# De DC inductie motor

## 1. Voorkennis

Er wordt verondersteld dat de lezer al wat voorkennis heeft betreffende de fundamentele beginselen van krachten die optreden tussen ladingen.

(Achteraan dit document heb ik een gedeelte van mijn RCenL document bijgevoegd)

Deze krachten zijn:

1) De wet van Coulomb welke zegt dat $F_E = \frac{Q_1.Q_2}{4.\pi.\varepsilon.r^2}$ voor statische ladingen.(In een elektrisch veld)

Deze wet is louter experimenteel ontstaan. Je gelooft erin en je gebruikt hem, maar een fundamenteel bewijs bestaat er niet.

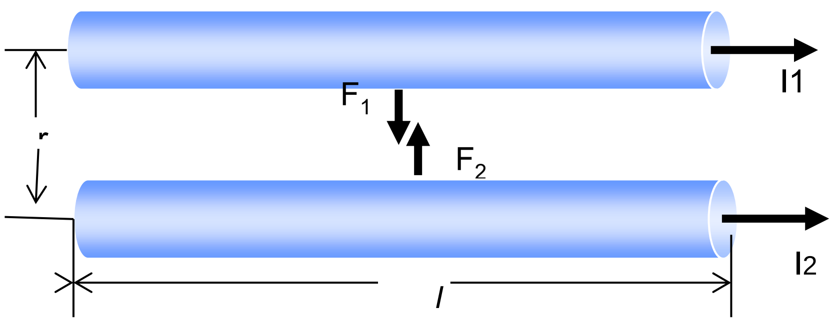
2) De relativiteit theorie van Einstein die de wet van Coulomb aanvult in geval van ladingen in beweging en daarom voor ladingen in beweging (of stromen door een element) er een bijkomende kracht bijkomt. Deze noemt men de Magnetische kracht, en is gelijk aan:

$F_M = \frac{Q_1.\Delta Q}{4.\pi.\varepsilon.r^2}$ waarin $\Delta Q = Q_2.\frac{v^2}{c^2}$ met $v =$ (drift)snelheid van de elektronenstroom en $c =$ snelheid van het licht.

De totale kracht wordt dan $F_T = F_E + F_M$ (wat meestal neergeschreven wordt als $F_T = q.E + q.v \times B$ ).Het bewijs dat dit zo is kan men nalezen in mijn RLC document.

Noteer dat in mijn benadering, ik niet over vectoriele producten spreek ($\times$) en ook niet over een elektrisch ($E$) en magnetisch veld ($B$).

3) Wat is een spoel (L) en wat is een magneet (M) en hoe met een spoel een magneet kan gemaakt worden? Dit is uitgebreid uitgelegd in mijn document RCenL.
4) Ook het bewijs dat tweeparallel draden doorlopen met een stroom in dezelfde richting elkaar aantrekken, en in tegenovergestelde richting elkaar afstoten met een kracht die gelijk is aan $F_D = \frac{\mu_0.I_1.I_2.l}{2.\pi.r}$ is bewezen in mijn RCenL document. Hierin is $I_1$ en $I_2$ de respectievelijke stromen door de parallel draden (met in acht name van het teken) en $l$ de lengte van de twee parallel draden en $r$ de afstand tussen de parallel draden. Dit is weergegeven in Figuur 1.




Figuur 1

Hier wil ik ook de nadruk leggen dat deze krachten in de ruimte verspreid liggen en als we deze krachten met elkaar willen optellen of aftrekken we dit vectoriel moeten doen. Wanneer ze echter zuiver parallel naast elkaar liggen kunnen we gewoon $F_1$met $F_2$ optellen.

## 2. Eenvoudige voorstelling van een magneet.

Meestal zijn magneten rond maar we kennen evengoed vierkante of rechthoekige magneten. In onze benadering gaan we gebruik maken van een vierkante magneet.
Maar dit betekent ook dat we een magneet met dezelfde eigenschap kunnen maken met een spoel dat op een vierkante ferro-magnetische blok gewikkeld is (bijvoorbeeld een stuk ijzer) en aangelegd wordt aan een DC voeding.
Een hele hoop windingen kunnen we ook veronderstellen als $L_T = n.L_e$ ,waarin $L_e$ de inductie is van één winding en $n$ het aantal windingen, zodat de totale spoel kan voorgesteld worden als één draad rond een vierkante blok.
Wel moeten we in het oog houden dat de windingen loodrecht op de noord-zuid verbinding van een magneet staan.

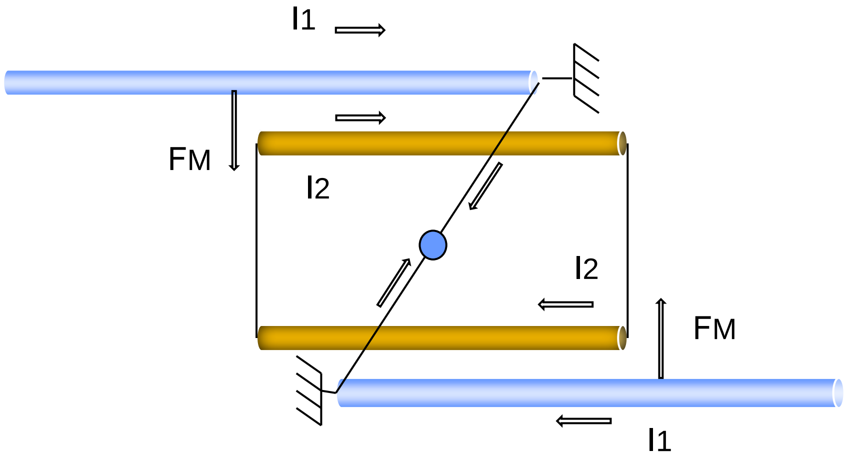
## 3. Voorstelling van een draad naast een magneet.

Met al onze vereenvoudigingen die we hiervoor hebben aangenomen kunnen we een theoretische schakeling opstellen om aan te tonen dat een draad die raakt aan de buitenkant van een magneet een zijwaartse torsie-kracht ondervindt (naar links of naar rechts naargelang de stroomrichting door de draad).
Eens dit bewezen is kunnen we dit fenomeen uitbreiden tot een ronddraaiende kracht, en dus zolang er stroom in dezelfde richting door de draad gaat er een continue rondgaande beweging is van de los opgehangen draad. (zoals de ronddraaiende draad in de proef opstelling van Faraday).
Deze voorstelling is te zien in Figuur 4.
Ik wil er aan toevoegen dat deze ronddraaiende draad veel stroom nodig heeft en weinig kracht ontwikkeld. Het is onze Belg Zenoble Gramm die dit principe overgenomen heeft maar er een efficiënte dynamo en omgekeerd gelijkstroom generator (motor) van gemaakt heeft die onze moderne wereld ingrijpend veranderd heeft.

## 4. Krachten die op elkaar inwerken.

In

Figuur 2 heb ik een opstelling gemaakt die bestaat uit twee draden die (geïsoleerd)vast geankerd zijn waar ze beide samenkomen maar het andere einde vrij kan bewegen. Door deze beide draden loopt een stroom $I_1$ maar in tegengestelde richting en samenkomt in het middelpunt en uit het blad verdwijnt. Daar binnenin ook twee draden waardoor een stroom $I_2$ loopt in tegenovergestelde richting.



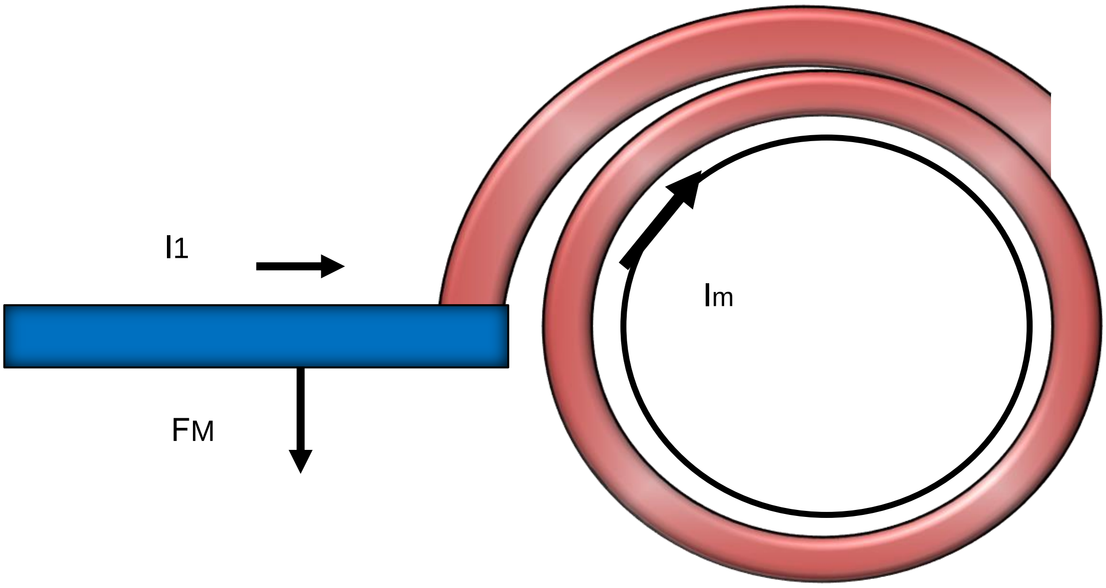

Figuur 2

Passen we nu punt 4) (kracht tussen parallelle draden) toe op ons schema, dan zien we dat de bovenste draad (blauwe draad) de onderliggende draad (gele draad) aantrekt. Dit gebeurt ook met de onderste (blauwe) draad die de erboven (gele) draad aantrekt.

