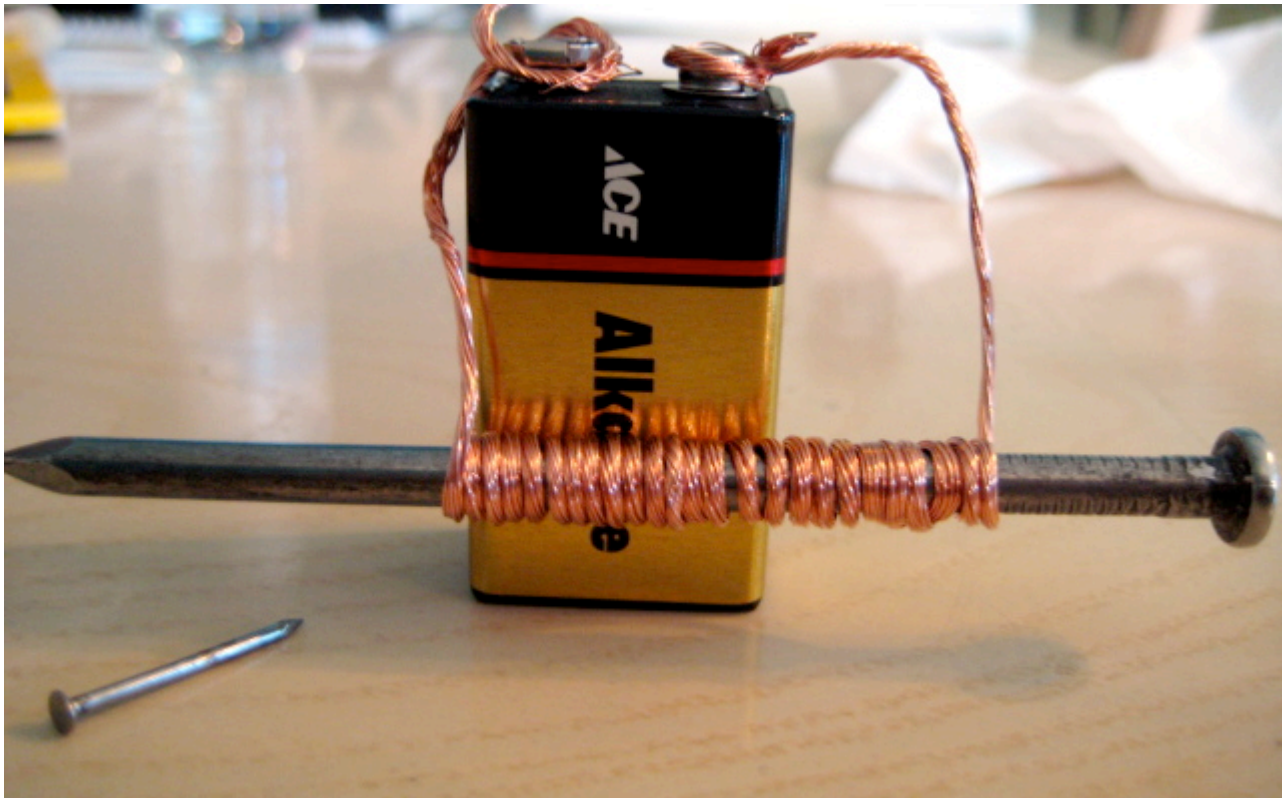


Elektromagneten: relativiteit in actie

Albert Einstein ontdekte de speciale relativiteitstheorie door het bestuderen van de wetten van Maxwell. Die wetten beschrijven twee verschijnselen: elektriciteit en magnetisme. Kennelijk hebben elektriciteit en magnetisme dus iets met elkaar te maken - en heeft dat feit op zijn beurt weer iets te maken met relativiteitstheorie! Hoe zit dat precies? Het eenvoudige voorbeeld van een elektromagneet maakt dit op verrassende wijze duidelijk.

Elektriciteit, magnetisme en relativiteit

Dat elektriciteit en magnetisme veel met elkaar te maken hebben, wordt duidelijk als we een elektromagneet bekijken. Stromende *elektrische* ladingen genereren in zo'n elektromagneet een *magnetisch* veld. Dat het veld rond een elektromagneet inderdaad een magnetisch veld is, en geen elektrisch veld, kunnen we zien door er een ander geladen voorwerp in de buurt te houden. Zo'n voorwerp zal gewoon stil blijven staan en geen enkele kracht ondervinden: er is dus geen elektrisch veld. Laten we het voorwerp echter bewegen, dan ondervindt het opeens wel een kracht en buigt het af in zijn baan - precies zoals gebeurt in de buurt van een magneet!



