Inductie van een stuk draad

“Als je echt iets wil begrijpen, probeer het dan te veranderen”   Kurt Lewin

Chapter 1 Contents

1. Fysica van elektronen rond protonen

De vraag die men zich moet stellen is de volgende: “Hoe komt het dat de elektronen die een negatieve lading hebben niet worden aangetrokken door de protonen die een positieve lading hebben, en aldus zich tegen de positronen blijven plakken”

Dit is een serieus probleem want na zovele experimenten weten we dat elektronen rond de protonen ronddraaien en dat de afstand tussen de protonen en de elektronen nog behoorlijk groot is.

Velen onder ons denken dat elektronen rond protonen draaien zoals planeten rond de zon, en dat als elektronen maar genoeg snelheid hebben en geen wrijving, dat dan dezelfde wetten gelden als de wetten van Newton die bewezen heeft dat er een evenwicht bestaat tussen bijvoorbeeld de maan die continu naar de aarde valt, maar door zijn snelheid steeds van de aarde wilt ontsnappen. Immers moest de aantrekkingskracht van de aarde niet bestaan dan zou de maan rechtdoor vliegen met dezelfde snelheid dat ze rond de aarde draait. Maar doordat de aantrekkingskracht wel bestaat wordt de maan ook naar de aarde getrokken. Een juiste snelheid compenseert steeds juist het verschil tussen ontsnappen en aangetrokken worden.

Maar is dit principe ook van toepassing op elektronen en protonen.

Wel degelijk een elektron heeft een gewicht dat vele malen kleiner is dan het gewicht van de cluster protonen in het centrum van de molecule, en wel degelijk het elektron slingert met een zekere snelheid rond de protonen.

Maar protonen en elektronen hebben ook een lading. Wat juist lading is weet men niet, maar evenmin weet men ook nog steeds niet wat aantrekkingskracht tussen gewichten eigenlijk is.

Maar wat we wel weten is dat de gravitatie kracht (Fg) tussen het gewicht van twee elektronen van de orde is van 554.827 x 10^-73 N, en de elektromagnetische kracht (Fe) tussen de lading van twee elektronen van de orde is van 22.784 x 10^-29 N, dit is in de orde van 4.1 x 10^42 N sterker (410.000.000.000.0.. (41 nullen))

Ziehier als afwisseling hoe men aan deze verhouding komt:

$Fg = \frac{G.m^2}{r^2}$ en $Fe = \frac{k.q^2}{r^2}$ en dus $\frac{Fe}{Fg} = \frac{k.q^2}{G.m^2}$ hierin is

$G = 6.67\ ^{-11} \left[\frac{N.m^2}{kg^2}\right]$ zwaartekracht constante

$m = 9.1^{-31}[kg]$ massa elektron

$r[m]$ afstand tussen de elektronen

$k = \frac{1}{4.\pi.\varepsilon} = 8.9^9 \left[\frac{N.m^2}{C^2}\right]$ Coulomb constant

Dit allemaal ingevuld geeft voor $\frac{Fe}{Fg} = \frac{22.784^{-29}}{554.827^{-73}} = 4.1^{42}$

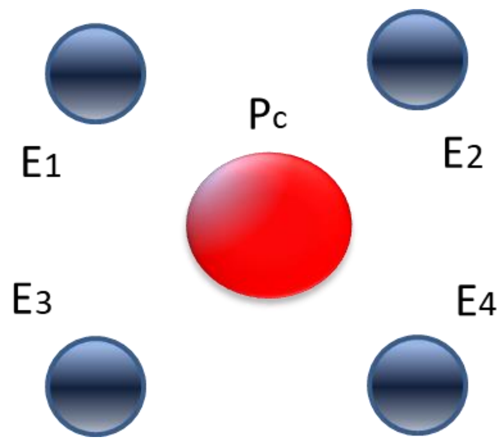
(Iets gelijksoortig kan men berekenen tussen de krachten van protonen), zodat men terecht kan besluiten dat op microscopisch vlak de gravitatie kracht verwaarloosbaar klein is. En als men het toch wilt bewijzen dat dan de snelheid van het elektron zo een verschrikkelijke snelheid moet bezitten dat de elektronen in gelijk welk materiaal alles zou verhitten tot extreme temperaturen.

Voor mijn part mogen de elektronen stilstaan, en dan nog kan men eenvoudig aantonen dat elektronen niet tegen de protonen te pletter storten.

Laten we dit even eenvoudig aanschouwelijk maken in een vlak bestaande slechts uit twee dimensies, dus een plat vlak (terwijl de werkelijkheid zich steeds afspeelt in drie dimensies, lengte hoogte en diepte)

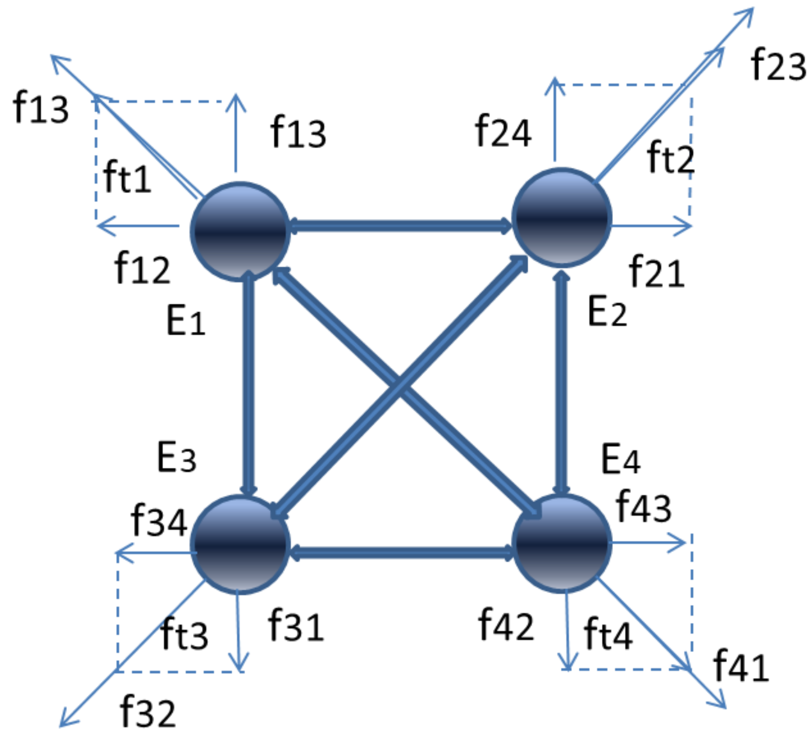
En veronderstellen we vier elektronen die zich bevinden rond een cluster van vier protonen.(Ik weet wel dat volgens het uitsluiting principe van Wolfgang Pauli er op de eerste schil maar twee elektronen kunnen ronddraaien maar dat heeft met het principe niet veel te maken.)