De kracht $F_M = \frac{\mu_0.I_1.I_2.l}{2.\pi.r}$. Hierin is $I_1$ de stroom door de bovenste draad en $I_2$ de stroom door gele draad. $l$ is gelijk aan de lengte die beide draden overlappen, en $r$ is de afstand tussen de blauwe en gele draad. Men ziet dat beide blauwe draden de gele draden even sterk naar zich toe trekken. Maar omdat één uiteinde vast verankerd is veroorzaakt dit een torsie, een wringing, zodat de blauwe draden beginnen te draaien.

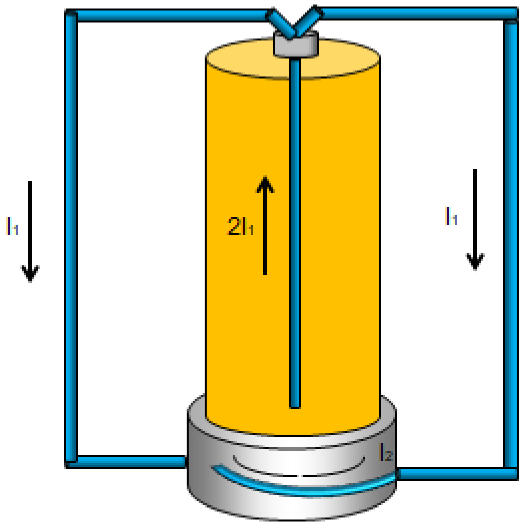
Maar ook dit verhaaltje blijft niet duren, tenzij men tegelijkertijd de gele draden ook mee laat bewegen met de draairichting.
En hier ligt de clou om van deze zijwaartse krachten een continu ronddraaiende beweging te maken.
Met andere woorden als de draad een weinig naar, boven beweegt men tegelijkertijd ook de gele draden ook met de draaibeweging moet verplaatsen om dit effect continu te maken.

De oplossing hiervoor is geniaal en toch vrij simpel.
Ten eerste door ronde magneten te gebruiken. Dit is hetzelfde als zeggen dat we geen vierkante windingen gebruiken maar ronde wikkelingen.



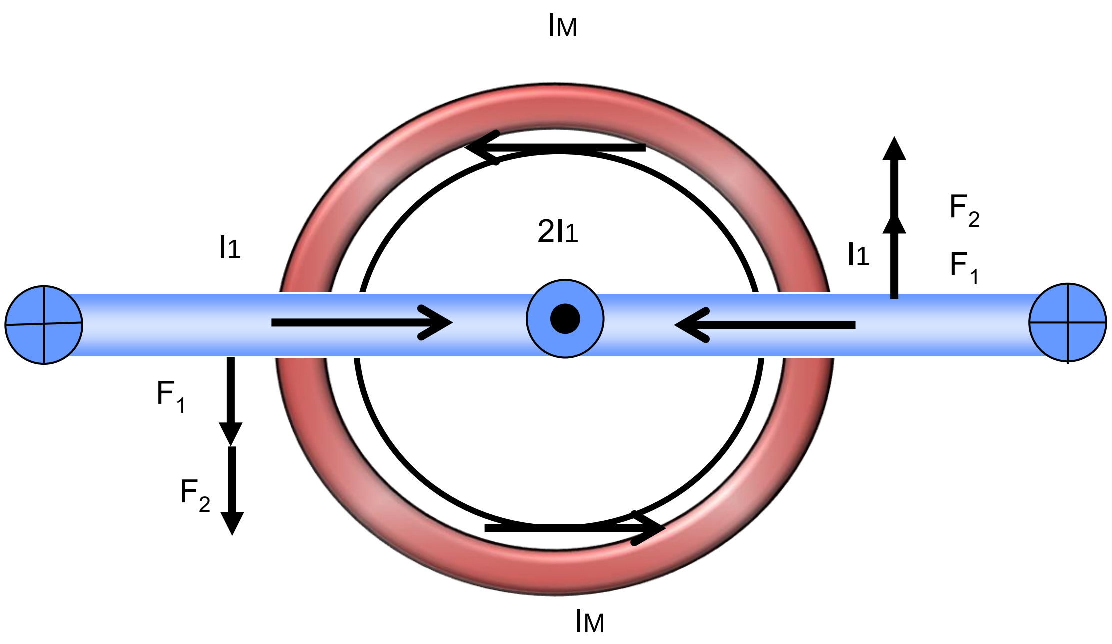

Figuur 3

Dan binnenin de magneet stroomt er een $I_M$ en door de draad een stroom $I_1$. Doordat beide stromen in dezelfde richting stromen, zal over de gebogen lengte de beide draden elkaar aantrekken. Maar vermits de losse draad met zijn uiteinde aan de magneet kleeft zal de $F_M$ kracht een torsie beweging maken. Met de andere draad (die ik hier niet getekend heb(was te ingewikkeld)) gebeurt natuurlijk identiek hetzelfde maar in omgekeerde richting.
Nu draait tegelijkertijd de draad en verschuift het aanrakingspunt met de ronde magneet. Maar na deze verschuiving blijft de toestand hetzelfde alleen is alles iets verschoven.
Uiteindelijk blijft alles ronddraaien. Het volledig circuit zoals het mogelijk uitgevoerd is (er zijn verschillende variaties op ditzelfde principe) is afgebeeld in Figuur 4.
Noteer duidelijk dat de kracht ontstaat alleen op het stukje draad dat in (bijna)aanraking is met de magneet maar de stroom doorverbinding gebeurt op het stukje draad dat werkelijk in aanraking is met de magneet. De stroom gaat altijd langs de oppervlakte van de magneet en niet door de binnenkant van de magneet.




**Figuur 4**

Van bovenaf gezien ziet de figuur eruit als in Figuur 5. De magnetisatie stroom van de magneet ($I_M$) loopt rond terwijl de stroom door de draad ($I_1$) gaat van de buitenkant tot aan het midden van de magneet die vasthangt aan de negatieve kant van de batterij. Vermits tussen de linkerkant van de magneet en het middelpunt de bovenste stromen elkaar afstoten en de onderste stromen elkaar aantrekken wordt er daar een totale kracht naar beneden ontwikkeld. Aan de rechterkant gebeurt juist het tegenovergestelde zodat er een totale kracht naar boven ontstaat. Het resultaat is dat deze beide krachten de draad doet draaien.




Figuur 5

=====================================================================================================

## Appendix uit mijn document RC en L.

# 5. Inductie

## 2.2. Wat is een Inductie of een Spoel?

Het is de bedoeling om aan te tonen dat

$$\mathrm{L} = \frac{\mu.L^2}{4.\pi.d}$$ ofwel
$$\mathrm{L} = \frac{\mu.N^2.S}{d}$$

Hierin is *N* het aantal windingen, *L* de totale lengte van de draad, en $\mu = \mu_0 . \mu_r$ een constante welke afhankelijk is van het materiaal waarom de draad gewonden is.

Magnetisme uit leggen is niet zo gemakkelijk. Dit is een heel ander verhaal dan wat we hiervoor hebben gezien. Zoals niemand weet wat eigenlijk kracht en lading is, maar wat men toch enigszins kan aanvoelen, zo is magnetisme ook een van die eigenaardige zaken, maar magnetisme is wel te verklaren.

Maar magnetisme is alleen maar te verklaren met de relativiteit theorie van Einstein. Het is dus een verschijnsel dat waargenomen wordt als er iets met een zekere snelheid beweegt ten overstaan van een ander (stilstaand referentie) element.

En wat beweegt zijn de elektronen in een geleider ten opzichte van de protonen die vast blijven staan in het rooster van de koperdraad.

Nu weten we dat in ons normaal leven de relativiteit theorie weinig invloed uitoefent, temeer omdat men enig verschil eerst begint te ontwaren wanneer men spreekt over snelheden dicht bij de snelheid van het licht. (c = 300.000 km / s). Deze fameuze factor die het verschil laat zien tussen de normale beweging formules van Newton en de gecorrigeerde formule van Einstein is bijvoorbeeld voor de waargenomen lengte van een draad in beweging ( $L_b$ ) tegenover die zelfde draad in stilstand ( $L_0$ ) gelijk aan:

$L_b = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ofwel en het verschil in lengte bedraagt

$$\Delta L = L_0 \frac{v^2}{c^2}$$

en vult men in deze formule *v = 1 mm/s* en *c = 300.000 km / s* in dan zal $L_b$ verkort zijn met een lengte van

$$\Delta L = 1m \frac{0.001^2 m^2}{\left(3.10^8\right)^2 m^2}$$

$$\Delta L = \frac{1}{3} \times 10^{-12} m$$

$$ofwel$$

$$\Delta L = \frac{1}{3} \times 10^{-9} mm$$

Maar je moet een genie als Einstein zijn om in te zien omdat er per mm$^3$ er ook enorm veel elektronen zijn namelijk ongeveer 9x10$^{22}$ er daardoor toch een behoorlijk aantal elektronen op overschot zijn, die op hun beurt een aantrekkingskracht uitoefenen op een naburige draad.