Afbeelding 1. Een elektromagneet. Een elektromagneet is eenvoudig zelf te maken. Door de koperdraad stomen elektronen, waardoor in en rond de grote spijker een magnetisch veld ontstaat. Stilstaande ladingen merken niets van zo'n magnetisch veld, maar bewegende ladingen wel! Foto: [Gina Clifford](#) (CC BY-SA 4.0).

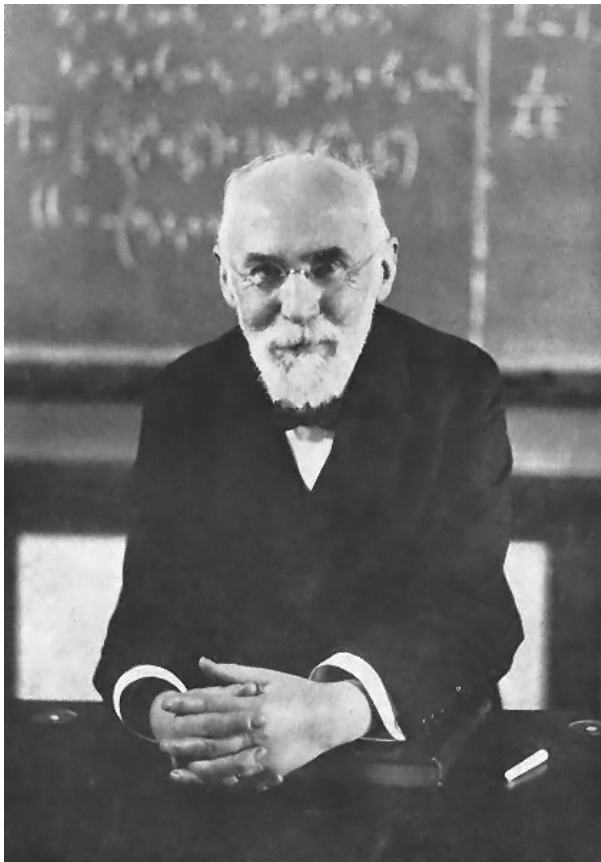
Kortom: in een magnetisch veld

- ervaren stilstaande ladingen géén kracht,
- ervaren bewegende ladingen wél een kracht.

Die magnetische kracht op bewegende ladingen staat bekend als de [Lorentzkracht](#), vernoemd naar de Nederlander Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Lorentz speelde ook een belangrijke rol in de ontwikkeling van de relativiteitstheorie – niet geheel verrassend, aangezien hij een expert was op het gebied van de wetten van Maxwell: wetten die het elektromagnetisme beschrijven, maar die ook een doorslaggevende rol speelden in Einsteins ontdekking van de relativiteit.

Het verband tussen elektromagnetisme en relativiteit is wiskundig nogal gecompliceerd, maar in een eenvoudig geval kunnen we dat verband betrekkelijk eenvoudig inzichtelijk maken. Dat eenvoudige geval is precies het geval dat we hierboven zagen. Een elektrische

stroom levert een magnetisch veld op – en één manier om dat effect te begrijpen is met behulp van de relativiteitstheorie!



Afbeelding 2. Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Naar de Nederlander Lorentz zijn zowel de Lorentzkracht uit de elektriciteitsleer als de Lorentzcontractie uit de relativiteitstheorie vernoemd. Foto: [Museum Boerhaave](#).

Lengtecontractie

Een van de ontdekkingen die Einstein deed toen hij zijn relativiteitstheorie formuleerde, was dat ‘lengte’ een eigenschap is waar verschillende waarnemers het niet altijd over eens hoeven te zijn. Wanneer twee personen ten opzichte van elkaar bewegen, zullen ze voorwerpen die de ander bij zich heeft in de bewegingsrichting iets *korter* meten dan de ander zelf. Bijvoorbeeld: als ik een meetlat van een meter bij me heb, en ten opzichte van jou met 180.000 kilometer per seconde beweeg terwijl ik de meetlat gestrekt voor me uit houd, zul jij een meetlat zien die maar 80 centimeter lang is! Ik zelf zie echter nog altijd een meetlat die een meter lang is – we meten dus allebei een verschillende lengte.