Dat kunnen we dan visualiseren zoals Figuur 1 laat zien.



Figuur 1

Chapter 2 2 Wat doen de elektronen zonder de protonen?



Figuur 2

In Figuur 2 is te zien hoe 4 elektronen op gelijke afstand van elkaar zich zouden gedragen als er geen protonen zouden zijn.

We kunnen hier eenvoudig de wet van Coulomb op toepassen.

Ik wil je er op attent maken dat niemand in de gehele wereld begrijpt waarom deze wet bestaat. (maar de natuur heeft nooit een vooropgesteld plan, tenzij je in een schepper geloofd die alles gemaakt heeft met een zeker einddoel dat moet bereikt worden). Maar proefondervindelijk is men tot de conclusie gekomen dat twee ladingen (Ook wat eigenlijk een lading is, weet niemand) elkaar aantrekken of afstoten met een kracht (F) uitgedrukt in [N] (Newton) met de formule van Coulomb als volgt:

$$F = \frac{Q_1.Q_2}{4.\pi.\varepsilon.r^2}[N]$$

Hierin is Q de lading (die + of – kan zijn), r is de afstand tussen de ladingen Q_1 en Q_2, en ε is een natuurconstante die gelijk is aan ε = 8,854187817 x 10^{-12} [F/m].

(Als er ergens in een formule een natuurconstante in voorkomt wil dat meestal zeggen dat men niet weet waarom deze er is.)

Deze proefondervindelijke formule is het dogma van de elektronica. Men gelooft er in en dan kan men hem gebruiken, of men gelooft er niet in maar dan moet je een ander voorstel doen, en bewijzen dat jouw voorstel ook geldig is. (En geloof me, er zijn al verschillende andere voorstellen gedaan, maar deze hebben hun correctheid niet kunnen bewijzen of vasthouden)

Deze formule is voor verschillende redenen niet correct.

1ste) Indien r = 0 of anders gezegd wanneer twee magneten tegen elkaar gebracht worden dan zou de kracht F = ∞

(oneindig!) wat natuurlijk niet is, dat weet iedereen uit ondervinding. Besluit een puntlading bestaat niet!.

Meteen kan ik er aan bijvoegen dat een oneindig dunne draad ook niet bestaat, en dat men steeds moet blijven nadenken wat theoretisch (wiskundig) mogelijk is en wat in werkelijkheid (fysisch) kan bestaan.

In de fysica gebeurt zoiets toch wel eens en als een proton zich samenvoegt met een elektron dan ontstaat er een neutron, wat een zeer stevig element is en met(bijna) geen enkele kracht uiteen te trekken.

2de) Een verandering van lading kan zich niet sneller melden over een zekere afstand dan met de snelheid van het licht (in vacuüm) en bijna de snelheid van het licht in een koperdraad. Dit zullen we later in dit document toepassen. Daarom moet deze formule aangepast worden in functie van de tijd als volgt:

$$F_{(t)} = \frac{Q_1.Q_2.(t-\frac{r}{c})}{4.\pi.\varepsilon.r^2}\,[N]$$

Dat betekent dat pas na een zekere tijd (r/c), Q_2 weet dat er een verandering is gebeurt door Q_1. En ook omgekeerd.

Als er meer ladingen aanwezig zijn dan moet je vectoriel alle krachten bij elkaar optellen.

Gewapend met deze aangenomen vaststellingen kunnen we aan de slag.

(Noteer dat de volledige formule van Coulomb, waarin men ook rekening houdt met versnellende bewegingen van de ladingen er als volgt uitziet

$F = \frac{Q_1.Q_2}{4.\pi.\epsilon}\left[\frac{e}{r^2} + \frac{r}{c}.\frac{d}{dt}\left(\frac{e}{r^2}\right) + \frac{1}{c^2}.\frac{d^2}{dt^2}.e\right]$ waarin e een richting coëfficiënt is.)

Volgens de wet van Coulomb stoten elektronen elkaar af met een kracht die gelijk is aan:

$$F_1 = \frac{e_1.e_2}{4.\pi.\varepsilon.r_{12}^2}\,[N]$$

Hierin is e_n de lading van een elektron welke gelijk is aan e = 1,602214 x 10^{-19} [C] (Coulomb) en r_{12} is de werkelijke afstand tussen e_1 en e_2 . Maar dit zelfde elektron wordt ook afgestoten door zijn ander naburig elektron e_3 en dus moeten we ook deze relatie opschrijven als

$$F_2 = \frac{e_1.e_3}{4.\pi.\varepsilon.r_{13}^2}\,[N]$$

Evenzo is er ook een afstoting tussen e_1 en e_4 en dus moeten we ook deze kracht noteren als

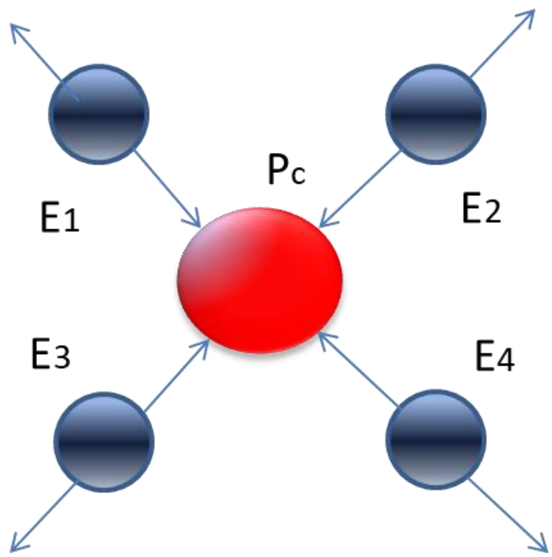
$$F_3 = \frac{e_1.e_4}{4.\pi.\varepsilon.r_{14}^2}\,[N]$$

Noteer dat r_{14} een grotere afstand is.

Dezelfde oefening moeten we nu ook doen voor alle andere elektronen en dus aan ieder elektron zijn er 3 krachten die we vectoriel moeten optellen. Deze krachten zijn afgebeeld in Figuur 2 als vectorlijnen en de som is uitgedrukt als Ft. Vermits we aannemen dat alle elektronen op gelijke afstand staan van elkaar zijn alle Ft's gelijk aan elkaar.