Veronderstellen we een draaddikte van 1 mm$^2$ dan zijn er over een draadlengte van 1 mm ongeveer 9 x 10$^{22}$ elektronen per mm, en dus het aantal elektronen in dit stukje *ΔL* is dan

$$\Delta L \times 9 \times 10^{22} / mm = \frac{1}{3} \times 10^{-9} \times 9 \times 10^{22} = 3 \times 10^{13} elektronen$$

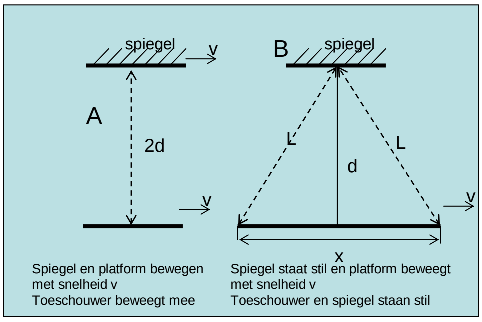
wat een behoorlijk getal is en een aanzienlijke kracht kan uitoefenen.

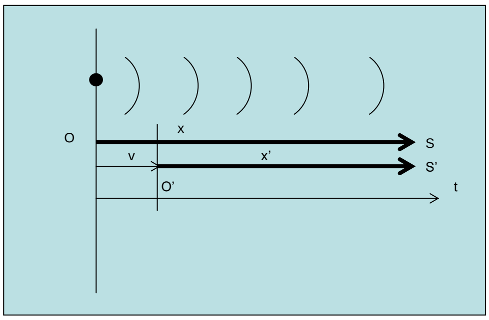
Maar vooraleer we verder gaan, gaan we eerst trachten te bewijzen waarom $\Delta L = L_0 \dfrac{v^2}{c^2}$ .

Hiervoor moeten we beroep doen op de relativiteit theorie van Einstein.

## 5.1. De Lorentz transformatie

De Lorentz transformatie ( volgens Natuurkunde voor het THO door Ir. B van Buuren & J.A. de Jong)




Figuur 6

Stel dat men een lichtstraal uitzendt vanaf punt $x_1$ op tijdstip $t_1$ en men op een afstand $x_2$ de tijd $t_2$ meet op het ogenblik dat de lichtstraal daar voorbij komt. Vermits de snelheid van het licht gelijk is aan $c = 3x10^8\ m/s$ *is* $c = \Delta L/\Delta\ t$ of meer specifiek

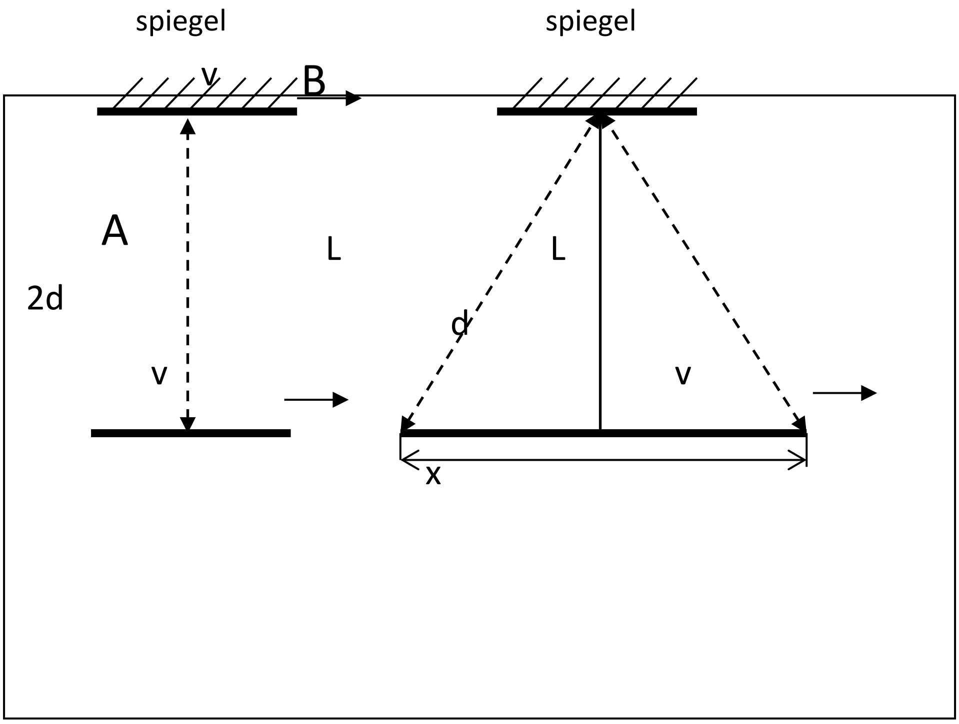
$t_2 - t_1 = ( x_2 - x_1) / c$

Wanneer de afstand *ΔL* zich op zijn beurt met een snelheid *v* voortbeweegt is volgens de klassieke methode $\Delta t = \Delta L / ( c - v)$. Maar volgens Einstein kan dat niet omdat er niets sneller kan gaan dan de snelheid c en blijft $\Delta t = \Delta L / c$. Er is dus een discrepantie tussen de klassieke manier van Newton en het denken volgens Einstein.
Dit is het *dogma* van de relativiteit.
Je aanvaardt het als een geloofsovertuiging. Je gelooft erin en zolang er geen bewijs bestaat dat dit *dogma* tegenspreekt kunnen we erin blijven geloven. Maar verstaan, begrijpen waarom dit zo is weten we niet. Geleerden als Maxwell en Einstein en nog vele anderen die experimenten hebben uitgeoefend kwamen tot de *conclusie* dat er niets sneller gaat dan het licht. Maar begrijpen doen ze niet. Niemand begrijpt dit! (Maar geen enkele leraar in heel mijn opleiding op het college of in de hogeschool heeft ooit durven zeggen dat *hij* het niet begreep !!!!)

Laten we de probleemstelling eens schetsen wat relativiteit eigenlijk is.

Wanneer een jongen op een rijdend platform een bal loodrecht naar boven gooit tot een hoogte *d* en terug opvangt, dan zal volgens die jongen de bal een afstand hebben afgelegd van *2d*. Maar volgens een toeschouwer langs de weg die dus stilstaat ten opzichte van het voorbijrijdend platform ziet deze dat de bal een parabolische curve heeft gemaakt met als hoogste punt van deze curve het zelfde punt *d*. Maar een curve is steeds groter dan een rechte lijn, er is dus een relatief verschil tussen hetgeen de jongen op het platform ziet en de toeschouwer langs de weg. Dit is volledig verklaarbaar met onze gekende wetten van Newton en translatie verschuivingen in een assenstelsel *x,y* volgens de *x* richting.

Maar veronderstel dat we hetzelfde experiment uitvoeren maar nu met een lichtstraal.




Figuur 7

De jongen op het platform die zich voortbeweegt met een snelheid *v* schiet een lichtstraal recht naar boven tegen een spiegel op een hoogte *d* en meet de tijd *t'* die nodig is voor de lichtstraal om heen en weer te komen. Vermits *v = L / t* en we hier aannemen dat *v = c* de snelheid van het licht, en *L = 2d* kunnen we dus schrijven dat *c = 2d / t'* ofwel

t' = 2d / c of iets anders geschreven

$$t' = \frac{2}{c}\sqrt{d^2} \qquad (1)$$

Maar voor de toeschouwer blijkt dat de straal een afstand x verder is terechtgekomen en heeft in tussentijd een afstand 2L afgelegd. Gedurende de tijd t die de toeschouwer heeft gemeten.

Nu is volgens de stelling van Pythagoras $L^2 = ( x / 2 )^2 + d^2$ of ook

$$2L = \frac{2}{c}\sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

en vermits hier ook *c = 2L / t* ofwel *c.t = 2L* volgt dat

$$t = 2\sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2} \qquad (2)$$

Delen we (2) / (1) dan bekomen we

$$\frac{t}{t'} = \frac{\frac{2}{c}\left(\sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}\right)}{\frac{2}{c}\sqrt{d^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2d}\right)^2}$$

Maar vermits *x = v . t* en *2d = c.t'* volgt dat

$$\frac{t^2}{t'^2} = 1 + \left(\frac{vt}{ct'}\right)^2$$

ofwel

$$\frac{t^2}{t'^2} - \left(\frac{vt}{ct'}\right)^2 = 1$$ en na wat vereenvoudiging

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (3)$$

We kunnen dit tijdsverschil ook toepassen op een afstand immers als

$$\frac{L}{v} = \frac{\frac{L'}{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

algemeen *t = L / v* en *v* is constant dan zal

$$L = \frac{L'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (4)$$

Vermits

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}<1$$

volgt dat *L* ( volgens het stilstaand frame)
steeds groter is dan *L'* ( volgens het bewegend frame) of andersom, een lijnstuk dat zich beweegt (L') is steeds kleiner dan een stilstaand lijnstuk (L).In welke richting het beweegt blijkt van geen belang, immers

$(+v)^2 = (-v)^2 = v^2$ .

Laten we dit zelfde experiment nu nog eens uitvoeren maar nu beschouwen we niet een lichtstraal dat naar boven wordt geschoten naar een spiegel, maar wel een lichtstraal dat volgens de beweging van *v* dus in de richting van de x-as wordt uitgezonden op het ogenblik dat het einde van het platform precies voorbij de toeschouwer passeert, en dat we op een afstand x van voor op het platform, maar ook verder op de x-as verwijderd van de toeschouwer, de tijd t meten wanneer de lichtstraal daar aankomt.

Maar ook de jongen op het voorbijrijdend platform staat op een afstand x' welke samenvalt op dat ogenblik met de afstand x dat de toeschouwer ziet op dat ogenblik dat ook de lichtstraal wordt uitgezonden.

Ook de jongen meet op zijn platform de tijd t' wanneer de straal in zijn bewegende positie aankomt.

