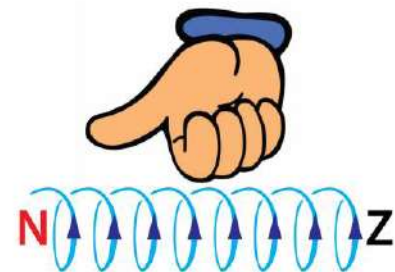
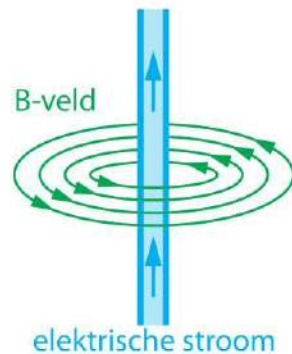


Magnetische veldlijnen zijn gesloten. Buiten de magneet gaan ze van noord naar zuid, binnen de magneet gaan ze van zuid naar noord.

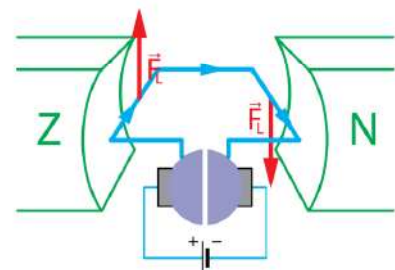
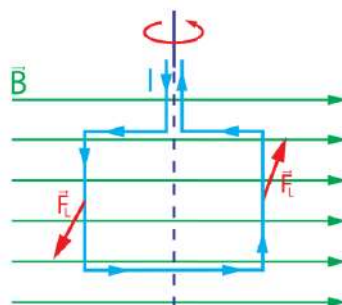
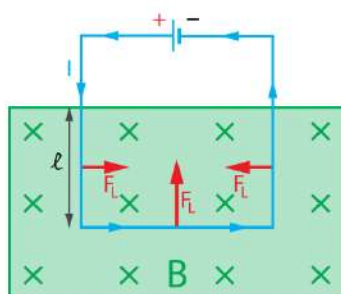
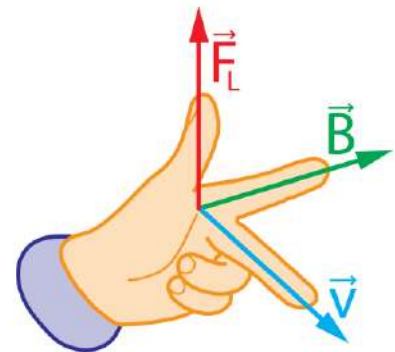
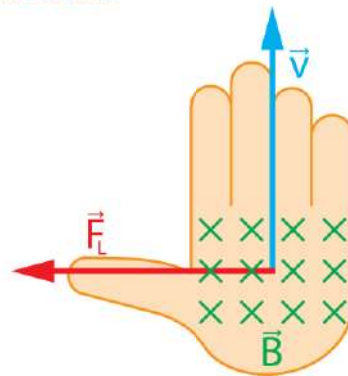
Homogeen magneetveld tussen twee magneten of tussen de polen van een hoefijzermagneet.



Rechterhandregel voor stroomdraad (links) en voor een stroomspoel (rechts).

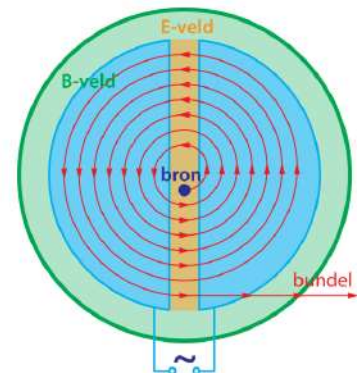
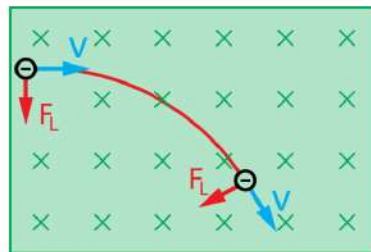
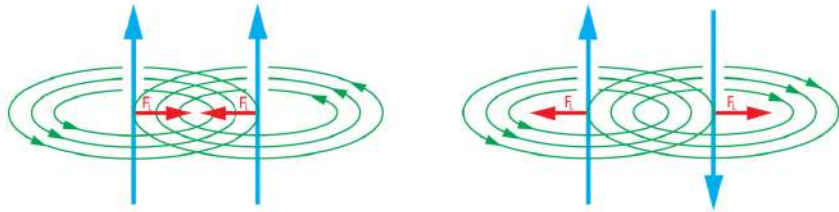


De linkerhandregel en de FBI-regel geven de richting van de Lorentzkracht aan.