1. Wat doen de elektronen en de protonen?

Vermits de cluster protonen vast staan en een positieve lading hebben worden de elektronen aangetrokken naar de protonencluster zoals is afgebeeld in Figuur 3.



Figuur 3

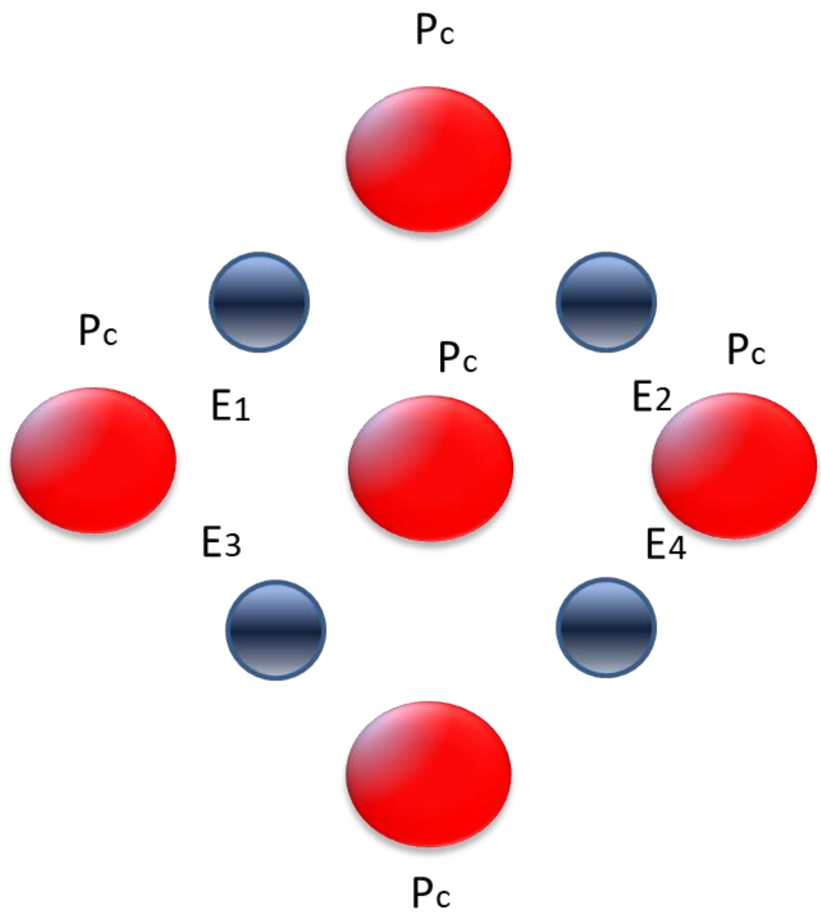
Deze krachten kunnen we ook berekenen als

$$F_{10} = -\frac{e_1.p}{4.\pi.\varepsilon.r_p^2}\,[N]$$

Noteer het min teken omdat de ladingen van het proton positief is en van het elektron negatief.

Deze formule passen we hier ook 4 maal toe voor de 4 elektronen. Dit alles is vectoriel afgebeeld in Figuur 3.

Maar op zijn beurt zijn de elektronen terug omringd door vier protonen clusters waar de elektronen ook worden aan getrokken. En opnieuw moeten we de wet van Coulomb hier op toepassen. Dit is weergegeven in Figuur 4



Figuur 4

2. Som van dit alles

Als we alle krachten die we hierboven hebben gevonden met elkaar optellen (rekening houdend met het teken) komen we tot de constatatie dat voor een bepaalde afstand (r) de som gelijk is aan nul, en dus de protonen en elektronen zich in evenwicht houden . Of daarenboven de elektronen nog ronddraaien of niet maakt alleen de optelling van al deze krachten wat ingewikkelder maar aan het principe verandert er niets.

Als de molecule meer elektronen (en protonen) bevat zullen deze extra elektronen meer naar buiten opschuiven verder van de protonen op wat wij geleerd hebben, op een andere schil (of orbit).

Natuurlijk liggen elektronen niet in een plat vlak maar (in geleidend materiaal) vormen ze een drie-dimensionele constructie die eruit kan zien zoals afgebeeld Fig 4 waar , in zijn eenvoudigste vorm de proton omringd is met 4 elektronen in een constructie waar een volume gemaakt wordt van 4 gelijkzijdige driehoeken met een protonen cluster er middenin.

Het is een heel ander verhaal als we spreken over gasvormige toestanden waar de elektronen niet gebonden zijn aan een vast stilstaand rooster van protonen. In deze situatie moeten de elektronen wel zeer grote snelheden ontwikkelen om niet tegen het proton te pletter te storten. Bijvoorbeeld in waterstof kan de snelheid van het enige ronddraaiend elektron tot 1/3 van de lichtsnelheid zijn.

Dit is dan ook ineens de verklaring waarom deze gassen (bijna) niet in vrije toestand voorkomen en alleen in de kern van bijvoorbeeld de zon waar de temperatuur geweldig hoog is zulke snelheden kunnen bereiken. Ook verklaart dit meteen waarom deze gassen zich direct binden met andere stoffen (zoals zuurstof om water (of ijs) te vormen).

3. Vrije elektronen

Verder redenerend kan men zich gemakkelijk voorstellen dat een molecule van een vaste stof (met rooster structuur) die zoals bij koper uit 29 elektronen bestaat waarvan het 29ste elektron niet meer in rust gehouden wordt door naburige elektronen en daarenboven het verst verwijderd is van de protonen cluster dat dit elektron zich kan nestelen bij de ene molecule of bij de naburige molecule en met een weinig extra kracht (bijvoorbeeld de temperatuur) heen en weer kan hoppen door de het rooster. Noteer wel dat als dit elektron zich hecht bij een naburige molecule de vorige molecule in zijn totaliteit een positieve lading krijgt en dus een vrij rond huppelend elektron aantrekt zodat in het geheel er overal evenveel protonen als elektronen zijn zodat het geheel volkomen neutraal blijft.

Even een bijgedachte. Als de elektronen (en protonen) in een vast rooster onbeweeglijk zouden zijn, wat zou kunnen zijn als de temperatuur zeer laag is, dan kunnen toegevoegde elektronen door een uitwendige bron, bijvoorbeeld een spanning over de draad, deze extra elektronen ongestoord door het raster van de vaste elektronen en protonen heel vliegen, wat dan betekend dat er geen weerstand is, of dat met dit inzicht men een verklaring ziet van wat men supergeleiding noemt.