Laten we dit nauwkeuriger bekijken om dit verschil te kunnen uitdrukken hoeveel dit bedraagt.

We noemen het voorbijrijdend platform S ' dat zich beweegt met een snelheid v ten opzichte van een stelsel S , het stilstaand gebied waar de toeschouwer staat. langs de x-as (zoals te zien in fig. xx) zal de afstand x (op de grond) gelijk zijn aan de afstand x' (op het platform) op het ogenblik dat de straal wordt uitgezonden in punt O naar P.

Op een zekere afstand van O namelijk in punt P wordt de afstand bepaald op het ogenblik dat de lichtstraal daar aankomt.

Men laat P meebewegen met het stelsel S'. Het tijdstip dat het lichtsignaal het punt P bereikt wordt door de waarnemer in S' bepaald op t'. Daar P met S' meebeweegt is de afstand O'P voor de jongen in S' steeds x' gebleven. Volgens de jongen in S' *is*

| |
|---|
| $x' = c \cdot t'$ (1) |

In stelsel S is de afstand $x2 - x1 = c ( t2 - t1 )$ of korter geschreven

| |
|---|
| $x = c \cdot t$ (2) |

Het stelsel S ziet de totale afstand als $OP = OO' + O'P$

Het stuk O 'P kan men zich indenken als *O ' P = k.x '* en het stuk

*OO ' = v.t*

Laten we hier eventjes bij stilstaan. We hebben hiervoor kunnen aanduiden dat een "lengte in beweging *L'* " door een toeschouwer (niet in beweging) de lengte *L* waarneemt die kleiner is dan de werkelijke lengte gemeten in het stelsel *S'* dat zich met een snelheid beweegt. In stelsel *S* is *dus L = L' .k* (a)

Dus totaal OP = c . t = k..x ' + v.t ofwel

| |
|---|
| *k.x' = ( c-v )t* *(3)* |

In het stelsel S ' wordt de afstand O 'P waargenomen als het verschil van afstanden namelijk
O 'P =OP – O 'O met O ' P = x' en dus ook x' = c. t' verder is O 'O =v.t ' maar OP = c.t' zodoende krijgen we

OP = O 'P + O'O ofwel k.x =c.t ' + v.t ' en dus

| |
|---|
| *kx = c.t' + v.t'* (4) |

Formules (3) en (4) formuleren de voornaamste begrippen over relativiteit. Voor degenen die deze formules begrijpen is de rest niets anders dan wat algebraïsche manipulaties.
Laten we ook hier eventjes blijven stilstaan. Vanuit het stelsel *S'* (waar de jongen zich bevindt) ziet men het stelsel *L* (waar de toeschouwer staat) met een snelheid *v* achteruit gaan. Dus vanuit *S'* is het precies alsof *S* in beweging is (en dat het platform en de jongen stilstaan ). Dus vanuit het standpunt van de jongen is de "lengte in beweging *L*" korter dan de "lengte niet in beweging *L*' ) of wel *L' = L..k* *(b)*

Vermits de snelheid en de stelsels waarover we spreken nog altijd hetzelfde zijn en er in tussentijd geen versnelling is opgetreden, mogen we besluiten dat de k factor dezelfde is, al zijn de lengtes niet hetzelfde. *x'* is zeker korter dan *x*, maar de verkorting van de lengte van *x'( in S') = k.x'* in het stelsel *S.* Zo ook is het lijnstuk *x* gezien vanuit het stelsel *S'* gelijk aan *x(in S) = kx'.*

Wanneer ik (a) en (b) met elkaar vergelijk kom ik op het eerste gezicht een zeer raar verschijnsel tegen, namelijk

*L = L' .k* zoals in (a) *en*

*L' = L.k* zoals in (b) Zoiets is alleen maar mogelijk als k =1.

Maar bedenkt dat *L = L' .k* alleen maar geldig is vanuit het stelsel *S*. En dat *L' = L..k* alleen maar geldig is gezien vanuit het standpunt van *S'*. De uitspraken zijn alleen geldig als ik me ofwel in het stelsel *S* bevind ofwel in het stelsel *S'.*

Speciaal heb ik hier wat langer blijven stilstaan, want dit inzicht vergaren is niet eenvoudig, en het kost tijd en veel moeite om wat er hier gebeurt te begrijpen. Maar eens dat men er mee akkoord is en kan aanvaarden dat wat hier gezegd wordt juist schijnt te zijn dan is de rest niets anders dan wat algebra.

Elimineren van *x* en *x'* gebeurt door (1) in (3) te brengen en (2) in (4)

(1) → (3) *k.c.t' = ( c- v ) t* (5)

(2) → (4) *k.c.t = (c + v ) t'* (6)

Elimineren van *t* en *t'* is eenvoudig door (5) X (6)

*k2.c2.t.t' = ( c – v )( c + v ) t.t'* ofwel *k2.c2 = c2 – v2*

Dit geeft uiteindelijk

$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Vullen we deze k waarde terug in (3) en (4) dan volgt hieruit

In (3)

$$k.x' = (c - v)t$$
$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} x' = ct - vt$$
$$x' = \frac{ct - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

in(4)

$$k.x = (c + v)t'$$
$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} x = ct' + vt'$$
$$x = \frac{ct' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

*x'* in functie van *x* en *t* noemt men de Lorenztransformatie daarentegen *x* in functie van *x'* en *t'* noemt men de Inverse-Lorentztransformatie.

Merk wel op het verschil tussen *x' = (x- v.t ) / k* en *x = (x'+ v.t') / k*.

Laten we dit nu eens toepassen op een stroom-voerende draad met lengte *L*. Noteer dat de lengte L kan gelijk welke afmeting hebben. Wat zich afspeelt op een draad met lengte 1m kan evengoed gebeuren op een stukje draad van 1 mm.

Vermits *Q =n.q.S.L,* met *n* het aantal elektronen per $m^3$, *q* de lading van een elektron en *S* de dwarsdoorsnede van de draad, zien we als om de een of andere reden *L* in waarde verandert ook *Q* met dezelfde evenredigheid verandert. Immers in een stukje stroomdraad veronderstellen we dat *n.q.S* niet veranderen.

Vermits *Q = I.t* en $t = L/v_d$ is $Q = I.L / v_d$ Indien we de stroom constant houden ( met een stroombron) zal ook de driftsnelheid $v_d$ constant zijn en hangt *Q* alleen evenredig af van *L*.

Men zou dus heel dat stukje draad kunnen bekijken alsof de draad beweegt met een snelheid $v_d$ waarin steeds dezelfde lading (of dezelfde aantal elektronen) zich bevinden.

We stellen ons twee frames of referentie vlakken voor, een stelsel *S* waar wij als normale waarnemer staan, dus onze wereld waarin we een stuk draad op afstand zien waarin elektronen zich bewegen, en een ander stelsel *S'* dat meebeweegt met de elektronen, dus met een driftsnelheid $v_d$ (om het algemeen te houden en gemakkelijker om te schrijven, zal ik van nu af aan *v* schrijven in plaats van $v_d$ ). Dit alles is zoals aangeduid in fig. xx.

De moeilijkheid is dat wij als waarnemer naar een stukje draad staan te kijken, maar omdat er beweging in zit kunnen we niet de juiste lengte $L_o$ zien. Maar als de elektronen stilstaan, wat we doen door met de elektronen mee te bewegen, dus in het stelsel *S'* kennen we dus de juiste afstand $L_o$ . Deze afstand is nu juist de Lorenz getransformeerde lengte *L'*.

Toepassing van deze formules geeft ons;

$$x'_1 = \frac{x_1 - v.t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad x'_2 = \frac{x_2 - v.t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = L_o$$

ofwel $L'.\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = L_s$ (1)

$$L'.k = L_s$$

Vermits $k = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ steeds kleiner is dan 1 zal dus de lengte *L* in het stelsel *S*, dus in de werkelijke wereld waarin we de draad waarnemen kleiner zijn.

We hebben nu wel bepaald de lengte *L'*, maar deze is gedefinieerd in het stelsel *S'*. Maar graag zou ik willen weten hoe groot deze waarde is in het *S* frame, waar ik als waarnemer sta.

Daarvoor gebruiken we de Lorenz formules met *x* in functie van *x'*.

$$x_1 = \frac{x'_1 + v.t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad x_2 = \frac{x'_2 + v.t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x_2 - x_1 = \frac{x'_2 + vt'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x'_1 + vt'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L_b = \frac{L'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

ofwel $L_b.\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = L'$ (2)

$$L_b.k = L'$$

Noteer dat *vt en vt'* precies tegenover elkaar wegvallen, maar dit komt omdat we aangenomen hebben dat de snelheid van de lengtes even snel waren, namelijk *v*. Indien ik de twee lijnstukken met een verschillende snelheid zo laten bewegen en dan nog in een verschillende richting, dan worden de formules wel iets ingewikkelder. Hier kom ik op terug als we de aantrekkingskracht bestuderen tussen een stroom-voerende draad en een kompas. Maar voor het bepalen van een inductie hebben we juist dat de stroom door de draad steeds dezelfde is, of anders gezegd de snelheid $v_d$ van de elektronen dezelfde is, en dat de ringen van een spoel als het ware parallel naast elkaar liggen.

