R,C EN L

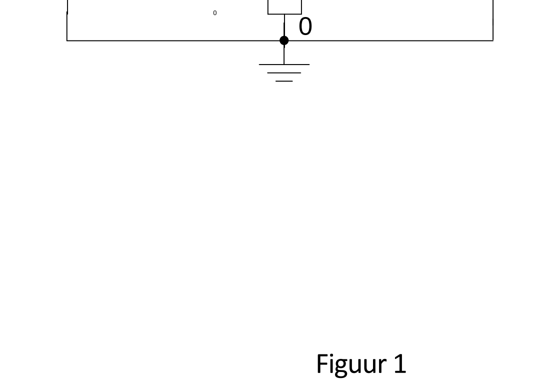
DEFINIEREN VAN R, C EN L

VAN FYSICA NAAR ELEKTRONICA

In de fysica onderzoekt men de eigenschappen van een element (Weerstand, capaciteit of inductie) vanuit het oogpunt van de natuurwetten, zoals lading en aantrekkingskracht van elektronen en protonen. Deze relatie van de elementen worden uitgedrukt in eenheden zoals kracht, arbeid, vermogen maar ook lading, spanning en stroom enz…

Maar zoals de natuur een samenloop van waterlopen met watervallen, pijpen, vaten en waterrad een netwerk vormen, zo ook zal in de elektronica een elektrisch circuit bestaande uit weerstanden, capaciteiten, spoelen en verbindingen, die doorlopen worden door stromen of waarover spanningen staan, ook een netwerk vormen.

Een netwerk bestaat uit elementen die met elkaar verbonden worden in knooppunten.(Bijna) ieder element heeft slechts één ingang aan een knooppunt en één uitgang aan een ander knooppunt, en ieder element is alleen gedefinieerd door de *spanningsval* over het element en de *stroom* door het element (gedurende een bepaalde *tijd*).



Figuur 1

Sommige elementen hebben echter meer knooppunten.

Een elektronische schakelaar bijvoorbeeld heeft drie knooppunten, namelijk één in- en één uitgang over de schakelaar en één stuuringang die bepaald of de schakelaar dan wel open of gesloten is.

In de elektronica zoekt men naar wetmatigheden (formules) die voldoen aan die drie parameters, namelijk een *stroom* door het element, de *spanning* over het element en dit in functie van de *tijd*.

Het is niet altijd eenvoudig om van de fysica te komen tot formules die maar alleen afhankelijk zijn van *stroom, spanning* en *tijd*. Overal zit er bijvoorbeeld ook de temperatuur afhankelijkheid in. Men weet immers dat elektronen sneller bewegen als de temperatuur stijgt. We zullen aannemen dat gedurende het proces, dat we onderzoeken, de temperatuur niet verandert.

Buiten **weerstand (R)**, **capaciteit (C)** en **inductantie (L)** is er ook nog de **geleiding (G)** door de koperdraad of bedrukte koperen bedrading, die de verschillende elementen met elkaar verbinden. Geleiding is in feite niets anders dan het omgekeerde van weerstand of anders uitgedrukt G = 1/R (Als de weerstand zeer klein is dan is de geleiding zeer goed). Als dusdanig kan geleiding en weerstand tegelijkertijd behandeld worden.

In ons schema wordt aangenomen dat de weerstand van de koperdraad verbindingen gelijk is aan 0 Ohm, of een oneindig goede geleiding, en wordt aldus niet in rekening gebracht.

Om een elektronisch circuit goed te kunnen begrijpen is het van belang te weten wat eigenlijk **Weerstand (R), Capaciteit (C)** en **Inductantie (L)** is, en hoe we vanuit de fysica komen tot relaties die alleen afhankelijk zijn van *stroom, spanning* en *tijd.*

Het is de bedoeling om uit de fysica de volgende netwerk formules te vinden:

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

De verschillende dimensies

Het is heel belangrijk dat steeds wordt nagegaan of de dimensies wel kloppen als we een formule neerschrijven. Algemeen wordt tegenwoordig het “kms” (kilogram, meter, seconde) systeem aangenomen. Vroeger was dit het “gms” (gram, meter, seconde) systeem. Maar niettegenstaande dat worden er nog veel andere eenheden gedefinieerd, maar die wel degelijk kunnen teruggebracht worden tot eenheden uitsluitend uitgedrukt in “kgs” eenheden. Alleen lading uitgedrukt in *(C)* blijft een moeilijk te definiëren begrip te zijn.

Noteer de verschillende dimensies; [*m] = meter, [s]=seconde, [t] = tijd, [N]=Newton*

Kracht F wordt uitgedrukt in [N] en 1N = 1kg.1m/1s^2

Lading Q wordt uitgedrukt in Coulomb [C].

Men spreekt van een lading van 1C als er tussen 2 puntladingen die beiden een gelijke lading bevatten er een afstotende kracht bestaat tussen deze ladingen welke gelijk is aan 9.10^9 *[N]. Dus als deze kracht gemeten wordt is de puntlading gelijk aan 1C.*

Stroom I = Q/t [C/s] wordt uitgedrukt in Ampère [A], *Spanning of potentiaal V[(N.m/C] wordt uitgedrukt in Volt [V]*

Weerstand R = V/I [V/A] wordt uitgedrukt in Ohm [Ω]

Capaciteit C = Q/V [C/V] wordt uitgedrukt in Farad [F]

Inductantie L = V.t/I [V.s / A] wordt uitgedrukt in Henry [H]

Noteer dat *C = Q/V = I.t/V = t/R en dus de dimensies heeft van [S]/[Ω]*

Zo ook is *L = V.t/I =R.t en dus de dimensies heeft van [S].Ω]*

Lading (Q), Stroom (I) en Spanning (V)

Wie dit al kent, of zo aanneemt of niet geïnteresseerd is wat eigenlijk de betekenis is van R, C en L kan, zonder iets te missen, direct verdergaan met **Hoofdstuk2**

Lading (Q)

Wat lading eigenlijk is, weet niemand. Het is een eigenschap van een elektron waarvan men aanneemt dat het een eigenschap heeft om een proton aan te trekken, of een ander elektron af te stoten.

Wel heeft men (experimenteel) kunnen aantonen dat tussen twee ladingen Q_1 en Q_2 er een kracht bestaat welke voldoet aan de volgende formule:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon r^2}. \quad [N] \qquad (1.1)$$

Dit is de wet van Coulomb.

Dit is het ***dogma*** van de elektronica, je neemt het aan voor waarheid en je geloofd erin, zonder dat iemand je kunt uitleggen wat het eigenlijk is.

(Noteer dat ook niemand eigenlijk weet wat kracht is. Ook hier heeft men experimenteel vastgesteld dat $F = m.a$, (hierin is $m = massa$ en $a = versnelling$), en ook dat $F = \frac{G.M_1.M_2}{r^2}$.(hierin is $M_x = Massa$ en $G =$ *algemene gravitatie constante* deze is gelijk aan $G = 6{,}6726 \times 10^{-11} [Nm^2 / kg^2]$).