4. Waarom vliegen elektronen niet van een (koper)draad ?

Ook al zijn er vele vrije elektronen (in koper ongeveer 1 elektron per molecule), toch zijn er evenveel protonen als elektronen (de vrije elektronen inbegrepen). Dus als er een elektron zich buiten de (koper)draad beweegt is er een proton te veel, die dit elektron aantrekt en terug in de kristal structuur van de koperdraad brengt.

Kunnen er dan echt geen elektronen ontsnappen? Ja zeker, maar hiervoor heeft men een extra energie nodig van buitenaf die groter is dan de "ontsnapping energie" die nodig is om het elektron los te rukken van het rooster. Deze extra energie kan bijvoorbeeld komen van ultra violet licht zoals Einstein bewezen heeft. Deze energie is gelijk aan 4,65 [eV].

Een "Elektron Volt"(eV) is de kinetische energie die een enkel elektron krijgt wanneer het zich beweegt van de ene plaat naar de andere plaat die een potentiaal verschil heeft van 1 Volt.

Dus eV = $\frac{1}{2}.m.v^2$ [J] en dit is gelijk aan 1 [eV] = $1{,}602176565 \times 10^{-19}$ [J]

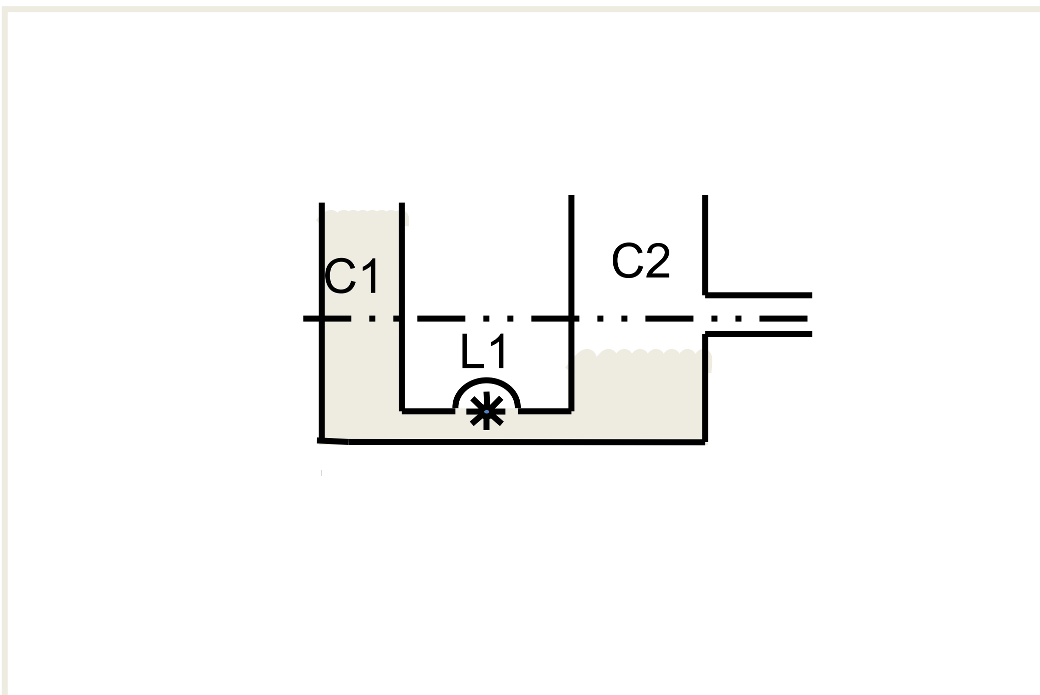
Een foton van normaal licht heeft niet genoeg energie (ongeveer 3,5 [eV]) om een elektron uit het koper te doen ontsnappen. Noteer het moet de energie zijn van één foton. Ook al komen er miljarden fotonen op de koperplaat dan nog zal er geen enkele elektron uit het rooster kunnen ontsnappen en aangetrokken worden door een ander proton buiten de koperdraad. Ultra Violet licht bijvoorbeeld heeft per foton wel genoeg energie (> 4,65 [eV]) en zal dus wel elektronen doen ontsnappen uit een koperplaat als er in de geburen een (bundel) protonen zijn die dit vrijgekomen elektron kan aantrekken.

Fotonen van radio zenders of van elementen met nog lagere frequenties, zoals bijvoorbeeld transformatoren hebben dus geen enkele invloed op de elektronen die verbonden zijn aan de protonen.

Met klem wil ik hier herhalen dat al wat volgt alleen maar betrekking heeft op de *vrije* elektronen die aanwezig zijn in een koper- zilver-, goud- of ijzerdraad, en die *vrije* elektronen kunnen dus wel door de energie van een foton in beweging gebracht worden.

5. Analogie inductie met een waterrad

Om een inzicht te krijgen tussen een elektronisch element en een mechanisch element waarvan de eigenschappen analoog verlopen kunnen we de inductie (van een stuk draad) vergelijken met een waterrad met in gedachte dat het water elektronen voorstellen het waterverschil voor en na het waterrad met de spanning die over het stuk draad staat en de waterstroom door het waterrad met de elektrische stroom door het stuk draad, zoals te zien in Figuur 5.



Figuur 5

Men komt tot de vaststelling dat hoe groter de bladen van het waterrad zijn en hoe langer de schoepen zijn hoe meer weerstand het waterrad heeft. Dit komt overeen dat hoe langer de draad hoe meer weerstand men heeft, maar ook hoe kleiner de doormeter hoe meer weerstand men heeft, dit komt dus overeen dat de inductie wordt groter , als de lengte van de draad groter maar de doormeter kleiner, immers hoe kleiner de doormeter van de draad hoe meer weerstand of L ~ *l/r*. Maar de evenredigheid is niet lineair maar logaritmisch of L =C. ln(*l/r*) + *correctie* waarin C een dimensie constante is om de uitslag in [Henry] te bekomen.

6. Definitie van spanning.

In alle boeken over natuurkunde en elektronica kan men vinden dat, wat betreft een spoel, dat de spanning $V_l = -L.\frac{dI}{dt}$. Hierin is V_l de spanning over het spoel, L is de inductie van het spoel en $\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta.I}{\Delta.t}$ de verandering van de stroom in functie van de tijd.