Laten we eens proberen de lengte te bepalen in dat stuk draad $L_b$ waarin elektronen zich bewegen en dat vergelijken met de lengte $L_s$ een stukje draad waar geen stroom doorvloeit.

$$L_s - L_b = \frac{L'}{k} - L'.k$$

$$\Delta L = L'\left(\frac{1}{k} - k\right)$$

$$\Delta L = \frac{L'}{k}\left(1-k^2\right) \qquad (3)$$

$$\Delta L = L\left(1-1+\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta L = L\frac{v^2}{c^2}$$

Met toepassing van de formules gevonden met de Lorenztransformatie kunnen we dus zeggen dat het verschil in lengte $\Delta L$ dat waargenomen wordt uitsluitend doordat de elektronen in beweging zijn gelijk is aan de totale lengte van de stroom-voerende draad *L* vermenigvuldigd met $v^2 / c^2$.

Zo ook zal dit een $\Delta Q = n.e.S.\Delta L$ veroorzaken welke gelijk is aan:

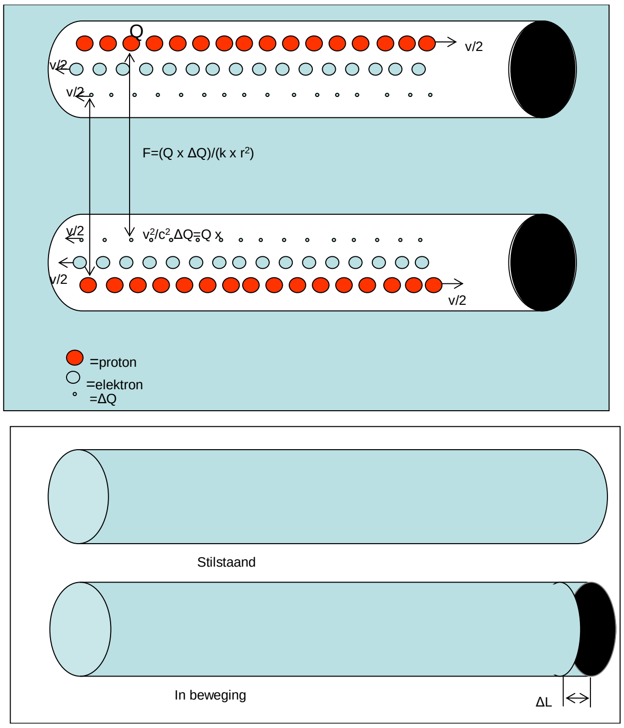
$n.e.S.L.v^2 / c^2 = Q.\ v^2 / c^2$.

Noteer dat het aantal protonen en elektronen in het stukje stroom-voerende draad nog altijd hetzelfde is. Er zijn nog altijd evenveel elektronen als protonen ( buiten een kleine spanning die we over de draad met zeer kleine weerstand nodig hebben om de elektronen te doen bewegen). Vergelijk dit met een grote buis met water die twee communicerende vaten verbindt. Zolang er geen waterverschil bestaat tussen de vaten zal er geen enkele druppel zich verplaatsen van het ene vat naar het andere, ook al is de buis geweldig groot. Maar eens er een waterverschil bestaat zullen de waterdruppels bewegen maar er komen evenveel waterdruppels bij in de buis als er buiten gaan. Het aantal druppels in de buis is gelijk gebleven.

Tot hiertoe de wiskundige benadering, maar hoe kunnen we ons dat fysisch voorstellen. Laten we daarom eens nagaan wat er gebeurt tussen twee stukken draad die parallel dicht naast elkaar liggen.

In ieder stuk draad zijn er evenveel vrije elektronen als er protonen. Er is dus evenveel negatieve lading (-Q) veroorzaakt door de som van alle vrije elektronen als positieve lading *(+Q)* veroorzaakt door de protonen waarvan hun uiterste schil niet volledig bezet is met elektronen. Deze twee ladingen neutraliseren zich met elkaar zodat voor een toeschouwer de draad overkomt als volledig zonder lading. Dus de twee parallelle draden trekken elkaar niet aan maar blijven rustig naast elkaar liggen.

Laten we nu door iedere draad een stroom( *I* ) vloeien,  in *dezelfde richting.*




**Figuur 8**

Er zal dus een extra kracht *F* optreden welke volgens de enige dogmatische formule die we aangenomen hebben gelijk is aan $F = \dfrac{Q.\Delta Q}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$

Hierin is *Q* de totale lading van de protonen in de draad of anders gezegd $Q = I \,.\, t = n.e.S.L$
En $\Delta Q = Q \,.\, v^2 / c^2$ is de extra negatieve lading gezien van de draad met de protonen naar de andere draad, waarin $v = v_d$ de driftsnelheid deze is ook gelijk aan $v_d = L / t$ met hierin *L* de totale lengte van de draad. *d,* daarentegen, is de afstand tussen de twee parallel liggende draden.

Hoe moeten we deze extra *ΔQ* voorstellen ?
Deze extra lading is een elektronen lading ( en dus een negatieve lading) natuurlijk evenredig verdeeld over de gehele lengte van de draad en is dus te beschouwen als  extra elektronen maar met een lading $Q.v^2 / c^2$ die er voor zorgen dat er in de draad een extra negatieve lading *ΔQ* ontstaat. Beide ladingen trekken elkaar aan volgens de gekende formule.

We kunnen dus het volgende afleiden:

$$F = \frac{Q.\Delta Q}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$$

$$F = \frac{Q.Q.\frac{v^2}{c^2}}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$$

$$\frac{F}{Q} = \frac{I.t.v^2}{4.\pi.\varepsilon.d^2.c^2}$$

$$\frac{F}{Q} = \frac{I.t.L^2}{4.\pi.\varepsilon.d^2.c^2.t^2}$$

$$\frac{F.d}{Q} = \frac{I.L^2}{4.\pi.\varepsilon.d.c^2.t}$$

Uit de Fysica weten we dat $\mu.\varepsilon = 1 / c^2$ of $\mu = 1 / \varepsilon.c^2$

En de definitie van spanning over de spoel is $V = \frac{F.d}{Q}$

Dit ingevuld geeft:

$$V = \frac{I}{t}.\frac{\mu.L^2}{4.\pi.d}$$

Dus de spanning veroorzaakt over twee parallel lopende draden is recht evenredig met het soort materiaal tussen de draden ( µ ) en de totale lengte van de draad in het kwadraat ( $L^2$ ) en omgekeerd evenredig met de afstand (*d* ) tussen de draden en een constante factor *( 4.µ )*.

Veronderstel nu eens dat we de twee draden ombuigen tot een ring en als hierboven allebei aansluiten op een stroombron in dezelfde richting. De formules die we gevonden hebben voor parallel lopende draden blijven gelden. Immers de draden blijven gelijk lopen en de krachten tussen de draden zullen hetzelfde blijven. *L* kan nu uitgedrukt worden in functie van de straal ofwel *L = 2.π.r* . We kunnen nog een stap verder gaan en het uiteinde van de ene draad aan het begin van de andere draad verbinden (immers de stroom door beide draden is toch dezelfde) En de totale lengte van de draad wordt nu *L= 2 x 2.π.r* . We kunnen dit uitbreiden tot N ringen naast elkaar zodat we een solenoïde bekomen, maar nu wordt *L= N.2.π.r*.

Vullen we dit nu in in onze gevonden formule dan bekomen we

$$V = \frac{I}{t}.\frac{\mu.L^2}{4.\pi.d}$$

$$V = \frac{I}{t}.\frac{\mu.(N.2.\pi.r)^2}{4.\pi.d}$$

Nu zijn $\frac{\mu.(N.2.\pi.r)^2}{4.\pi.d}$ allemaal materiaal constanten welke we *L* de inductie van een spoel noemen.
Voor de rest is de spanning *( V )* evenredig met *I / t* . We hebben dus de relatie gevonden tussen spanning, stroom en tijd ofwel

$$V = \mathrm{L}\frac{I}{t}$$
$$V = \mathrm{L}\frac{dI}{dt}$$

Meestal wordt in de formule de inductie anders geformuleerd.

Immers $\mathrm{L} = \frac{\mu.L^2}{4.\pi.d}$ kan ook anders geschreven worden als men ziet dat

$$L = N.2.\pi.r$$
$$L^2 = (N.2.\pi.r)^2$$
$$L^2 = N^2.4.\pi^2.r^2$$

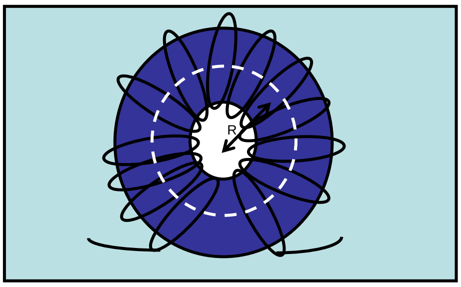
Zodat

$$\boxed{\begin{aligned} \mathrm{L} &= \frac{\mu.L^2}{4.\pi.d} \\ \mathrm{L} &= \frac{\mu.N^2.4.\pi^2.r^2}{4.\pi.d} \\ \mathrm{L} &= \frac{\mu.N^2.\pi.r^2}{d} \\ \mathrm{L} &= \frac{\mu.N^2.S}{d} \end{aligned}}$$

Hieruit blijkt dat de inductie recht evenredig is met het kwadraat van het aantal windingen en de oppervlakte van de doorsnede ( *S )* en omgekeerd evenredig met de lengte over het spoel (*d )* .