(Noteer dat als er in formules natuurconstanten bijgesleurd worden men niet precies weet wat het eigenlijk is!!)

Maar wil men twee magneten uit elkaar houden dan ook heeft men een kracht nodig. Deze kracht heeft niets te maken met massa *m* noch met versnelling *a* en toch voelen we dat we een kracht nodig hebben. Dus

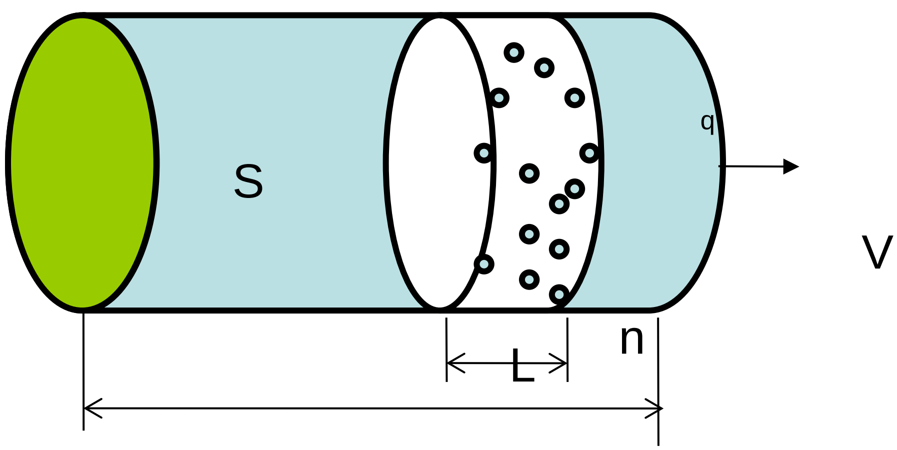
Newton heeft wel beschreven waaraan een kracht in bepaalde omstandigheden voldoet, een formule opgesteld, maar nergens uitgelegd wat kracht eigenlijk is. Maar alle onderwijzers hebben met volle overtuiging ons volgepropt met definities van kracht, en geen enkele heeft ooit durven bekennen:"Verontschuldig me, klasgenoten, maar ik versta het ook niet". Dit even tussen haakjes).

Men heeft willekeurig een elektron een negatieve lading toegewezen, en een proton een positieve lading. Zelfs hier is geen verklaring voor te vinden.

Lading **Q** is dan gedefinieerd als het totaal van vrije elektronen in een bepaalde media, (bv stukje koperdraad, of aluminiumplaatje,) elk met een eenheidslading **q**, de lading van een elektron.(soms ook wel **e** genoemd).

Dus een stukje koperdraad met een doorsnede oppervlakte *S* en lengte *L* heeft een volume *S.L*, en indien men weet hoeveel vrije elektronen *n* er zijn per eenheidsvolume elk met een lading van een elektron *q,* dan is de lading van dat stukje koperdraad gedefinieerd als:

$Q = n.q.S.L$	(1)



• Figuur 2

Maar wat betekent dit?

Als men weet dat de lading van één elektron *e = -1,602 x 10*$^{-19}$ *C*, dan volgt hieruit dat de elektrische lading van *1 Coulomb* overeenkomt met een te weinig elektronen (bij een positieve lading), of een teveel elektronen (bij een negatieve lading) van $\frac{1[C]}{1.602\times10^{-19}[C/elektron]} = 6.242\times10^{18}$ elektronen of 6.242.000.000.000.000.000 elektronen.

Men kan deze 1 Coulomb eigenlijk beschouwen als een hoop elektronen in een vat (bv. Een batterij) of ook nog het aantal te veel aan vrije elektronen die zich bevinden in een stukje koperdraad.

Stroom (I)

Stroom is de beweging van al de elektronen in een bepaalde richting gedurende een bepaald tijdsinterval. Als men bij een bepaalde doorsnede het aantal elektronen *n* telt die voorbijkomen gedurende een bepaalde tijd *t* elk met hun lading *q* dan kent men de stroom *I.* Met andere woorden

$$I = \frac{Q}{t} \qquad \left[\frac{C}{s}\right] = [A] \qquad (2)$$

Hieruit volgt ook dat $Q = I.t$ Dit kan voorgesteld worden als het aantal elektronen die, zich in een geleider in de tijd van 1 seconde, verplaatsen wanneer deze stroom van elektronen gelijk is aan 1 Ampère.

Dus als ik in een dwarsdoorsnede van een draad de elektronen tel die er gedurende 1 sec. Voorbijgekomen zijn dan weet ik hoeveel lading *Q* er gepasseerd is.

Hetzelfde kan gezegd worden van een batterij die gedurende 1 uur 0. 5 Ampère stroom kan leveren, vooraleer ze leeg is, dan heeft die batterij een capaciteit (lading *Q*) van *3600 Sec. X 0.5 Amp. = 1800 Coulomb.*

Als we nu (1) in (2) invullen bekomen we dat

$I = \frac{n.q.S.L}{t}$ en vermits $\frac{L}{t} = v_d$ wordt

$$I = n.q.S.v_d \qquad (1.2)$$

hierin is v_d de drift snelheid. Dit is de gemiddelde snelheid dat de elektronen zich verplaatsen in de koperdraad (of in de weerstand) onder invloed van de Spanning over de koperdraad (of de weerstand).

Spanning (V)

Spanning is de potentiele energie van een hoop elektronen in een stukje draad waarover de spanning staat. Dus over een afstand *L* van de draad.

Vermits energie gedefinieerd is als zijnde de kracht *F* maal de lengte *L* of $E = F.L$ dan is analoog aan deze formule Spanning *V* gedefinieerd als Energie per lading of

$$V = \frac{F.L}{q} \qquad \left[\frac{N.m}{C}\right]$$

Er is een grote begripsverwarring wanneer men spreekt over onze energie rekening die we moeten betalen. We betalen het verbruikt vermogen, of anders gezegd de verbruikte stroom (indien de spanning hetzelfde gebleven is). Maar de spanning van het net (240V) welke de potentiele energie is, analoog als een watertoren dat op een zekere hoogte een hoop water bevat, en als dusdanig een zekere potentie bevat om water te leveren, daarvoor moeten we niets betalen.