(Het bewijs hiervan is uitgebreid terug te vinden in mijn document LRC)

We gaan dus trachten te bewijzen dat ook een stuk draad een inductie heeft met een zekere L-waarde, en dit gaan we doen door telkens een uitdrukking te zoeken van de spanning in functie van $\frac{DI}{dt}$, waaruit we dan afleiden dat $V_l.\frac{dt}{dI} = L$.

7. Aanleg van een spanning over een stuk (koper)draad

Wat gebeurt er als men over een stuk (koper)draad een spanning aanbrengt?

Er gebeuren dan voornamelijk drie dingen.

1° Er worden langs de ene kant van de batterij ,per ongeluk vanuit de + pool van de batterij, door een zekere kracht (de spanning) elektronen in de draad geduwd. (Men wist bij het ontdekken van elektriciteit nog niet dat het bewegen van de elektronen verantwoordelijk waren voor het ontstaan van stroom, maar deze hebben een , ook bij conventie, een negatieve lading. De foutieve conventies die met elkaar in tegenspraak zijn heeft men nooit terug recht gezet!!)

Maar in eerste instantie weet de achterkant van de draad die aan de negatieve pool van de batterij hangt niet dat er iets gebeurt is, doordat, zoals uitgelegd, niets sneller dan het licht kan gebeuren en dus de negatieve pool van de batterij slechts na $t = \frac{l}{c}[s]$ weet dat er elektronen naar de batterij stromen, omdat de lading aan de andere kant van de draad veranderd is.

Als er dus geen stroom vloeit door de draad zal deze draad zich gedragen als een isolator en staat dus de gehele spanning over de draad. En dat is dus wat we normaal leren als de tegen emk (elektro-motorische-kracht). Dit wordt besproken als factor B

2° Deze bijkomende elektronen vinden in het midden van de draad minder plaats en worden door de vele elektronen die er rustig een evenwicht hadden gevonden naar de buitenkant van de (ronde)draad gestoten waar er minder elektronen (buiten de draad zijn er geen elektronen) zijn die ze naar binnen in de draad drijven. Dit is in woorden uitgelegd waarom de stroom meer langs de buitenkant stroom dan aan de binnenkant. Deze relatie is recht evenredig met het kwadraat van de straal van de (ronde) draad. Dus I = k x r^2.

Er is dus ook een spanningsverschil tussen de buitenkant van de draad en de binnenkant waar de spanning nul is. Dit wordt besproken als factor A

3° Deze twee vorige factoren hebben te maken met het plotseling veranderen van de lading over en in een draad, maar afhankelijk van de frequentie is het heen en weer bewegen van de elektronen in de draad niet hetzelfde. De driftsnelheid (v_d) of de gemiddelde snelheid waarmee de elektronen bewegen door een draad is vrij klein en ongeveer 0,24 mm per seconde. Deze snelheid is nog kleiner dan de beweging van een luie slak!! Maar toch is de beweging aan de buitenkant van de draad bewegelijker dan aan de binnenkant, waar de elektronen meer elkaar in bedwang houden door de verschillende omliggende naburige elektronen. Meer aan de rand zijn er steeds minder naburige elektronen.

Dit noemt men het skin effect. En het is begrijpelijk dat dit skin effect recht evenredig is met de geleidbaarheid (ρ) (of anders gezegd, er meer vrije elektronen zijn) maar omgekeerd evenredig met de frequentie (of impulsie $\omega = 2.\pi.f$) en een constante $\mu = 4.\pi.10^{-7}[H/m]$. Of in formule vorm:

$$\delta = \sqrt{\frac{2.\rho}{\mu.2.\pi.f}}$$

Dit wordt besproken als factor C.

8.1De factoren A, B en C die samen de inductie L vormen

In de rest van het verhaal zullen we trachten te bewijzen dat: $L = A + B + C$

Waarin $A = \frac{\mu}{2.\pi}.l.ln\left(\sqrt{\frac{l^2+r^2}{r^2}} - \sqrt{l^2+r^2} + r\right)$

En $\quad B = \frac{l.\mu}{8.\pi}$

En $\quad C = \frac{\mu.l}{4.\pi.r}\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{\mu.\pi.f}}$

8.1.1 nvloed van B in de lengte richting van de draad

Vermits de andere kant van de draad verbonden is met de – pool van de batterij (die dus een tekort van elektronen bevat) kunnen er dus elektronen wegvloeien uit de koperdraad, als er tenminste aanleiding toe is om de draad te verlaten.

Door het inbrengen van elektronen langs de +pool zullen de inkomende elektronen de volgende elektronen een stukje verder wegduwen, dit gebeurt met (bijna)de snelheid van het licht. Immers er is een verandering van lading gebeurt aan de ene kant van de draad (+ pool) door het onder uitwendige druk het in stompen van elektronen. Na een zekere tijd t = l/c waarin l = lengte van de draad en c = 299.000km/s waardoor de elektronen die aan het einde van de draad zaten verder verdreven worden naar de –pool van de batterij.

Maar dit betekent dat zolang er geen plaats geruimd is aan de voorkant, de binnenkomende druk van de elektronen van de batterij niet verder kan bewegen en slechts wanneer er aan het uiteinde van de draad elektronen zich gaan verplaatsen naar de –pool van de batterij men kan spreken van een aanvang van verplaatsing van elektronen of een begin van stroom.

er ontstaat dus aan de voorkant een negatieve spanning terwijl aan de uitgang een positieve spanning (die aan de –pool is verbonden, waar er een tekort aan elektronen zijn). Er zal dus tussen de ingang en de uitgang een kracht ontstaan die volgens Coulomb gelijk is aan

$$F_E = -\frac{Q_1.Q_2}{4.\pi.\varepsilon.l^2}[N]$$

Hierin is Q_1 de lading aan de ingang en Q_2 de lading aan de uitgang en *l* de lengte van de draad. Vermits men Q_2 zelfs aan grond mag hangen betekent dit dat de lading van de batterij over de draad staat.

Dit is echter maar een deel van het verhaal en alleen maar geldig voor ladingen die stil staan maar Einstein heeft aangetoond dat als ladingen zich bewegen in dezelfde richting als de spanning er een extra kracht bijkomt welke gelijk is aan

$$F_M = -\frac{Q_1.\Delta Q_2}{4.\pi.\varepsilon.l^2}\,[N]$$

Waarin $\Delta Q = Q.\left(\frac{v}{c}\right)^2$. In een extra hoofdstuk zal ik op een begrijpelijke manier aantonen waarom dit zo is.(Maar reeds uitgebreid uitgelegd in mijn document LRC).