Voor een ringkern wordt *d* gelijk aan $d = 2.\pi.R$ waarin *R* de gemiddelde straal van de ringkern voorstelt en dan bekomen we dat $\mu.N^2.\frac{S}{2.\pi.R} = L$

De meeste fabrikanten van ringkernen maken het nog eenvoudiger en geven per soort ringkern een $A_L$ welke gelijk is aan $A_{L=} \frac{\mu.S}{2.\pi.R}$ zodat $L = A_L.N^2$ , en het aantal windingen *N* dat men moet wikkelen is dan eenvoudig te berekenen.




Figuur 9

Toch nog even een correctie. Het is namelijk zo dat voor een solenoïde niet alleen de naburige ringen elkaar aantrekken maar ook de verder verwijderde ringen hebben nog een invloed op de eerste ring. Daarentegen alle ringen die in het midden van de solenoïde staan worden evenveel aangetrokken door de ene zijde als de andere zijde. Deze krachten heffen elkaar dus op. Maar dat geldt niet voor de buitenste ringen. De formule tot hiertoe gevonden geldt dus alleen maar voor een oneindig lange solenoïde. Maar als de diameter van de ringen groter is dan de lengte van de spoel moeten we een correctie invoeren.

Deze correctie is meestal beter benaderd met een empirische formule, en voor een vrije solenoïde waarin $\frac{d}{l} < 2.5$, is deze benaderende formule ongeveer gelijk aan $L[\mu H] = \frac{\mu.(N.d)^2}{457,2.d + 1016.l}$
hierin is $d = doormeter$ en $l = lengte$ van de spoel uitgedrukt in *mm* en $\mu = \mu_r.\mu_\varepsilon$, en µ gelijk is aan 1 in de vrije natuur, dan wordt $L$ weergegeven in $[\mu H]$.

# 6. Voor de liefhebbers van de oude tijd.

## 6.1. De Wet van Coulomb

Vooreerst deze opmerking.

Als de draden onafhankelijk van elkaar zijn en doorlopen worden door een andere stroom dan ziet de formule er iets ingewikkelder uit. Voor twee willekeurige ladingen $Q_1$ en $Q_2$ die in verschillende richtingen met een snelheid $v_1$ en $v_2$ gaan geldt de volgende formule:

$$F = \frac{Q_1.Q_2.(1-\beta^2)(\vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \times \hat{r})}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d^2(1-\beta^2.\sin^2\theta)^{3/2}}$$ hierin is $\beta = \frac{v}{c}$. Men ziet als *v<<c* en $\vartheta$ = 90° de formule zich herleidt tot

$$F = \frac{Q_1.Q_2.(\vec{v}_1 \times \vec{v}_2)}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d^2}$$

Een beetje prutsen met wiskundige formules leert ons dat met

$$F = \frac{Q_1.\Delta Q_2}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$$
$$F = \frac{Q_1.Q_2.v_1.v_2}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d^2}$$

en met $\mu = \frac{1}{\varepsilon.c^2}$ de formule te splitsen is in

$$F = \frac{\mu}{\mu}\frac{\mu.Q_1.v_1.Q_2.v_2}{4.\pi.d^2}$$

$$F = \frac{\mu.Q_1.v_1 \times \mu.Q_2.v_2}{\mu.4.\pi.d^2}$$

noemen we nu $m_1 = \mu.Q_1.v_1$ en $m_2 = \mu.Q_2.v_2$

dan wordt $F = \frac{\mu.Q_1.v \times \mu.Q_2.v}{\mu.4.\pi.d^2}$ gelijk aan

$$\boxed{F = \frac{m_1 \times m_2}{\mu.4.\pi.d^2}}$$

wat een zeer gekende formule is voor de aantrekkingskracht tussen twee magneten.

#### 2.5.3.2 *BLI* en *Bqv* regel en de wet van Biot & Savart

Beginnen we terug met

$$F = \frac{Q.\Delta Q}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$$
$$F = \frac{Q.Q.v^2}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d^2}$$

en met $\mu = \frac{1}{\varepsilon.c^2}$ is de formule ook te splitsen in

$$F = \frac{Q.v \times \mu.Q.v}{4.\pi.d^2}$$ vermits *Q= I.t* en *v = L/t* volgt

$F = \frac{Q.v \times \mu.I.L}{4.\pi.d^2}$ en noemen we $B = \frac{\mu.I.L}{4.\pi.d^2}$ dan is

$\boxed{F = Q.v \times B}$ of ook $F = I.L \times B$ de overbekende BLI regel

Noteer dat $\boxed{B = \frac{\mu.I.L}{4.\pi.d^2}}$ niets anders is dan de wet van Biot &Savart. Maar probeer nu maar eens op een overzichtelijke manier de dimensies van $B$ te bepalen, en daarom hou ik niet van deze voorstelling. Ze voelt fysisch niks aan het is een louter wiskundig begrip zoals in een algebraïsche bewerking waarin men om wat eenvoudigere uitdrukkingen te bekomen men een groep bewerkingen gelijk stelt aan een willekeurig gekozen letter.

# 1. De zelfinductie

Beginnen we terug met

$$F = \frac{Q.\Delta Q}{4.\pi.\varepsilon.d^2}$$

$$F = \frac{Q.Q.v^2}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d^2}$$

Dan is de spanning over 1 ring gelijk aan

$F\frac{d}{Q} = V_{r1} = \frac{Q.v^2}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d}$ en over *N* ringen

$$V = \frac{N.Q.v^2}{4.\pi.\varepsilon.c^2.d}$$

$$V = \frac{\mu.N.Q.v^2}{4.\pi.d}$$

$$V = \frac{\mu.N.I.t.v^2}{4.\pi.d}$$

$V = \frac{\mu.N.I.t.l^2}{4.\pi.t^2.d}$ nu is *l* gelijk aan de volledige lengte ofwel is *l = N.2.µ.r* en dus

$$V = \frac{\mu.N.I.(N.2.\pi.r)^2}{4.\pi.t.d}$$

$V = \frac{\mu.N.N.I.\pi.r^2}{t.d}$ nu definieert men *B voor een solenoïde* $B_s = \frac{\mu.N.I}{d}$ en $\pi.r^2 = A$ dus wordt

$V = \frac{N.B.A}{t} = \frac{N.\Phi}{t} = \frac{N.d\Phi}{dt}$ houdt men hierbij nog rekening dat *Q* en *ΔQ* tegengesteld van teken zijn (*Q* is de lading van de protonen en *ΔQ* van de elektronen ) dan bekomen we de fameuze formule

$$\boxed{V = -\frac{N.d\Phi}{dt}}$$

Mijn visie hierop is als volgt samen te vatten.

Maxwell, Faraday, Oersted, Weber Biot en Savart en diensmeer zijn allemaal geleerden die geleefd hebben vooraleer de relativiteitstheorie van Einstein was gepubliceerd. Zelfs Maxwell was al tot de conclusie gekomen dat $\mu.\varepsilon = \frac{1}{c^2}$ en dat we dus geen twee onafhankelijke constanten nodig hadden.

Het is mijn vaste overtuiging dat vooraleer men de relativiteit theorie kende men genoodzaakt was, om de opgedane experimenten uit te leggen, een veldtheorie moest opbouwen, waarin het begrip "ether" een belangrijke rol in speelde, dat men kan voorstellen als een strak gespannen vlies (in twee dimensies) dat op en neer kan bewegen en dus de op en neergaande krachten ergens in het veld kan doen door rimpelen op een afstand van de bron. Maar sinds Einstein bewezen heeft dat magnetisme niets te maken heeft met het een of ander veld, maar uitsluitend met de relativiteit tussen het ene stelsel dat zich beweegt, en het andere dat stilstaat, is heel de veldtheorie waardeloos geworden. En toch blijft men in het onderwijs de zaken op zijn kop zetten. Men begint ons vol te proppen met een overbodige theorie van voor de tijd van Einstein om daarna als een aanhangsel te gaan verifiëren dat

*F = q( E + B.v)* met de relativiteitstheorie in overeenstemming is! Het is al meer dan genoeg dat we Volt, Ampère en Ohm hebben ingevoerd, zodat we ons zo min mogelijk moeten bezig houden met Tesla, Oersted, Henry, Weber, Elektrische en Magnetische velden en diens meer.

Maar als je zin hebt mag je steeds iedere keer je *F/q* tegenkomt *E* schrijven want *F/q = E* zool is *F/m = H* en *B=µ.H* en ten slotte *B.A=Φ.* Het invullen van de bijbehorende dimensies laat ik aan de liefhebbers over. Maar de grootste fout die hier steeds gemaakt wordt, is dat men appelen met citroenen optelt omdat geen leerling niet meer kan volgen met welk fruit hij bezig is.

De hierboven neergeschreven oplossing voor het vinden van de relatie tussen Inductie en spanning, stroom en tijd is volgens mij rechtuit rechtdoor vanuit de theorie van Einstein. Eenvoudig en duidelijk.