Chapter 1

Geleidbaarheid in een koperdraad

Het is de bedoeling om aan te tonen dat:

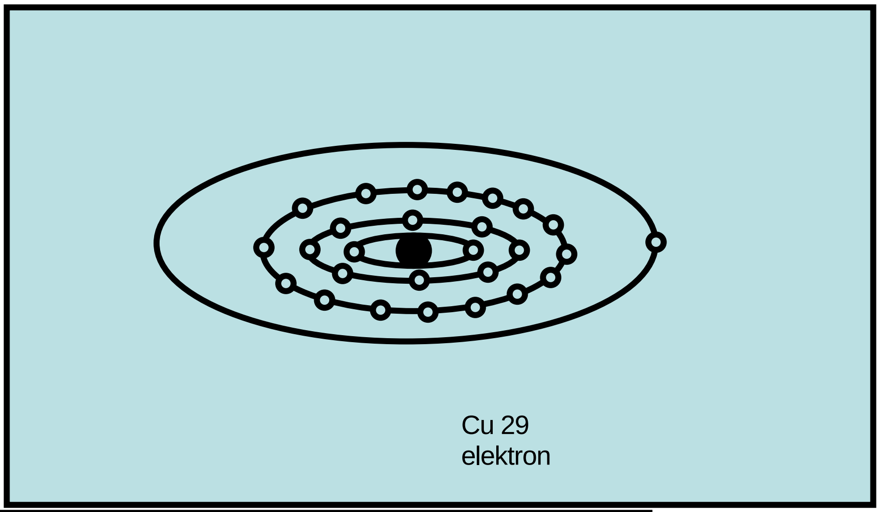
$$R = \frac{2.m}{nq^2.\tau} . \frac{L}{S} \qquad [\Omega]$$

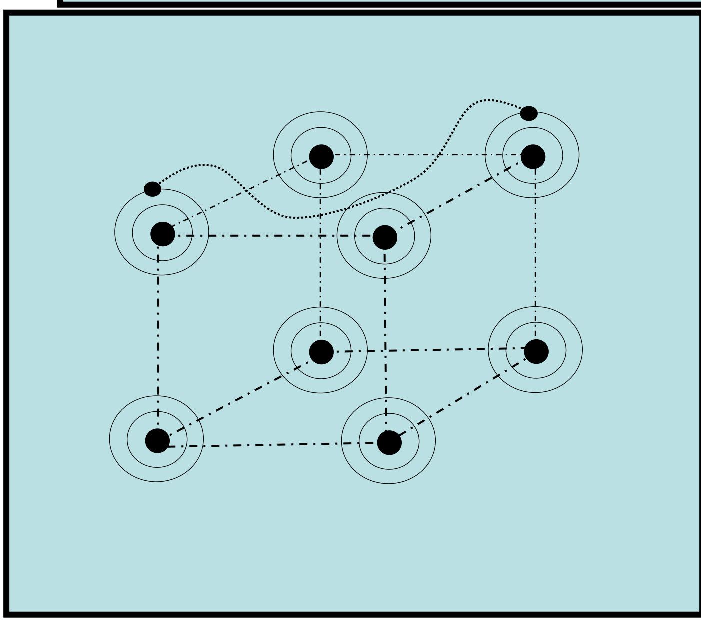
Hierin is:

m = massa elektron
τ = gemiddelde tijd een vrij elektron heeft in een rooster
n =aantal elektronen
q = lading van een elektron
L = lengte van de geleider
S = doorsnede van de geleider

Wat is een koperdraad, elektrisch bekeken?

In een koperdraad is de binding van de elektronen rond de atoomkern in de buitenste schil, (namelijk de valentieband) niet zeer sterk. Dit is de reden dat reeds door de omgevingstemperatuur er genoeg elektronen kunnen vrijgemaakt worden die zich vrij gemakkelijk, door de warmte kracht, kunnen bewegen in de een of andere richting in het kopermateriaal. Dit is dus wat men noemt de geleidbaarheid van koper, of misschien anders uitgedrukt de kleine weerstand die koper biedt ten opzichte van het transport van elektronen. Het aantal vrije elektronen/m3 is enorm groot en gelijk aan:
$n \approx 8.5 \times 10^{28}$ elektronen/m^3 Dit getal komt ongeveer overeen met het aantal koper-moleculen een stuk draad bevat. Of in andere woorden, men mag aannemen dat voor koper er per molecule (één proton + 29 elektronen) er één elektron bij is (het valentie elektron) dat zich kan vrijmaken.





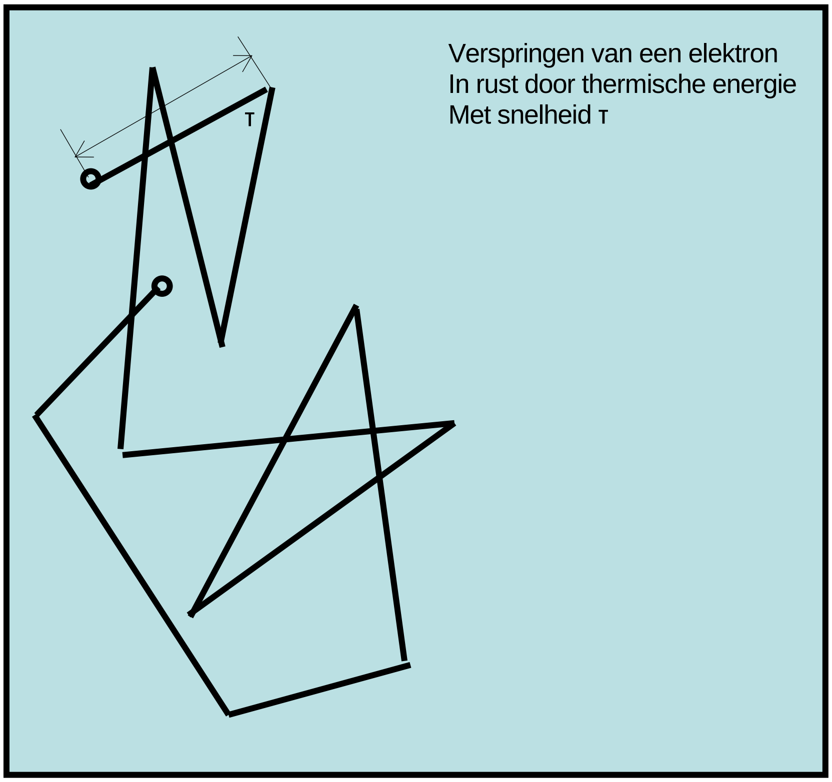
• Figuur 3

Een vrij elektron wordt onmiddellijk aangetrokken door een proton in de geburen dat ook een elektron verloren heeft op zijn buitenste schil. Met een tamelijk grote snelheid en versnelling verplaatst het elektron zich totdat het gevangen wordt in zijn nieuwe omgeving.

Dit gebeurt voortdurend in een kriskras beweging maar totaal beschouwd is er gemiddeld genomen geen elektronen verplaatsing naar boven of naar onder (maar misschien wel van links of naar rechts). De draad gedraagt zich voor de buitenwereld neutraal. Er komen geen elektronen bij of er verdwijnen geen elektronen in het beschouwde stukje draad.