In deze formule is v de driftsnelheid en deze is bijzonder klein, namelijk 0.07 mm per seconde in een draad van 1 mm diameter en een stroom van 1 Ampère.

Hier wil ik even een frustratie weg werken. Als men in een waterleiding de kraan open draait dan komt er onmiddellijk water uit. En dat is eenvoudig te begrijpen omdat de buis vanaf de watertoren tot aan de kraan (bij u thuis) vol met water zit en door de druk van het hoogteverschil vloeit er water uit de kraan vanaf het ogenblik dat men de kraan open draait.

In een elektrisch circuit is iets analoog bezig, namelijk de elektrische draad zit vol (vrije) elektronen en onder de druk van de spanning zal vanaf de schakelaar aan gezet wordt, gaat (bijna) onmiddellijk de stroom vloeien (om bijvoorbeeld een lamp te doen branden). Deze “bijna onmiddellijk” is dicht tegen de snelheid van het licht. Maar alle boeken van natuurkunde beweren bij hoog en bij laag dat die snelheid van stroom (om de lamp te doen branden) komt door de snelheid van het uitwendig magnetisch veld, terwijl de simpele uitleg zo klaar en duidelijk is en niets maar dan ook niets met het een of het ander veld te maken heeft. Dat magnetisch veld bestaat fysisch niet. Het is een wiskundige truc. Het is niet verboden om wiskundige trucs te gebruiken (om iets sneller uit te rekenen) maar zegt dat dan maar zit niet iets uit je duim te zuigen.

Nu is spanning gedefinieerd als de arbeid die een lading doet van het ene punt naar het andere of:

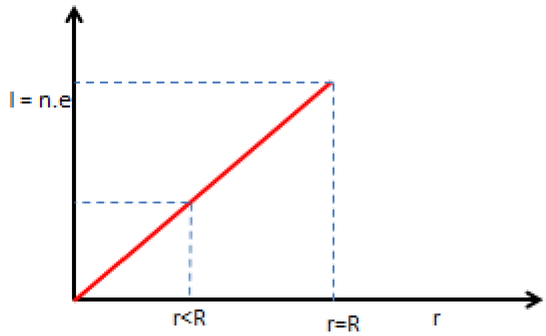
$$dV = \frac{-Q_2.dl}{4.\pi.\varepsilon.l^2}.\frac{v^2}{c^2} = \frac{F.dl}{Q_1}$$

Noteer het – teken , vermits Q_1 en Q_2 verschillend van lading zijn (elektronen en protonen).

Maar $\mu = \frac{1}{\varepsilon.c^2}$ en $v = \frac{l}{t}$ en $Q = I.t$ dit ingevuld in bovenstaande formule krijgen we

$$dV = -\frac{F.dl}{Q} = \frac{\mu.I.t.dl.l^2}{4.\pi.l^2 t^2} = -\frac{\mu.I.dl.}{4.\pi.t}$$

Maar de stroom is niet evenredig verdeeld over de doorsnede van de draad, en is zelfs nul in het midden van de draad maar wordt recht evenredig groter naar de buitenkant van de draad en is maximaal aan de rand van de draad. De verdeling kunnen we dus grafisch voorstellen zoals in Figuur 6



Figuur 6

Dit betekent dat we de stroom kunnen voorstellen als stromende gelijkmatig over de ganse doorsnede van de draad maar met een stroom die gelijk is aan de helft van de maximale stroom. Of $I = I_{max/2}$

Dan kunnen we de integraal uitvoeren en

$$\int dV = V = -\frac{F.l}{Q} = -\frac{\mu.I.l.}{8.\pi.t}$$

Vermits $\boldsymbol{V = L.\frac{dI}{dt}}$ **v**olgt dat

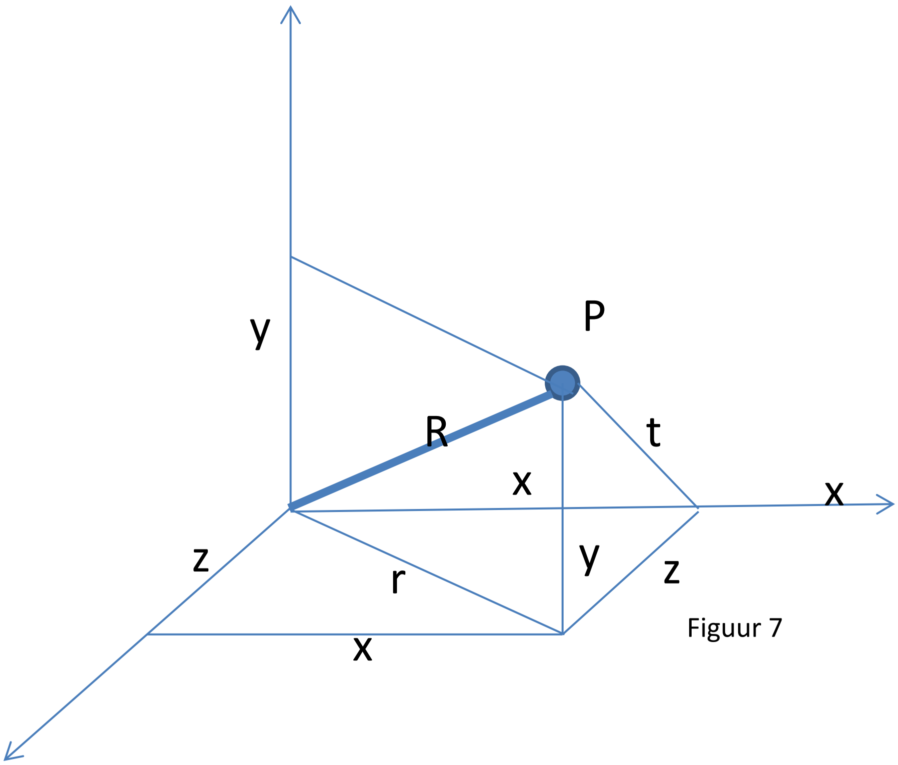
$$L_{in} = \frac{\mu.l}{8.\pi}$$

8.2 Invloed van A in de doorsnede richting van de draad

Hier gaat het over een kracht die ontstaat tussen het midden van de draad (waar de straal $r = 0$ is) en de rand van de draad (waar de straal $r = R$). Dit is dus een kracht in de opwaartse en neerwaartse richting, loodrecht ten opzichte van de lengte van de draad. Maar dit fenomeen gebeurt wel over de ganse lengte (l) van de draad. En dit gebeurt voor elk punt in de draad waar een elektron zich beweegt.