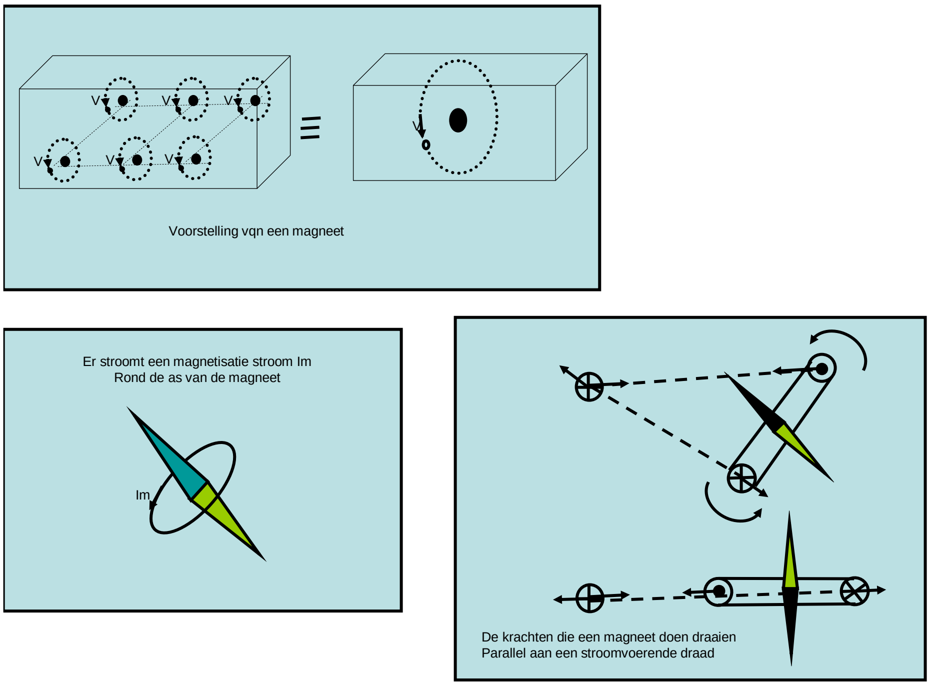
En toch begint ieder boek over magnetisme met de introductie van het magnetisch veld, dat dus niets vertelt, tenzij dat het punten verbindt waar de kracht op eenzelfde magneet in absolute waarde hetzelfde is. In de richting van een magnetische veldlijn is er geen enkele kracht werkzaam. Het is dan ook flauwe kul te beweren dat *H* evenredig is met de arbeid die men moet verrichten om een magneet rond te krijgen. Als de kracht gelijk is aan 0 dan is de arbeid *W=F.L* ook gelijk aan 0.

# 1. Het verhaaltje van de stroomdraad en de magneet.

In alle boeken wordt de proef beschreven van Ampère, waarin, onder invloed van een stroom voerende draad, een magneet in de nabije omgeving zich richt loodrecht op het vlak van de stroomdraad en evenwijdig aan de draad. Op het eerste zicht zou men verwachten dat er een kracht zou bestaan die de magneet zou draaien dusdanig dat ze zich zou richten naar de draad. Maar dit gebeurt niet. Hoe is dit te verklaren.

## 2. Waar zit het mysterie gebonden?

Magnetisme ontstaat *alleen* wanneer een lading in *beweging* is. Maar hoe zit dat met een magneet? Daar beweegt toch niets?




**Figuur 10**

Een magneet is in feite een serieschakeling van allemaal *gebonden* elektronen, die rondom het proton draaien en ( dit is belangrijk ) in dezelfde richting gekeerd staan.

Een magneet is dus, elektrostatisch gezien, volkomen neutraal. Er zijn evenveel protonen als elektronen die er rond draaien. Alle protonen zijn *q+* en alle elektronen *q-* . Bijvoorbeeld voor een ijzermolecule zijn er 15 protonen maar ook 15 elektronen.

Maar de 15 protonen staan stil in het rooster, de elektronen daarentegen draaien rond, en zijn dus *in beweging.*

Wanneer deze moleculen niet kriskras door elkaar staan (zoals in gewoon ijzer of koper) maar op een rijtje (zoals in bepaalde ijzer oxiden ) tellen ze hun magnetische krachten samen op. Of beter gezegd loopt er een gezamenlijke $I_m$ stroom (magnetisatiestroom ) rond de magneet. Deze is echter niet ( rechtstreeks ) te meten, omdat het een gebonden stroom is ( er zijn geen vrije elektronen).

Het is dus deze ronddraaiende magnetisatie stroom die ervoor zorgt dat er relativistisch een extra lading ontstaat.

Dus een magneet $M_1$ die een andere magneet $M_2$ aantrekt (en ook afstoot) is dus identiek hetzelfde als een solenoïde of een spoel, met dezelfde eigenschappen.

Er is dus wel degelijk een bewegende stroom

Laten we daarom een magneet eens voorstellen door een draad waarin een rondgaande stroom $I_m$ (De magnetisatie stroom) in ronddraait. Wanneer dit magneetje in de nabijheid ligt van een stroom-voerende draad zoals voorgesteld in figuur (xx) dan zien we aan de voorkant twee draden hebben waarin de stroom in dezelfde richting lopen, terwijl aan de andere kant de stromen in tegenovergestelde richting lopen.

Zolang deze magneet-draad niet loodrecht op de richting van de stroomdraad staat, ontstaan er magnetische krachten ($F_m$ ) die zoals we nu weten, als ze in dezelfde richting lopen dan trekken ze elkaar aan, als de stromen tegengesteld zijn dan stoten ze elkaar af.

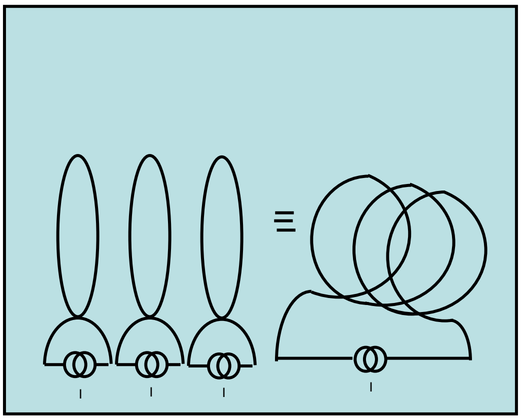
Dit veroorzaakt een koppel op de magneet-draad. Die de draad doet draaien. Wanneer de magneet-draad zo ver gedraaid is dat ze loodrecht op de stroom voerende draad staat zal er geen koppel meer plaats vinden die de naald nog verder doet draaien. Maar merk op dat er eigenlijk nog een kracht overblijft die, indien de magneet aan een dunnen draad opgehangen was, aangetrokken wordt door de stroom voerende draad !!!

We weten ook dat de magnetische kracht groter wordt als we de stroom voerende draad oprollen tot een solenoïde.

Dus twee solenoïdes waarvan de ene vastgemaakt is en de andere vrij opgehangen aan een zeer dunne draad zal deze laatste zich omdraaien totdat ze parallel ligt met de andere solenoïde, en dan zal de enen solenoïde aangetrokken worden door de vastgebonden solenoïde.

Hiermee is ineens aangetoond dat solenoïdes zich gedragen als magneten, en dus elkaar aantrekken of afstoten naargelang de stroom in dezelfde of in tegengestelde  richting stromen.  En vermits een magneet te vergelijken is met een solenoïde is meteen duidelijk waarom een magneet een andere magneet aantrekt.

Men kan ook tot dezelfde formule komen indien we een spoel vergelijken met een magneet, zodat twee naast elkaar staande in een cirkel gebogen draden zich precies gedragen als twee naast elkaar staande magneten die elkaar aantrekken.




**Figuur 11**

In het hoofdstuk “De wet van Coulomb” hebben we aangetoond dat twee magneten elkaar aantrekken (of stoten elkaar af) met een kracht (*F*) die recht evenredig is met de magnetische poolsterkten (*m*) en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand ($l^2$) tussen de poolpunten of in formule vorm:

$$F = \frac{m_1.m_2}{4.\mu.\pi.l^2}$$

waarin $m_1 = \mu.Q_1.v_1 = \mu.I.t.v = \mu.I.t.\frac{l}{t} = \mu.I_m.l$ en dat noemt men dan de magnetische poolsterkte. Hier spreken we niet meer van de driftsnelheid, maar wel van de snelheid van de elektronen rond de protonen. Deze snelheid is vrij hoog (ongeveer 1500 km/s, maar de lading van n elektronen in een magneet $Q = I.t$ is daarentegen zeer klein.

hierin is $\mu = \mu_0.\mu_r$ met $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ met de dimensies $[\frac{H}{m}]$

Proberen we nog eens een inzicht te krijgen van wat eigenlijk een magneet is. Een magneet is eigenlijk een soort metaal maar waarin het atoomrooster bestaande uit protonen en daarrond draaiende elektronenwolk die (bijna) allemaal in dezelfde richting staan. Nemen we als voorbeeld om het eenvoudig te houden dat het rooster bestaat uit één proton en daarrond circulerend, met een snelheid *v* , een elektron met lading *q*. Dan zal dit elektron een klein magnetisch moment veroorzaken $m_e = \mu.q.v.$ Wanneer verschillende van zulke elementen in een rij staan dan is de totale magneet van deze rij gelijk aan $\Sigma m_e = \Sigma\, \mu.q.\, v$ .

Ook als verschillende rijen naast elkaar staan dan ziet men dat inwendig de ladingen elkaar opheffen maar aan de buitenkant ontstaat er een circulerende lading *Q.* Vermits $Q=I.t$ kan men spreken van een  magnetische stroom. Noteer dat deze stroom niet te meten valt omdat zij ontstaan is uit de som van *gebonden* elektronen, terwijl een stroom alleen te meten valt als een transport van *vrije* dus niet gebonden elektronen.

Als dusdanig definiëren we de magneetpool *m* als zijnde de totale lading *Q* van de gebonden elektronen die rond de protonen draaien met een snelheid *v* en afhankelijk van een natuurconstante *µ* . Of in formulevorm. *m = µ.Q.v*

Dit lijkt zeer sterk op een cirkelvormige draad met straal *r* rond een week-ijzeren kern, waarin er een stroom *I* loopt, aan de rand van de kern, met een snelheid $v_d$ . Wanneer men verschillende (*N*) ringen achter elkaar zet dan mag ook hier het totale poolmoment opgeteld worden of *m = µ.N.Q.v*  en vermits *Q = I.t* en *v = d / t*  met *d = 2.π.r* de omtrek van de cirkel wordt *m = µ.N. I. d*.