Wanneer er echter een spanning aangelegd wordt over de uiteinden van de draad, dan zal onder invloed van deze spanning de elektronen meer de neiging vertonen om zich GEMMIDELD gezien meer naar de positieve kant (waar er een tekort is aan elektronen) te verplaatsen. Deze gemiddelde snelheid is, verbazingwekkend genoeg, niet erg groot. In een draad met doorsnede van 1 mm^2 waarin een stroom vloeit van 1 Ampère is deze minder dan 1 mm per seconde!

Noteer dat er wel degelijk een spanningsverschil bestaat over een stuk koperdraad (ook al is deze spanning zeer klein door de grote geleidbaarheid van koper). Vergelijk dit met een grote waterbuis. Zolang er geen waterniveau verschil bestaat tussen de ingang en de uitgang van de waterbuis zal er geen druppel water zich verplaatsen van het ene niveau naar het andere.



• Figuur 4

Wat is de snelheid van de elektronen stroom in een koperdraad?

Proberen we nu even uit te rekenen wat de snelheid (v_d) is van deze elektronen wanneer we een koperen draad hebben met een doorsnede van 1 mm^2 waarin een stroom vloeit van 1 Ampère.

De afstand (*L*) dat een elektron aflegt in een bepaalde tijd (t) is gelijk aan:

$L= v.t$ (als men 10 km/u fiets gedurende 2 u dan is de afstand 10km/u x 2u = 20 km).

Het aantal elektronen in de volume O, welke gelijk is aan *L.S,* is dan *n.L.S* en met $L = v_d.t$ wordt dit $n.v_d.t.S$ hierin is n het aantal elektronen/volume zoals hierboven gedefinieerd.

De lading van 1 elektron is $q = e$*,* en deze lading heeft een waarde van:

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb (Coulomb is de eenheid van lading)

De totale lading (Q) is dan $Q = q.n.v_d.t.S$

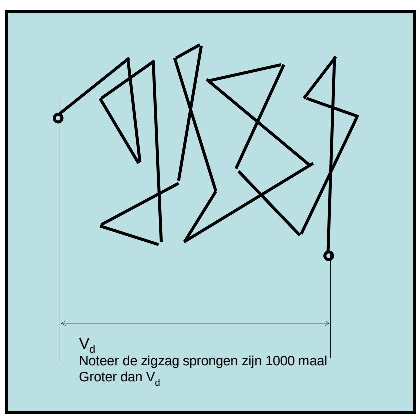
Nu is de definitie van stroom niets anders dan de lading / tijdseenheid (Hoeveel elektronen passeren er hier voorbij per sec) of anders uitgedrukt $I = Q / t$ en dus $I = Q / t = q.n.v_d.S.$ En dus kunnen we de snelheid bepalen als $v_d = I / q.n.S$

Vullen we de gekende cijfers in dan bekomen we

V_d = 1 Amp / (1.6 x 10^{-19} C)(8.5 X 10^{28})(1 x 10^{-6} m^2) = 7.440 x 10^{-4} m/s

ofwel 0.744 mm / sec, dit is zelfs trager dan een luie slak. Hoe is zoiets te verklaren, als men weet dat een elektron in de vrije ruimte tegen een snelheid van bijna 300.000 km/s raast?

Juist zoals in een watervat waarvan men onderaan de kraan opendraait, zal het ook nog een tijdje duren vooraleer de waterdruppels van boven in het vat naar onder gezakt zijn. Zo ook onder invloed van de spanning over de draad, zullen de elektronen aan het uiteinde van de draad eerst naar de negatieve kant van de Spanningsbron vloeien, en al de elektronen in de draad schuiven op. Vermits er zoveel vrije elektronen aanwezig zijn per mm^3 zal de opschuiving traag verlopen, maar het effect dat er stroom vloeit naar de spanningsbron is (bijna) onmiddellijk zichtbaar.



- Figuur 5

Wat is de weerstand van een geleider (bv koperdraad)?

Vrije elektronen in een koperdraad, wanneer er geen spanningsverschil bestaat over de lengte van de draad, en aldus er geen stroom vloeit door de draad, ontstaan door de warmte van de omgeving. Deze vrije elektronen springen in een willekeurige richting van het ene atoom naar een ander, waar ze in botsing komen met andere elektronen en al zo tot stilstand komen of een gedeelte van hun bewegingsenergie afgeven. Maar globaal gezien blijven de elektronen min of meer in het zelfde stukje draad. Wanneer er echter een spanning V aangelegd wordt over het stukje draad dan zullen de elektronen niet meer in een willekeurige richting met elkaar in contact komen maar wel geneigd zijn in een bepaalde richting (van een lagere spanning naar een hogere spanning) te bewegen onder de invloed van de spanning over de draad.

Men kan dus veronderstellen dat *gemiddeld* genomen een elektron in horizontale richtingen zekere *gemiddelde* afstand van A naar B aflegt (zij deze afstand gelijk aan x), in een bepaalde tijd τ maar, en dit is belangrijk, in *diezelfde tijd (τ)* onder invloed van de spanning V zal dit elektron in verticale richting een stukje afstand van B naar C hebben afgelegd (zij deze afstand gelijk aan y).

Wat heb ik op school geleerd?

$$a = \frac{dv}{dt}$$
$$a.dt = dv$$
$$\int a.dt = \int dv$$

a = versnelling, v= snelheid, l is afgelegde weg

Als *a* een constante is dan is

$$a.t = v$$

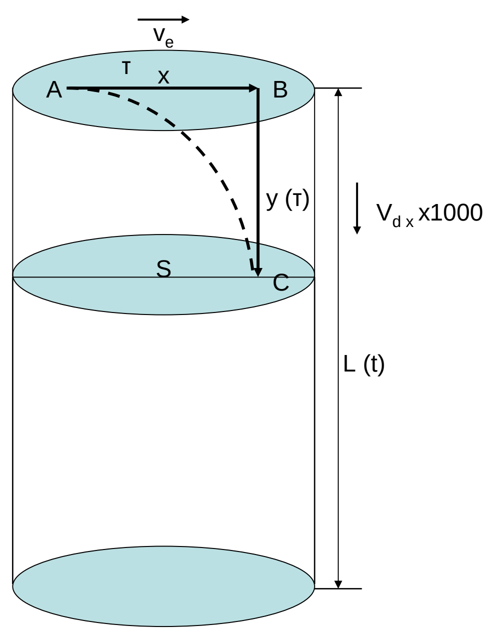
$$v = \frac{dl}{dt}$$
$$dl = v.dt$$
$$dl = at.dt$$

Nu is $\int dl = \int at.dt$

$$l = a.\frac{1}{2}.t^2$$
$$\frac{l}{t} = v = \frac{1}{2}.a.t$$

Zo ook is de kinetische energie af te leiden als volgt

$$F = m.a$$
$$F.dl = m.a.dl$$
$$dE = m.\frac{dv}{dt}.dl$$
$$dE = m.v.dv$$
$$\int dE = m\int v.dv$$
$$E = \frac{1}{2}.m.v^2$$



• Figuur 6

We weten dat $F = m.a$ (1) en de definitie van spanning is $V = \frac{F.L}{q}$ hieruit volgt dat $F = \frac{V.q}{L}$ (2)

Uit (1) en (2) volgt dat

$$a = \frac{V.q}{m.L} \qquad (3)$$

Nu is de afstand dat het elektron gemiddeld in horizontale richting aflegt, door de thermische beweging, gelijk aan $x = v_e.t$ maar $v_e = \frac{x}{\tau}$ ofwel $t = \tau$ (4)

Maar ook $\frac{y}{\tau} = v_d = \frac{1}{2}.a.\tau$ Merk op dat *x* vele malen (meer dan 1000 maal) groter is dan *y*. Daarom, voor de duidelijkheid, is de schaal langs de Y-as 1000 maal groter dan deze langs de X-as.