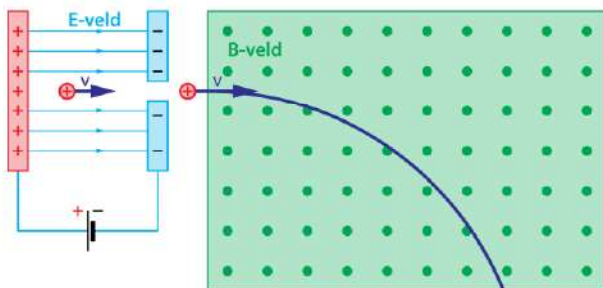


Op een stroomvoerende draad in een magnetisch veld werkt een kracht waardoor de draad in beweging kan komen. **Links** wordt de draad omhoog geduwd. **Midden** wordt de draad een halve slag gedraaid. **Rechts** is een elektromotor waarbij iedere halve omwenteling de stroomrichting wordt omgekeerd, zodat de draad blijft ronddraaien.

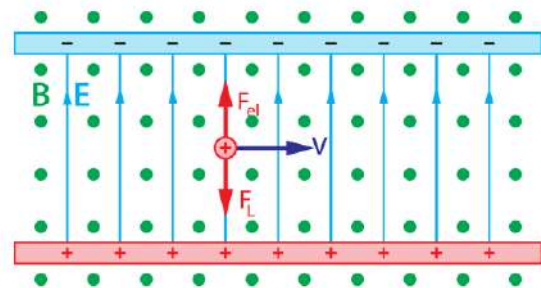
Twee evenwijdige stroomvoerende draden oefenen lorentzkrachten op elkaar uit. Als de stroom dezelfde kant uit gaat trekken de draden elkaar aan (links). Als de stroomrichting tegengesteld is stoten de draden elkaar af (rechts).



Een geladen deeltje beweegt in een magnetisch veld loodrecht op de B-veldlijnen en krijgt daardoor een eenparige cirkelbeweging.

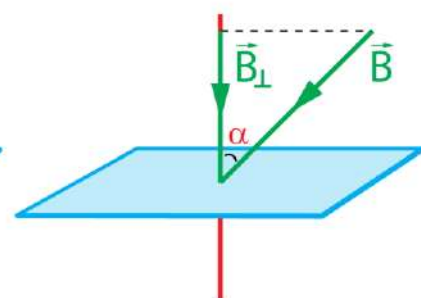
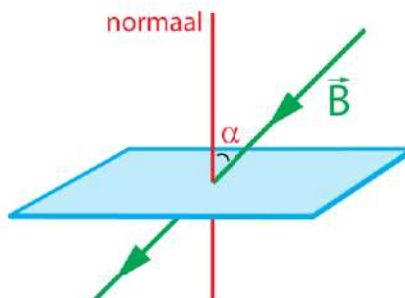


De werking van een massaspectrometer.

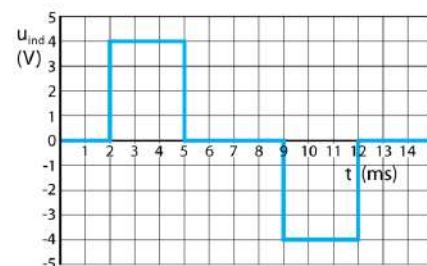
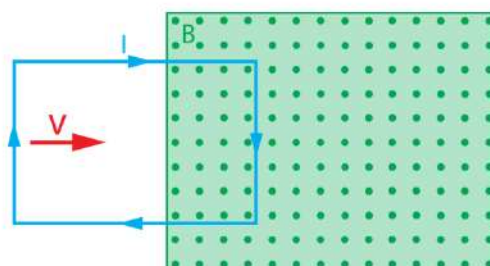


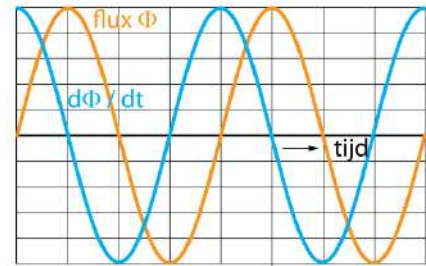
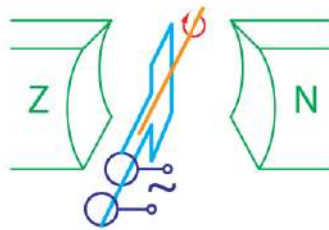
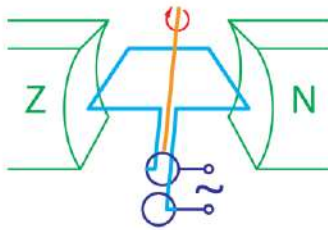
E-veld én B-veld aanwezig.