Dat klinkt heel tegenintuïtief. We zijn in het dagelijks leven helemaal niet gewend dat bewegende voorwerpen korter zijn dan diezelfde voorwerpen in rust. Als ik een auto langs zie rijden, merk ik niet dat die auto iets korter is dan als hij stilstaat. Uit het voorbeeld hierboven zien we ook waarom we deze *lengtecontractie* (die ook wel naar onze held Lorentz de *Lorentzcontractie* wordt genoemd) nooit ervaren: om het effect significant te laten zijn, moeten we bewegen met een snelheid die in de buurt komt van de lichtsnelheid, dus met vele duizenden kilometers per seconde. Ook bij lagere snelheden is er sprake van lengtecontractie, maar is dat effect nauwelijks meetbaar. Een auto die met 100 kilometer per uur rijdt zal bijvoorbeeld zo'n 0,000000000002 centimeter korter worden – iets wat vrijwel onmogelijk te meten is, laat staan met het blote oog te zien!



Afbeelding 3. Lengtecontractie?Zelfs als een auto zo snel rijdt als hij maar kan, zal de lengtecontractie slechts een onwaarneembaar kleine fractie van een millimeter bedragen. Foto: [AngMoKio](#) (CC BY-SA 3.0).

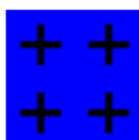
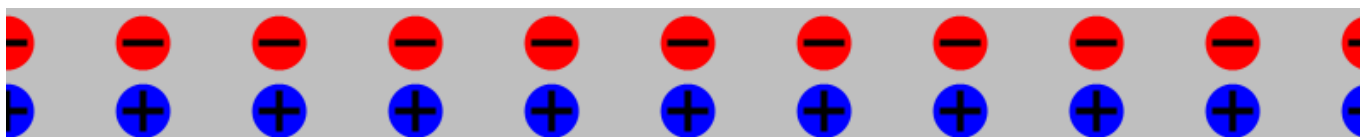
Hoewel lengtecontractie dus niet eenvoudig te meten is, is het effect wel degelijk aanwezig, en is dat in de afgelopen eeuw ook op allerlei manieren experimenteel aangetoond. Sterker nog: zoals we hieronder zullen zien, is de werking van een eenvoudige elektromagneet in zekere zin een bewijs voor het bestaan van lengtecontractie! Wil je meer weten over

lengtecontractie zelf, dan kun je daar alles over vinden in ons [dossier over relativiteitstheorie](#).

Stilstaande draad, bewegende lading

Een elektromagneet kan gemaakt worden van een koperdraad met een groot aantal windingen, zoals in afbeelding 1, maar als het magnetische veld niet te sterk hoeft te zijn is een stroom door één enkele rechte draad al voldoende om een magnetisch veld op te wekken. Laten we voor het gemak dat geval bekijken.

In afbeelding 4 hieronder zie je die situatie weergegeven vanuit een perspectief waarin de draad stilstaat. De stroomgeleiding in een koperdraad gebeurt door negatief geladen elektronen. Die kunnen vrij door het metaal bewegen (zie ons [dossier over quantumtoepassingen](#) voor veel meer daarover), en laten daarbij positief geladen koperionen achter. Hoewel de elektronen in een echte draad natuurlijk niet zo netjes in een rijtje bewegen als in de afbeelding hieronder, is één belangrijk verschijnsel uit die afbeelding wel accuraat: de gemiddelde afstand tussen de negatief geladen elektronen is even groot als de gemiddelde afstand tussen de positief geladen ionen. De draad heeft immers geen netto elektrische lading, en dus is er voor elk positief geladen koper-ion precies één negatief geladen elektron.

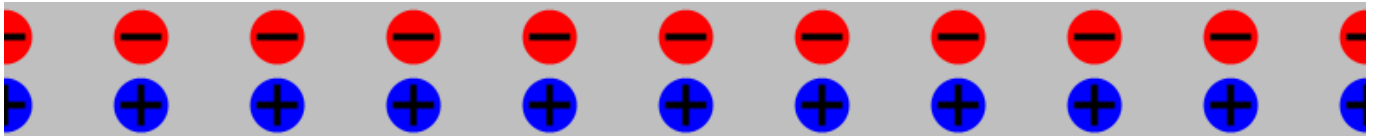


Afbeelding 4. Een stilstaande draad met een stilstaande testlading.