Om dit nauwkeurig te beschrijven moeten we ons realiseren dat we met punten (of elektrische ladingen = elektronen) te doen hebben die zich bevinden in een drie dimensionale ruimte. En we moeten dus iedere punt kunnen bepalen vooraleer we een totale som (een integraal) kunnen uitvoeren.

Hiervoor is het belangrijk om in te zien hoe in de ruimte de afstand van een punt (of elektron) in de ruimte is bepaald in een assenstelsel met drie dimensies (x, y en z).



Figuur 7

Laten we nu een beetje meetkunde in de ruimte doen, dan zien we dat de afstand $R^2 = r^2 + y^2$ maar ook $r^2 = x^2 + z^2$ en dit ingevuld in de vorige formule bekomen we dat $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Maar we kunnen ook ditzelfde oplossen als volgt: $R^2 = t^2 + x^2$ maar hier is ook $t^2 = y^2 + z^2$ en dus ook kunnen we dit laatste invullen in de vorige formule en dan volgt $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

We zullen de tweede benadering verder gebruiken omdat hierin $R^2 = t^2 + x^2$ de x-richting wordt gebruikt wat overeenkomt met de lengte richting van de draad.

Nu even wat oprapen wat we in onze lessen over differentialen en integralen hebben geleerd.

Uit $R^2 = t^2 + x^2$ kunnen we afleiden dat $\int 2.RdR = R^2$ en natuurlijk ook $\int 2.tdt = t^2$ en $\int 2.xdx = x^2$

Vermits de elektronen zich verplaatsen in de x richting maar niet in de t richting is $dt = 0$ en dus ook $\int 2.tdt = t^2 = 0$. Hieruit volgt dat $\int 2.RdR = R^2$ gelijk is aan $\int 2.xdx = x^2$ en dus ook $\frac{x^2}{R^2} = \frac{\int 2.xdx}{\int 2.RdR}$

of

$$\frac{x^2}{R^2} = \frac{\int xdx}{\int RdR}$$

En deze belangrijke conclusie gaan we hierna gebruiken.

8.3 Integraal formules gebruikt om dit op te lossen

Wie hogere wetenschappelijke studies gedaan heeft, weet dat voornamelijk het eerste jaar hij verschrikkelijk vele uren wiskunde heeft moeten studeren en voornamelijk integralen en differentialen heeft moeten oplossen.

Hier vermeld ik alleen de formules van de integralen die ik in deze studie gebruik zonder verder in te gaan op het bewijs hoe men aan deze formules gekomen is. Maar er is op het internet een zeer interessante site "integral Calculator. With Steps" waarin je gelijk welke integraal kan in tikken en het programma alle steps laat zien om tot het resultaat te komen. (Niet altijd eenvoudig om te begrijpen, maar daarom zijn het ook hogere studies).

De volgende integralen zullen hier in dit document gebruikt worden:

1) $\int \frac{dx}{\sqrt{x^2+a^2}} = \ln\left(x+\sqrt{x^2+a^2}\right) - \ln(a) = \ln\left(\frac{x+\sqrt{x^2+a^2}}{a}\right) = sinh^{-1}\left(\frac{x}{a}\right)$

2) $\int sinh^{-1}\left(\frac{x}{a}\right) = x.\,ln\left(\frac{x+\sqrt{x^2+a^2}}{a}\right) - \sqrt{x^2+a^2} + a$

Dus wanneer we hier een dubbele integraal uitvoeren dan bekomen we

$$\int_0^l\int_0^l \frac{dx}{\sqrt{x^2+r^2}} = l.\,ln\left(\frac{l+\sqrt{l^2+r^2}}{r}\right) - \sqrt{l^2+r^2} + r$$

En deze formule zullen we toepassen op ons stuk draad waarvan we de inductie trachten te zoeken.

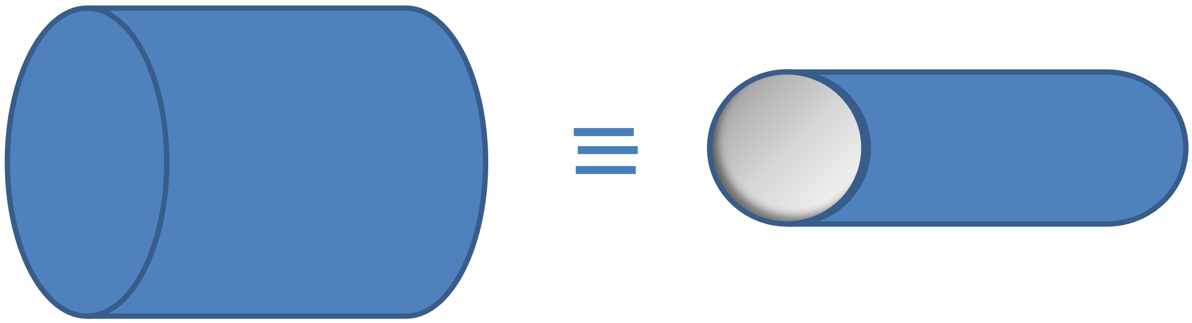
8.4 Verdeling van de lading over het oppervlak van een ronde draad.

Er zijn aan de buitenkant van een ronde draad meer vrije elektronen dan aan de binnenkant, en dus ook als deze elektronen zich bewegen met eenzelfde driftsnelheid v dan zal de stroom aan de buitenkant groter zijn dan in het binnenste van de draad.

Deze verhouding is recht evenredig, dit wil zeggen als er in het centrum van de draad geen enkele elektron kan bewegen maar aan de buitenkant met straal R de stroom I_{max} stroomt dan zal op gelijk welke afstand r met $0 < r < R$ de stroom I zich verhouden tot de stroom I_{max} zoals $\frac{R}{r} = \frac{I_{max}}{I}$

Vermits dit verloopt volgens een rechte lijn, kan men dit ook beschouwen als een draad waar gemiddeld een stroom $I_{gem} = \frac{I_{max}}{2}$. Dit kan men ook opvatten als een draad waarover de ganse oppervlakte een éénzelfde stroom $I_{gem} = \frac{I_{max}}{2}$ stroomt maar met een straal $R' = \frac{R}{2}$. Door deze truc toe te passen kunnen we een integraal uitsparen.

Dit is voorgesteld in Figuur 8



Figuur 8

Ik ben me ervan bewust dat dit een wiskundige truc is, en in feite niet overeenkomt wat er fysisch gebeurt, alhoewel het wel fysisch voor te stellen valt. Maar het vergemakkelijkt aanzienlijk de wiskundige bewerkingen en bespaart me het uitwerken van een extra ingewikkelde integraal.