Noteer dat er altijd een Noordpool en een Zuidpool is waarvan het magnetisme tegengesteld zijn of $m_n = - m_z$

Uitgaande van deze formulering kunnen we ook onze inductie bepalen. Immers

$$F = \frac{m_n.m_z}{\mu_0.\mu_r.4.\pi.l^2}$$

$$F = \frac{\mu.q.v \times (-)\mu.Q.v}{\mu.4.\pi.l^2}$$

$$F = \frac{-\mu.q.v \times \mu.I.d}{\mu.4.\pi.l^2}$$

met $v = \frac{d}{t}$ en $d = N.2.\pi.r$ volgt

$$\frac{F.l}{q} = -\mu.\frac{d}{t} \times \frac{I.d}{4.\pi.l}$$

$$F.\frac{l}{q} = -\mu.\frac{N.2.\pi.r}{t}.\frac{N.2.\pi.r.I}{4.\pi.l}$$

$$V = -\mu.(N.2.\pi.r)^2.\frac{I}{4.\pi.l.t}$$

Hierin zien we dat $(N.2.\pi.r)^2$ niets anders is dan de totale lengte van de draad in het kwadraat en *l* de lengte van het spoel. Noteer dat men hier consequent moet blijven door redeneren, en niet verwachten dat *l = de totale draadlengte,* wat in het geheel niet waar is. In *l* zit bijvoorbeeld ook in verwerkt de dikte van de draad en de spatie tussen de windingen waar we hier in het geheel geen rekening mee houden. Immers alhoewel de elektronen door de draad verdergaan met de driftsnelheid $v_d$ meten we de spanning over de lengte van de spoel.

We kunnen deze formule nog anders schrijven namelijk;

$$V = -\mu.\frac{N^2.4.\pi.\pi.r^2}{4.\pi.l}.\frac{I}{t}$$

$$V = -\mu.\frac{N^2.\pi.r^2}{l}.\frac{I}{t}$$

$$V = -\mu.\frac{N^2.S}{l}.\frac{I}{t}$$

Als we $\mu.N^2.\frac{S}{l} = L$ stellen dan bekomen we eindelijk dat

$L = \frac{V.t}{I}$ of in differentieel vorm $L = \frac{V.dt}{dI}$

Voor een ringkern wordt dit $\mu.N^2.\frac{S}{2.\pi.R} = L$ waarin R de gemiddelde straal van de ringkern voorstelt.

Dus een spoel is recht evenredig met het aantal windingen in het kwadraat en de doorsnede van de spoelkern, en omgekeerd evenredig met zijn lengte.

Noteer dat ik in heel mijn opbouw voor de netwerk relaties (V,I en t) geen enkele maal gebruik heb gemaakt van begrippen als *E* = Elektrisch Veld, *H* = Magnetisch veld en Φ =fluxdichtheid, met de daarbij behorende dimensies zoals Coulomb/meter, Tesla en Öersted en diens meer. Dit zijn voor mij altijd begrippen geweest waar ik me niet gezellig bij vond. Men vermoedt er een Ether achter, een zeker fluïdum dat eigenlijk niets zegt.

# 3. De Magnetische veldlijnen

We hebben gevonden uit de wet van Biot & Savart dat $B = \frac{\mu.I.L}{4.\pi.r^2}$ , en indien we *L* zouden opdelen in een reeks van kleine stukjes *dL* dan kunnen we schrijven in differentieelvorm dat $dB = \frac{\mu.I.dL}{4.\pi.r^2}$ maar hierin is verondersteld dat de afstand *d* loodrecht op de stroom *I* staat. Indien deze een hoek van *ϑ* maakt dan zal de formule worden $dB = \frac{\mu.I.dL.\sin\theta}{4.\pi.r^2}$

Laten we daarom, als in fig. xx, eens nagaan wat er gebeurt als het stukje *dL* niet loodrecht op de magneet *m* staat.

In de uitvergroting zien we dat

*dL = ab*

*dL sin ϑ = ac*

*dL cos ϑ = bc*

Nu is *ac ≈ r.dϑ* en dus *dL sin ϑ = r.dϑ* *(1)*

En *R = r.sin ϑ* dus *r = R / sin ϑ* *(2)*

Met (1) en (2) ingevuld in onze formule bekomen we

$$dB = \frac{\mu.I.dL.\sin\theta}{4.\pi.r^2} = \frac{\mu.I.r.d\theta}{4.\pi.r^2} = \frac{\mu.I.\sin\theta.d\theta}{4.\pi.R}$$

Integreren we dit tussen de grenzen *ϑ = 0 tot ϑ = π* met andere woorden als *ϑ* gelijk is aan 0 ligt *dL* op + ∞, en voor *ϑ = π* ligt *dL* op - ∞, of anders gezegd over een oneindig lange draad *L* waardoor de stroom *I* vloeit.

$$\int_0^{\pi} dB = B = \frac{\mu.I.\int_0^{\pi} \sin\theta.d\theta}{4.\pi.R} = \frac{\mu.I.\cos\theta_0^{\pi}}{4.\pi.R} = \frac{\mu.I.2}{4.\pi.R} = \frac{\mu.I}{2.\pi.R}$$

En met $B = \mu.H$ wordt $H = \dfrac{I}{2.\pi.R}$ en dit is dan de overbekende formule waar praktisch ieder schoolboek mee begint maar langs geen kanten kan uitleggen waarom dit zo is.

Begrijp me niet verkeerd, met de veld theorie *kan* men ook tot dezelfde resultaten komen maar ze is louter gebaseerd op de wiskunde namelijk op het vermenigvuldigen van vectoren. En dit is een onderdeel van de wiskunde die louter op abstractie berust maar geen fysisch verschijnsel uitlegt.

## Wat heb ik op school geleerd

Vermenigvuldigen van vectoren

Wat is $\vec{a} \times \vec{b}$ en stel dat $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)$ en $\vec{b} = (b_1, b_2, b_3)$

We zoeken het oppervlak tussen vector $\vec{a}$ en $\vec{b}$

Dan is $\vec{a} = a_1.x + a_2.y + a_3.z$ en $\vec{b} = b_1.x + b_2.y + b_3.z$ en

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_1.x + a_2.y + a_3.z)x\ (b_1.x + b_2.y + b_3.z)$$

$$\begin{aligned}
&\vec{a} \times \vec{b} \\
&= a_1.x \times b_1.x + a_1.x \times b_2.y + a_1.x \times .b_3.z \\
&+ a_2.x \times b_1.x + a_2.x \times b_2.y + a_2.x \times .b_3.z \\
&+ a_3.x \times b_1.x + a_3.x \times b_2.y + a_3.x \times .b_3.z
\end{aligned}$$

noteer dat *x.x* = |*x*|.|*x*| .*sinθ* maar *θ = 0* dus x.x = 0 , zo ook *, y.y = 0, z.z = 0*

maar *x.y* = |*x*|.|*y*|.*sinθ maar θ = 90° dus x.y = z, zo ook y.z = x, z.x = y*

maar ook *y.x = -z, z.y = -x, x.z = -y* vullen we dit in dan bekomen we

$$\begin{aligned}
&\vec{a} \times \vec{b} \\
&= a_1 \times b_2.(z) + a_1 \times .b_3.(-y) \\
&+ a_2 \times b_1.(-z) + a_2 \times .b_3.(x) \\
&+ a_3 \times b_1.(y) + a_3.x \times b_2.(-x)
\end{aligned}$$

ofwel

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_2.b_3 - a_3.b_2.).x + (a_3 \times b_1. - a_1.b_3).y + (a_1.b_2 - a_2.b_1).(z)$$

Ingeval $\vec{a} = (a_1, 0, 0)$ en $\vec{b} = (0, b_2, 0)$ wordt

$\vec{a} \times \vec{b} = (a_1.b_2).(z)$ en dat is dus een vector **<u>in de z-richting</u>** terwijl $(a_1.b_2)$ niets anders is dan de **<u>oppervlakte</u>** van de rechthoek gevormd door $a_1$ en $b_2$

Het is deze wiskundige interpretatie die verklaart waarom in de formule *F* een vector is die loodrecht staat op de vector *Q.v* en de vector *B* . Maar de fysische betekenis is volledig verloren. Immers die veldlijn *B* zegt niets anders dat deze lijn de punten verbindt waar de kracht even groot is.

## 4. Samenvatting

Een elektronisch circuit is een netwerk van elementen (Weerstanden (R), Capaciteiten (C) en spoelen of inducties (L)) die met elkaar verbonden zijn door geleidingen ( G ). De samenloop van zulke verbindingen zijn knooppunten. Het geheel is aangesloten op een Spanning (V) en hierdoor komt het dat er een stroom ( I ) vloeit door de verschillende componenten. Ieder element is gekenmerkt door een input en een output. Over het element kan een spanning gemeten worden en door ieder element kan een stroom vloeien welke kan veranderen in functie van de tijd (t).

De relaties tussen Spanning en stroom in functie van de tijd hebben we gevonden als zijnde:

$$R = \frac{V}{I}, \quad L = \frac{Vdt}{dI}, \quad C = \int \frac{Idt}{V} \text{ of } C = \int \frac{dQ}{V}$$

en daarmee kunnen we beginnen om over antennes te spreken.

Jan Spaenjers