En *a* uit (3) ingevuld geeft $v_d = \frac{1}{2}.\frac{V.q}{m.L}.\tau$

Hieruit halen we dat

$$V = \frac{v_d.2.m.L}{q.\tau} \quad (5)$$

Volgens formule (1.2) is $I = n.q.S.v_d$ (6)

Delen we (5) door (6) dan bekomen we:

$$\frac{V}{I} = \frac{2.m.L.v_d}{n.q.q.S.\tau.v_d}$$

$$\frac{V}{I} = \frac{2.m.L}{n.q^2.S.\tau}$$

als

$$R = \frac{2.m.L}{n.q^2.S.\tau}$$

dan is

$$\boxed{\frac{V}{I} = R = \frac{2.m.L}{n.q^2.S.\tau} \qquad [\Omega]}$$

wat me de gewenste relatie oplevert tussen weerstand, spanning en stroom.

De eenheid van Weerstand is Ohm [Ω]

Meestal bepaald men de Weerstand per meter of R/L = ρ en dan wordt

$$\rho = \frac{2.m}{n.q^2.S.\tau}$$

Of ook nog anders geschreven, vermits $x = \frac{v_e}{\tau}$

$$\rho = \frac{2.m.v_e}{n.q^2.S.x}$$

Hierin is nog altijd τ de gemiddelde tijd vooraleer een vrij elektron terug opgeslorpt wordt door een ander proton.

(Noteer dat de gemiddelde snelheid van het elektron gelijk is aan $v_e = \frac{x}{\tau}$, en dus de gemiddelde afstand een vrij elektron in een koperdraad aflegt gelijk is aan $x = v_e.\tau$. In een volgende paragraaf gaan we hiermee verder.

Wat belangrijk is in de formule dat de weerstand recht evenredig is met de lengte (L). Hoe langer de draad hoe meer weerstand. En omgekeerd evenredig is met het aantal vrije elektronen per m^3 (n), ofwel hoe meer vrije elektronen er zijn des te minder weerstand de geleider heeft, en ook omgekeerd evenredig met de doorsnede (S) van de geleider, ofwel hoe dikker de draad des te minder is de weerstand.

τ of beter nog 1/τ is temperatuur afhankelijk, immers als de temperatuur stijgt dan zal de snelheid van de elektronen (v_e) verhogen en dus de tijd vooraleer een elektron weer in een ander rooster tot stilstand komt verminderen. Hierdoor zal dus de weerstand verhogen.

En voor de rest is het afhankelijk van constante waarden zoals m en q.

Omdat in koper het aantal n zeer groot is komen we tot de conclusie dat de weerstand zeer klein is of anders gezegd, de geleiding zeer goed is.

Het verschil tussen een element met kleine weerstand en een met grote weerstand is dus voornamelijk afhankelijk van n. Een weerstand wordt dus voornamelijk bepaald door het materiaal dat men gebruikt. (bv Koolstof, of andere metaaloxides hebben veel minder vrije elektronen dan koper)

Wat is de werkelijke snelheid van een elektron in een geleider?

Uit de fysica weet men dat de energie die nodig is om een elektron uit zijn rooster te onttrekken gelijk is aan 7.04 eV. Dat is dus ook de energie dat het elektron meegegeven krijgt bij zijn aanvang als vrij elektron in het rooster.

Nu is (zie wat heb ik op school geleerd) $E = \frac{1}{2}.m.v^2$ Hieruit volgt dat $v = \sqrt{\frac{2.E}{m}}$

Wanneer men weet dat 1 eV = 1.6×10^{-19}J en de massa van een elektron m=9.11×10^{-31}kg dan wordt

$v_e = \sqrt{\frac{2 \times 7.04 \times 1.6 \times 10^{-19} J}{9.11 \times 10^{-31} kg}} = 1.57 \times 10^6 m/s$ of 1570 km/s.

En dit is dan toch wel een behoorlijke snelheid.

En wat is de gemiddelde lengte dat een elektron aflegt?

Uit de formule $\rho = \frac{2.m.v_e}{n.q^2.S.x}$ halen we dat $x = \frac{2.m.v_e}{n.q^2.\rho}$

Wanneer men weet dat de weerstand per meter in koper gelijk is aan 1.72 x 10^{-8} Ohm dan is de afstand x van een vrij elektron gemiddeld genomen gelijk is aan

$$x = \frac{2\times(9.11\times10^{-8}kg)(1.57\times10^{6}m/s)}{(8.48\times10^{28}e/m^{3})(1.6\times10^{-19}C/e)(1.78\times10^{-8}\Omega)} = 76.6nm$$

Wanneer men weet dat de ionen in een koperrooster op 0.26nm van elkaar staan dan passeert gemiddeld genomen een elektron 766/0.26 = 295 ionen vooraleer terug opgenomen te worden bij een ander proton.

Chapter 2

Wat is een Capaciteit of een Condensator?

Het is de bedoeling om aan te tonen dat

$$C = \frac{A.\varepsilon_0.\varepsilon_r}{d}$$

Hierin is

A oppervlakte van een schijf of plaat

d is de afstand tussen de platen

$\varepsilon = \varepsilon_0.\varepsilon_r$ een dilectrische constante die voor lucht gelijk is aan $\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}(F/m)$

Wat heb ik op school geleerd?