Doordat de draad geen netto lading heeft, zal de testlading niet worden aangetrokken of afgestoten.

In elk stukje draad bevindt zich dus evenveel positieve als negatieve lading – dus netto helemaal géén lading. Een stilstaand geladen voorwerp, zoals in afbeelding 4 hierboven, ondervindt daarom ook geen elektrische kracht. Het voorwerp zal ten opzichte van de draad gewoon stil blijven staan.

Dat wordt anders als we het geladen voorwerp langs de draad laten bewegen. Dan blijkt een voorwerp met positieve lading ineens door de draad afgestoten te worden! Bewegende ladingen ondervinden wél een kracht – met andere woorden: er is rond de draad een *magnetisch* veld aanwezig. De bewegende lading zorgt dus niet voor een elektrisch veld, maar wel voor een magnetisch veld. Dit is het principe waarop een elektromagneet werkt. Let op: we hebben dat verschijnsel nu weliswaar beschreven, maar kunnen we het met behulp van de relativiteitstheorie ook *begrijpen*?

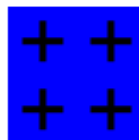
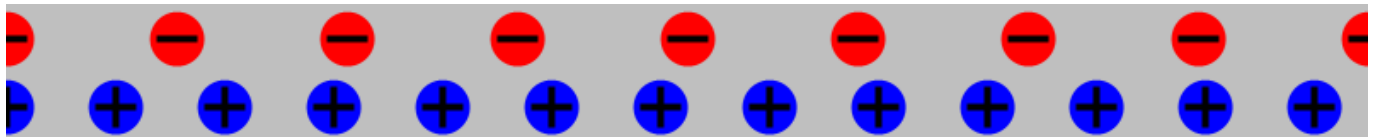


Afbeelding 5. Een stilstaande draad met een bewegende testlading.

De stroom in de draad veroorzaakt een magnetisch veld, waardoor de bewegende testlading wordt afgestoten.

Stilstaande lading, bewegende draad

Dat een stroom in een neutraal geladen draad een bewegende lading afstoot – dus: een magneetveld veroorzaakt – kunnen we begrijpen als we het verschijnsel bekijken vanuit de bewegende lading zelf. Dat doen we in afbeelding 6 hieronder: daar beweegt de “camera” in horizontale richting met het blauwe vierkante voorwerp mee. De draad beweegt vanuit de camera gezien dus naar links, en dus bewegen de vaste, positief geladen koper-ionen met die draad mee ook naar links.



Afbeelding 6. Een bewegende draad met een stilstaande testlading.

Als de draad beweegt en de testlading stilstaat, kunnen we het magnetische veld zien als een gewoon elektrisch veld!

Het was je in afbeelding 5 misschien al opgevallen dat we een heel speciale keuze hebben gemaakt: het bewegende blauwe blok bewoog daar precies even snel naar rechts als de elektronen in de koperdraad. Die keuze is niet essentieel voor wat we willen uitleggen, maar het maakt die uitleg wel wat makkelijker: het betekent namelijk dat in afbeelding 6 hierboven

de elektronen ten opzichte van het blauwe blok in horizontale richting niet bewegen – ze lijken dus stil te staan in de draad!

De truc om magnetisme te begrijpen is nu om te kijken naar wat er gebeurt met de *afstanden* tussen de elektronen onderling en tussen de koper-ionen onderling, gezien vanuit het bewegende blauwe blok.

- De koper-ionen *bewegen* ten opzichte van het blauwe blok. Voor ons (dat wil zeggen: voor de stilstaande camera in afbeelding 5) staan de koper-ionen echter stil. Vanuit het blauwe blok gezien is er dus Lorentzcontractie: de koper-ionen lijken vanuit het blok gezien *dichter bij elkaar* te staan dan voor ons.
- Voor de elektronen is de situatie omgekeerd: die *staan stil* ten opzichte van het blauwe blok. Voor ons (voor de stilstaande camera in afbeelding 4) leken ze echter te bewegen. De afstand tussen de elektronen moet voor ons dus korter lijken dan voor het bewegende blok – of omgekeerd: vanuit het blok gezien lijken de elektronen *verder van elkaar* te staan dan voor ons.