Magnetische flux Φ door een draadraam. Alleen de loodrechte component B_n van het B-veld is van belang.
 $B_{\perp} = B \cdot \cos \alpha$



Inductiespanning wordt opgewekt als de flux door een draad-raam verandert.

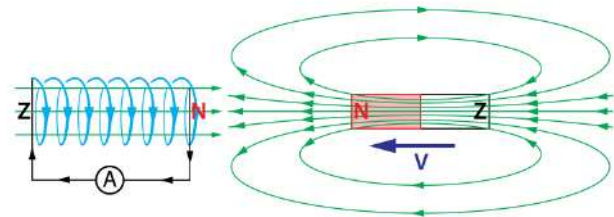




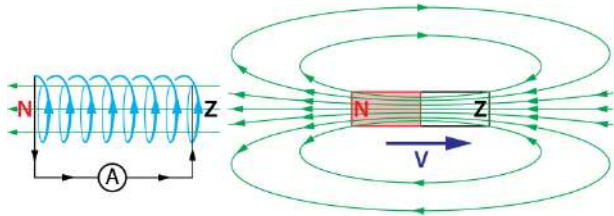
Generator (dynamo). Links is de flux nul en rechts is de flux maximaal.

Flux Φ en fluxverandering $d\Phi/dt$ in een generator.

Het opgewekte B-veld in de spoel zorgt voor een kracht die de flux-verandering tegengewerkt. Hierdoor kost het veranderen van de flux arbeid.

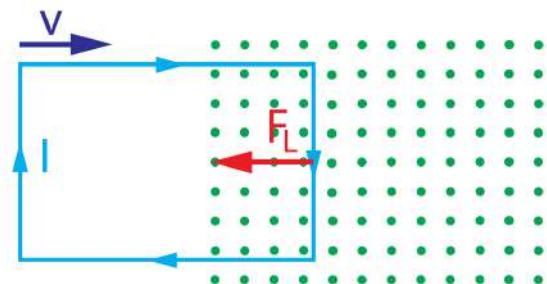


Tegenflux → fluxtoename wordt tegengewerkt.

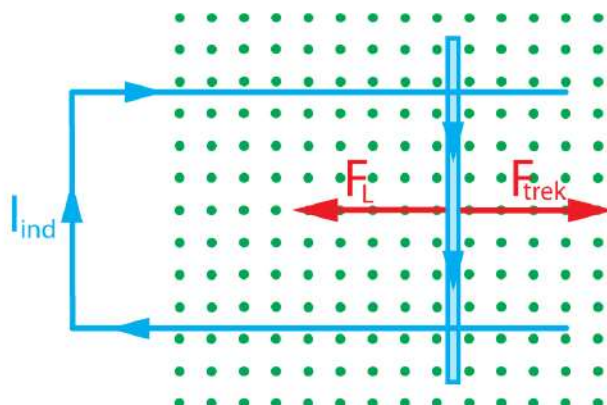
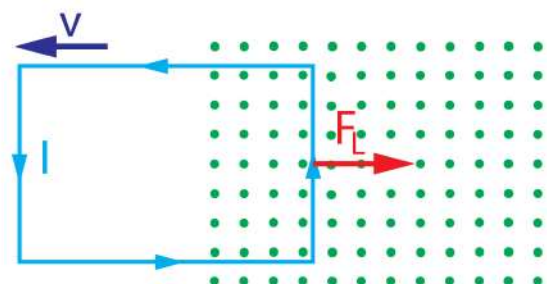


Meeflux → fluxafname wordt tegengewerkt.

Boven: de flux door het draadraam neemt toe. De lorentzkracht werkt de verandering tegen. Het opgewekte B-veld verzwakt het externe B-veld (tegenflux).



Onder: de flux door het draadraam neemt af. De lorentzkracht werkt de verandering tegen. Het opgewekte B-veld versterkt het externe B-veld (tegenflux).



De flux door het draadraam neemt toe en de inductiestroom veroorzaakt een lorentzkracht die de trekkkracht tegengewerkt.