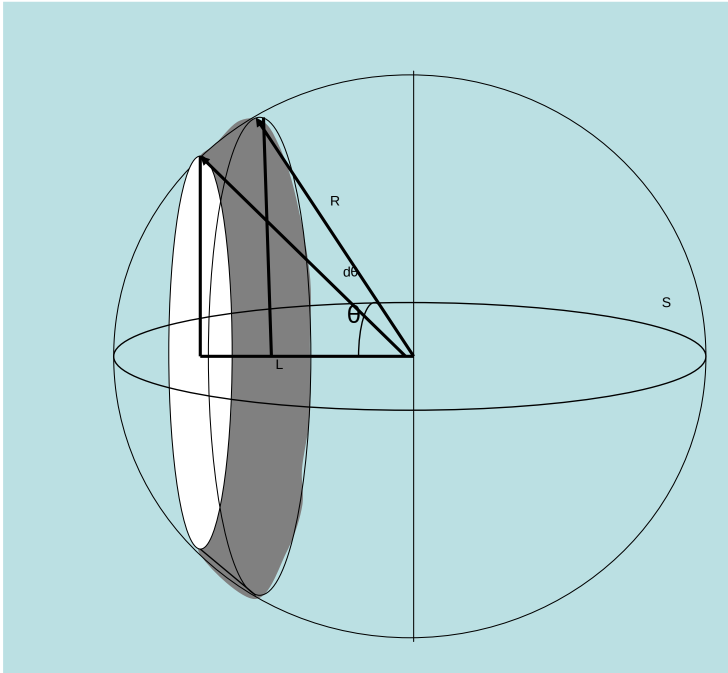
De oppervlakte van een bol kan men als volgt vinden.

Zoekt men eerst de oppervlakte van een schil, deze is $ds.2.\pi.L$

Nu weten we dat $ds = R.d\theta$ uit de figuur zien we ook dat $L = R.\sin\theta$

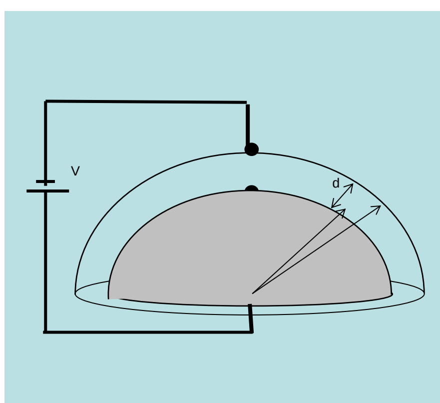
Integreren we deze schil met θ van 0 tot 2π dan bekomen we de oppervlakte van de bol

$$Opp = \int_0^{\pi} 2.\pi.R\sin\theta.R.d\theta = 2.\pi.R^2.(1-(-1)) = 4.\pi.R^2$$

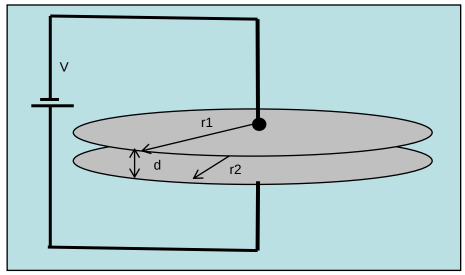


• Figuur 7

Uit de wet van Coulomb $F = \dfrac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon . r^2}$ halen we $\dfrac{F.dr}{q} = \dfrac{Q.dr}{4\pi\varepsilon . r^2}$ ofwel $dV = \dfrac{Q.dr}{4\pi\varepsilon . r^2}$



• Figuur 8



• Figuur 9

Noteer dat $4\pi.r^2$ gelijk is aan de oppervlakte van een bol. Het is dus op te vatten dat al de lading Q die geconcentreerd was als een puntlading in het centrum van de bol, op een afstand r zijn lading verspreidt over de boloppervlakte met straal gelijk aan r. Het is evident dat de oppervlakte van een halve bol dus gelijk is aan *2.π.r²* .

Als ik nu de spanning wil bepalen tussen een halve bol met straal r_1 en één met straal r_2 dan kan ik dit doen door de integraal te nemen tussen de grenzen r_1 en r_2.

Ofwel $\int_{r1}^{r2} dV = \int_{r1}^{r2} \frac{Q.dr}{2\pi\varepsilon r^2} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon}.\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$

Dus $V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon}\left(\frac{r_2 - r_1}{r_1.r_2}\right)$ als $r_2 - r_1 = d$ en als we er voor zorgen dat r >>d dan wordt

$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon}\left(\frac{d}{r^2}\right)$$

Ofwel $\frac{Q}{V} = \frac{2\pi.r^2.\varepsilon}{d}$

Men kan eenvoudig inzien dat als men de twee halve bollen zou plat drukken dan zal zonder een grote fout te maken

$\frac{Q}{V} = \frac{2\pi.r^2.\varepsilon}{d} = \frac{A.\varepsilon}{d}$ Hierin is A de oppervlakte van het platgedrukte boloppervlak.

Noteer wel dat de platen dicht bij elkaar moeten staan opdat de formule geldig blijft.

Als er een ander materiaal dan lucht tussen de platen zou zitten dan wordt

$\frac{Q}{V} = \frac{A.\varepsilon_0.\varepsilon_r}{d}$ En vermits $Q = I.t$ kan ik ook schrijven $\frac{I.t}{V} = \frac{A.\varepsilon_0.\varepsilon_r}{d}$ of in integraal vorm $\int \frac{I.dt}{V} = \frac{A.\varepsilon_0.\varepsilon_r}{d}$ en als

$$\boxed{C = \frac{A.\varepsilon_0.\varepsilon_r}{d}}$$

Dan volgt

$C = \int \frac{I.dt}{V}$ Ofwel $C = \int \frac{dQ}{V}$ $\left[\frac{C}{V}\right]$

Wat de gewenste relatie oplevert, namelijk de relatie tussen Capaciteit, stroom, spanning en tijd.

De eenheid van Capaciteit is de Farad [*F*].

Voor een vlakke condensator is de capaciteit dus recht evenredig met de oppervlakte van de platen waarover de spanning staat en omgekeerd evenredig met de afstand die de platen van elkaar scheidt. Ze is ook nog afhankelijk van het soort materiaal dat er tussen de platen zit (ε_r) en een constante factor (ε_0).

Chapter 3

Wat is een Inductantie 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 hetgeen 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

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

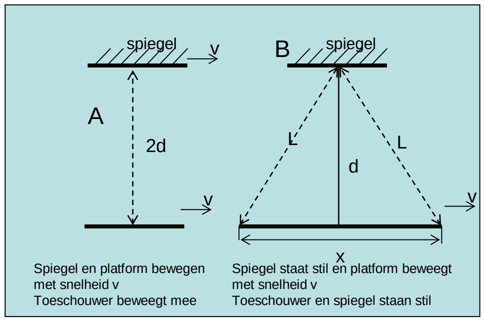
Wat een behoorlijk getal is en een aanzienlijke kracht kan uitoefenen.

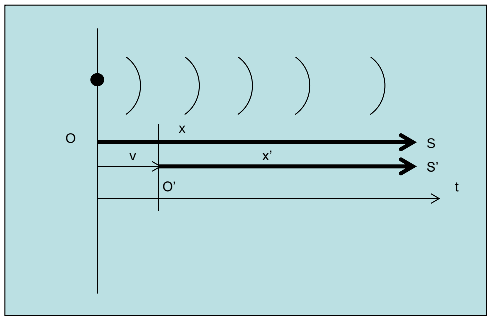
Maar vooraleer we verder gaan, gaan we eerst trachten te bewijzen waarom $\Delta L = L_0 \dfrac{v^2}{c^2}$.