Het resultaat is verrassend: vanuit het bewegende blok gezien komen de positieve koper-ionen dichter bij elkaar te staan, en de negatieve elektronen juist verder uit elkaar. Met andere woorden; het bewegende blok ziet meer koper-ionen dan elektronen, en dus een *netto positieve lading* in de draad! Dit resultaat is erg verrassend, maar als we het eenmaal bereikt hebben is de “magnetische” kracht eenvoudig te begrijpen: vanuit het blok zelf gezien is dit niets anders dan een eenvoudige *elektrische* kracht. Er is positieve elektrische lading over in de draad, en dus wordt het positief geladen blok door de draad afgestoten.

Twee puzzels

Het resultaat is prachtig: als we de relativiteitstheorie – en in het bijzonder: de Lorentzcontractie – in acht nemen, zien we dat elektrische en magnetische velden onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn. Wat er vanuit de stilstaande camera uitzien als een magnetisch veld, ziet er vanuit de bewegende camera uit als een elektrisch veld. Beide soorten velden zijn dus verschillende verschijningsvormen van één geheel! Het was deze ontdekking die Lorentz in wiskunde vatte, en die Einstein vervolgens in veel grotere algemeenheid uitwerkte in zijn speciale relativiteitstheorie.



Afbeelding 7. De puzzel van de relativiteit. Relativiteitstheorie lijkt soms een puzzel van raadselachtige resultaten. Uiteindelijk blijken alle stukjes echter aan elkaar te passen en een prachtig geheel te vormen.

Foto: Jared Tarbell (CC BY 2.0).

Wie wat langer over het bovenstaande nadenkt komt al snel een aantal puzzels tegen. We noemen er twee:

1. Relativiteitstheorie speelt normaalgesproken pas een rol bij heel hoge snelheden, in de buurt van de lichtsnelheid. Zo snel bewegen de elektronen in een stroomdraad echter niet - wie uitrekenet hoe snel de elektronen in een gemiddelde stroomdraad bewegen, komt uit op een snelheid van enkele tientallen *micrometers* per seconde! Hoe kan de relativiteitstheorie hier dan toch zo'n duidelijk effect hebben? De reden is dat er in een gemiddelde stroomdraad gigantisch veel elektronen zitten: per kubieke millimeter een getal van zo'n 20 cijfers. Een héél klein beetje Lorentzcontractie leidt dus al snel tot een meetbaar ladingoverschot. Magnetisme is dus een van de weinige gevallen waarin we de gevolgen van relativiteit al bij heel lage snelheden kunnen waarnemen!

2. Als voor de ene waarnemer ionen en elektronen even ver van elkaar af staan, en voor de andere waarnemer niet, “verdwijnen” er dan geen elektronen? Het oplossen van deze puzzel is wat lastiger dan het oplossen van de vorige, maar toch kan het. Ten eerste: in ons voorbeeld hierboven hebben we een oneindig lange stroomdraad waarin oneindig veel elektronen bewegen. Als we die elektronen wat verder uit elkaar zetten, nemen ze nog steeds oneindig veel lengte in... er is in dat geval dus niet echt een tegenspraak. Om het probleem duidelijker te formuleren, zouden we beter een stuk draad van eindige lengte, bijvoorbeeld 2 meter, in een lus kunnen leggen zodat de elektronen eerst een meter de ene kant op bewegen, en dan weer een meter terug. Maar daarmee hebben we het probleem veranderd: op de “heenweg” bewegen de elektronen met het blauwe blok mee, en lijken ze dus verder van elkaar te staan, maar op de terugweg bewegen ze tegen het blok in (vanuit het blok gezien zelfs twee keer zo snel als de ionen), en staan de elektronen dus juist *dichter* bij elkaar. Kortom: in de ene helft van de draad ziet de waarnemer die met het blok meebeweegt *minder* elektronen dan ionen, maar in de andere helft juist *meer* - en wie de berekening met behulp van Einsteins formules heel precies doet, zal merken dat de resultaten elkaar precies opheffen. Er verdwijnen dus geen elektronen!

Het leuke van relativiteitstheorie is dat de theorie altijd “op haar pootjes terecht komt”. Wie over relativistische problemen nadenkt, stuit vaak al snel op schijnbare tegenspraken zoals hierboven, maar bij nadere, precieze formulering van het probleem verdwijnen die tegenspraken ook weer als sneeuw voor de zon. Relativiteit is een samenspel van allerlei verrassende effecten, die samen leiden tot een prachtig en consistent geheel!