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

Wat heb ik op school geleerd?

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





• Figuur 10

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.

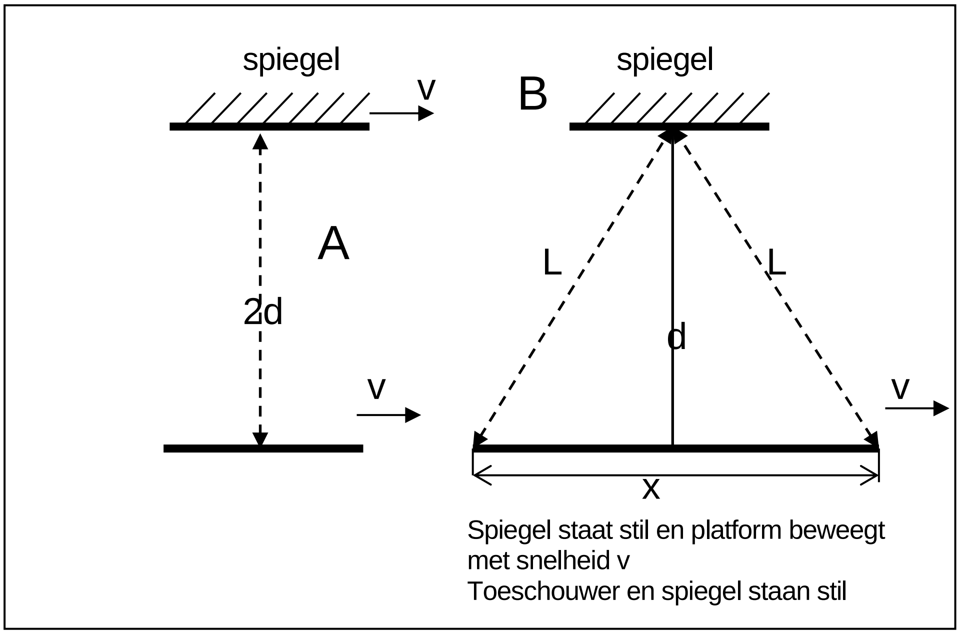
Dit is het *dogma* van de relativiteit.

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 wat 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 11

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 Figuur 11) 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 . t ' (1)

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

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

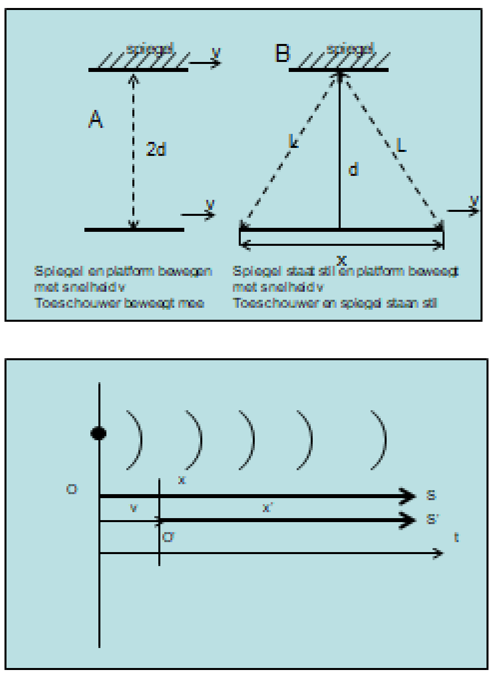
Laten we dit nu eens toepassen op een stroomvoerende draad met lengte *L*. Noteer dat de lengte L kan gelijk welke afmeting hebben. Wat zich afspeelt op een draad met lengte 1m kan evengoed gebeuren op een stukje draad van 1 mm.

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 Figuur 12.



• Figuur 12

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;

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

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

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

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 stroomvoerende draad en een kompas. Maar voor het bepalen van een inductantie 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 Lorenz transformatie kunnen we dus zeggen dat het verschil in lengte ΔL dat waargenomen wordt uitsluitend doordat de elektronen in beweging zijn gelijk is aan de totale lengte van de stroomvoerende 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:

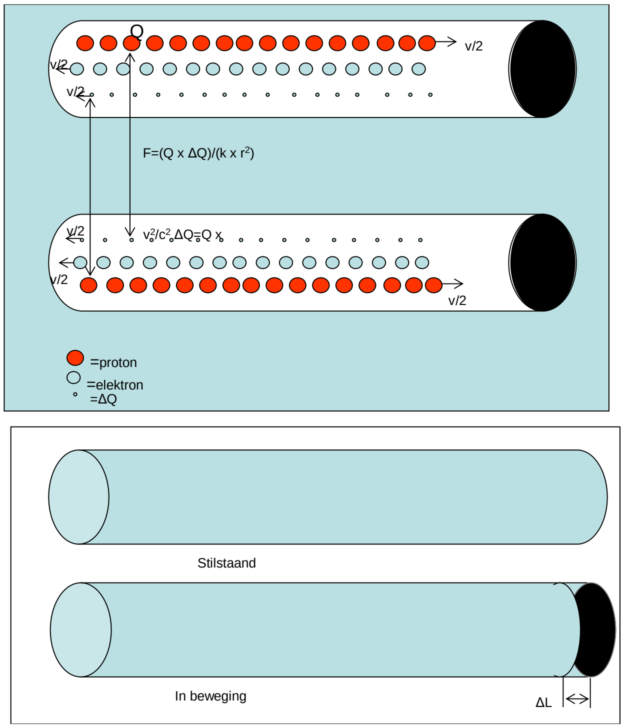
$n.e.S.L.v^2 / c^2 = Q.\ v^2 / c^2$.

Noteer dat het aantal protonen en elektronen in het stukje stroomvoerende 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 13

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 $L = 2.\pi.r.$ 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 $L= 2 \times 2.\pi.r.$ We kunnen dit uitbreiden tot N ringen naast elkaar zodat we een solenoïde bekomen, maar nu wordt $L= N.2.\pi.r$.

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 inductantie 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 inductantie anders geformuleerd.

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

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

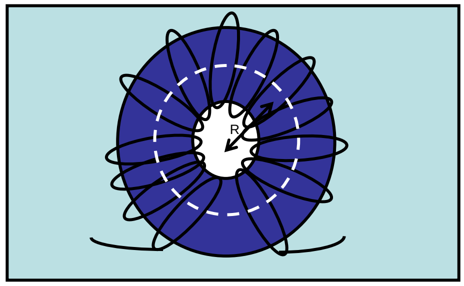
Zodat

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

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 14

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 betert 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 $\mu = \mu_r.\mu_\varepsilon$ gelijk is aan 1 in de vrije natuur, dan wordt L weergegeven in $\left[\mu H\right]$.

==

Voor de liefhebbers van de oude tijd.

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 ϑ = 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.

De *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 $\mu = \dfrac{1}{\varepsilon . c^2}$ 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 $B = \dfrac{\mu.I.L}{4.\pi.d^2}$ dan is

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

Noteer dat $\boxed{B = \dfrac{\mu.I.L}{4.\pi.d^2}}$ 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.

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, (en het elektron bekend was). 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 men 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* zo ook is *F/m = H* en *B=µ.H* en tenslotte *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 Inductantie 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.

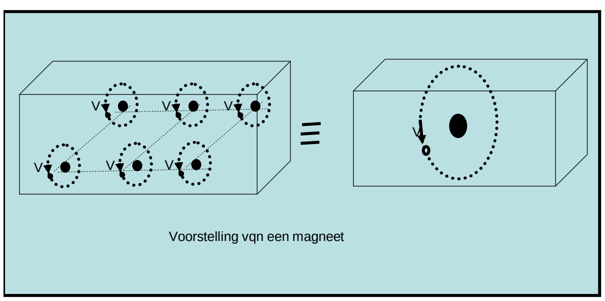
Het verhaaltje van de stroomdraad

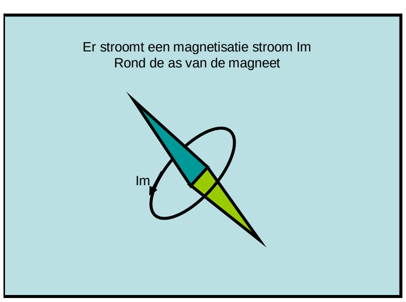
en de magneet.

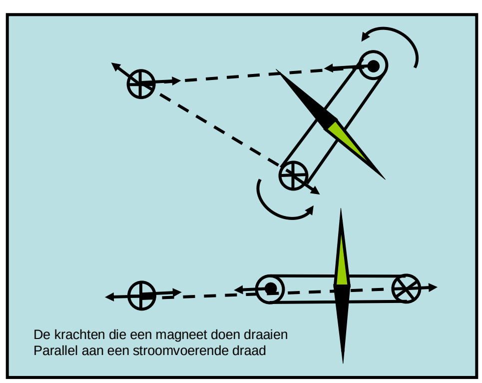
In alle boeken wordt de proef beschreven van Ampère, waarin, onder invloed van een stroomvoerende draad, een magneet in de nabije omgeving zich richt loodrecht op het vlak van de stroomdraad en evenwijdig aan de draad. Op het eerste zicht zou men verwachten dat er een kracht zou bestaan die de magneet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

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 15

Een magneet is in feite een serieschakeling van allemaal ***gebonden*** elektronen, die rondom de 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 gezamenlijk een 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 stroomvoerende 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.

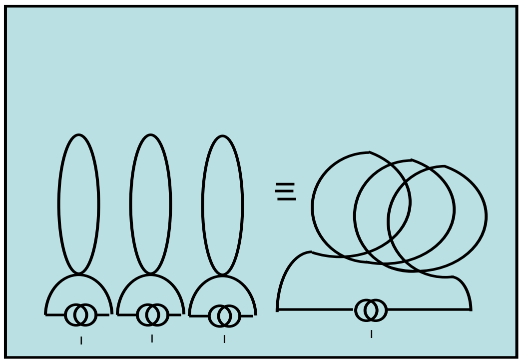
Dit veroorzaakt een koppel op de magneet-draad. Die de draad doet draaien. Wanneer de magneet-draad zo ver gedraaid is dat ze loodrecht op de stroomvoerende draad staat zal er geen koppel meer plaats vinden die de naald nog verder doet draaien. Maar merk op dat er eigenlijk nog een kracht overblijft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

We weten ook dat de magnetische kracht groter wordt als we de stroomvoerende 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 16

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 $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ en 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. $m = \mu.Q.v$

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 $m = \mu.N.Q.v$ en vermits $Q = I.t$ en $v = d / t$ met $d = 2.\pi.r$ de omtrek van de cirkel wordt $m = \mu.N.\ I.\ d$.

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 inductantie 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 $v = \dfrac{d}{t}$ 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 hoewel 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.

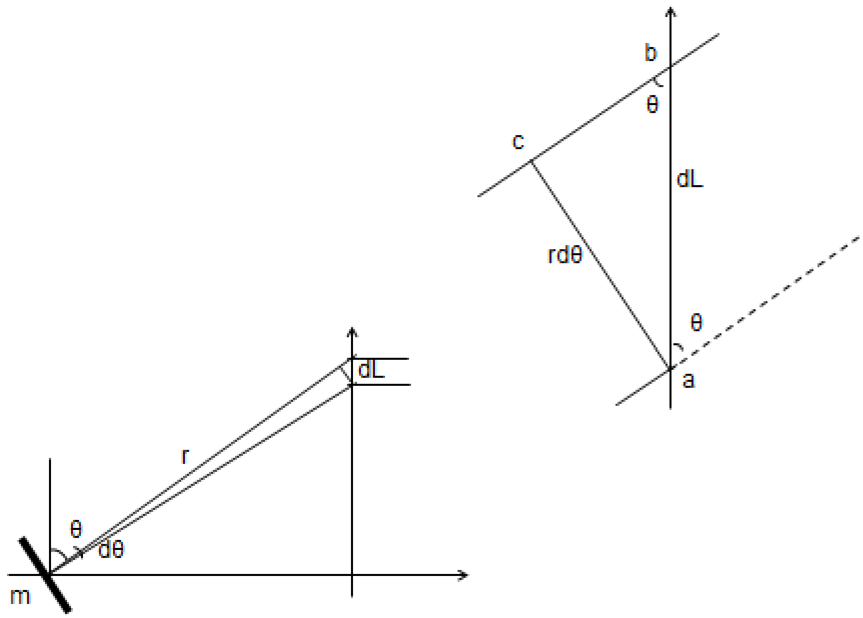
Dus een spoel is recht evenredig met het aantal windingen in het kwadraat en de doorsnede van de spoelkern, en omgekeerd evenredig met zijn lengte.

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.

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 Figuur 17, eens nagaan wat er gebeurt als het stukje *dL* niet loodrecht op de magneet *m* staat.



• Figuur 17

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 , zoook *, 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
$F = Q.v \times B$
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.

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).

In ons schema is er nog een extra component, namelijk een FET transistor, die we vereenvoudigt voorstellen als een schakelaar. De schakelaar is ofwel open ofwel gesloten. De tijd dat deze open is of gesloten is hangt af van een blokgolf signaal, als de spanning van de blokgolf hoog is (bv 5 V) dan is de schakelaar gesloten en kan er stroom doorvloeien. Daarentegen als de spanning laag is (bv 0 V) dan is de schakelaar open en kan er geen stroom doorvloeien. In tegenstelling tot de vorige componenten is een transistor dus een drie-knopen element, namelijk de in en uitgang van de schakelaar en de ingang van de blokgolf.

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

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

en daarmee kunnen we beginnen om een circuit te analyseren.

Jan Spaenjers