Dus nogmaals, door deze vereenvoudiging is het **volume** van de draad nu voorgesteld als een zeer dunne **holle buis** waar alle vrije elektronen met éénzelfde snelheid v de driftsnelheid zich verplaatsen op de dunne oppervlakte van de holle buis. Deze holle buis heeft een straal die de helft is van de straal van de werkelijke draad. Vergeet hier niet dat het doorgeven van de beweging van de stroom wel degelijk (bijna) gelijk is aan de snelheid van het licht in koper of andere zeer goed geleidend materiaal.

Maar als in het midden van de draad geen stroom vloeit en aan de buitenkant veel meer stroom vloeit betekent dat er een ladingsverschil bestaat tussen de elektronen meer aan de buitenkant als aan de binnenkant, en dus als er een ladingverschil bestaat door bewegende vrije elektronen dan zal, volgens de formule van Einstein toegepast op de formule van Coulomb er een extra kracht ontstaan zoals reeds eerder aangehaald namelijk

$$F_M = -\frac{Q_1.\Delta Q_2}{4.\pi.\varepsilon.R^2}[N]$$

Hierin is $\Delta Q = Q\frac{v^2}{c^2}$

Maar nu is de richting R niet in de richting van de draad maar wel in de richting van het binnenste positieve lading van de draad naar de ladingen ergens in de draad. Deze extra kracht F_M is niet alleen gericht loodrecht naar het centrum van de draad maar naar iedere (positieve) lading die onder zijn lading ligt in alle mogelijke richtingen op een afstand R.

Maar door onze nieuwe voorstelling is alle lading verticaal wel even ver verwijderd van de (positieve) as op afstand r, maar ieder elektron op de schil ondergaat een kracht naar ieder punt P op deze as, en de afstand tot ieder punt is gelijk aan R, en deze afstand verandert steeds, voor ieder elektron tussen minimaal r en maximaal $R = \sqrt{r^2 + l^2}$. Dit wil zeggen dat we l moeten integreren tussen $l = 0$ tot l .

Eens men dit bereikt heeft kan ook, zoals hierboven reeds toegepast de spanning berekenen en de formule $V = -L.\frac{dI}{dt}$ toepassen en hieruit de inductie L uit afleiden.

Ziehier de bewerkingen die moeten uitgevoerd worden op een stuk draad van lengte l en straal R.

$$F_M = -\frac{Q_1.\Delta Q_2}{4.\pi.\varepsilon.R^2}[N]$$

$$\frac{F_M}{Q_1} = -\frac{Q_2.v^2}{4.\pi.\varepsilon.R^2.c^2}[N]$$

Met $Q = i.t$ en $v = \frac{l}{t}$ de driftsnelheid in de richting van de lengte van de draad volgt

$$\frac{F_M}{Q_1} = -\frac{i.t.l^2}{4.\pi.\varepsilon.R^2.t^2.c^2}$$

Nu is $\frac{1}{\varepsilon.c^2} = \mu$ en wat we hierboven hebben gevonden dat $\frac{x^2}{R^2} = \frac{\int xdx}{\int RdR}$ volgt

$$\frac{F_M}{Q_1} = -\frac{\mu.i.\int ldl}{4.\pi.t.\int RdR}$$

Of ook

$$\frac{F_{M\int dR}}{Q_1} = -\frac{\mu.i.\int ldl}{4.\pi.t.\int R}$$

Nu is de definitie van spanning $v\int dl = \frac{F_{M.\int dR.\int dl}}{Q}$ maar uit **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** volgt ook dat $R = \sqrt{l^2 + r^2}$ en vermits r een vaste waarde is, namelijk de straal, is ook dR alleen afhankelijk van de veranderlijke waarde dl .

$$\mathrm{V} = -\frac{\mu.i.\iint ldl^2}{4.\pi.t.\sqrt{l^2 + r^2}}$$

Brengen we in deze vergelijking ook nog in dat $I = 2.I_{gem}$ en met de wetenschap dat $V = -L.\frac{di}{dt}$ volgt dat

$$\mathrm{L} = \frac{\mu.\iint ldl^2}{2.\pi.\sqrt{l^2 + r^2}}$$

Met $\mu = \mu_0.\mu_r$ en $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}\left[N.\frac{s^2}{C^2}\right]$ en $\mu_r = 1$ voor koper bekomen we

$$\mathrm{L} = \frac{2.10^{-7}.\iint ldl^2}{\sqrt{l^2 + r^2}}[H]$$

Nu voeren we de dubbele integraal uit zoals we gezien hebben

$$\int_0^l\int_0^l \frac{dx}{\sqrt{x^2 + r^2}} = l.ln\left(\frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r}\right) - \sqrt{l^2 + r^2} + r$$

En

$$L = 2.10^{-7}\left[l.ln\left(\frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r}\right) - \sqrt{l^2 + r^2} + r\right]$$

Dit is dan het gedeelte A

Nota: Wat is de betekenis van $\frac{F}{Q} = E$? Dit is best te begrijpen wanneer we dit vergelijken met een weerstandswaarde per meter (ρ). Als we dit weten van een bepaalde materiaal dan is de weerstand van die draad van x meter gelijk aan $\Omega = \rho.x$ of $\rho = \Omega/x$. Zo ook is E (het Elektrisch veld) voor te stellen als een kracht F per lading Q. Natuurlijk moet men Q en E kennen om de kracht F te berekenen. En daarin zit nu juist het addertje onder het gras, er bestaat geen lijst van elektrisch velden per meter, maar wel kan men zich wel iets voorstellen met Volt (V) wat overeenkomt met $F.l/Q$.

Nota: In de wet van Coulomb staat dat deze kracht omgekeerd evenredig is met $4.\pi.R^2$ en we weten uit onze school-tijd dat $4.\pi.R^2$ de oppervlakte is van een bol met straal gelijk aan R. We kunnen dus deze formule ook schrijven als

$$\frac{F_M.4.\pi.R^2}{Q} = -\frac{\Delta \mathrm{Q}}{\varepsilon}[N]$$

of

$$\frac{F_M.A}{Q} = -\frac{\Delta \mathrm{Q}}{\varepsilon}[N]$$

Hierin stelt A een volledig omsloten oppervlakte voor en hoeft daarom niet altijd de oppervlakte van een bol te zijn. Deze nieuwe schrijfwijze is niets anders dan de wet van Gauss.

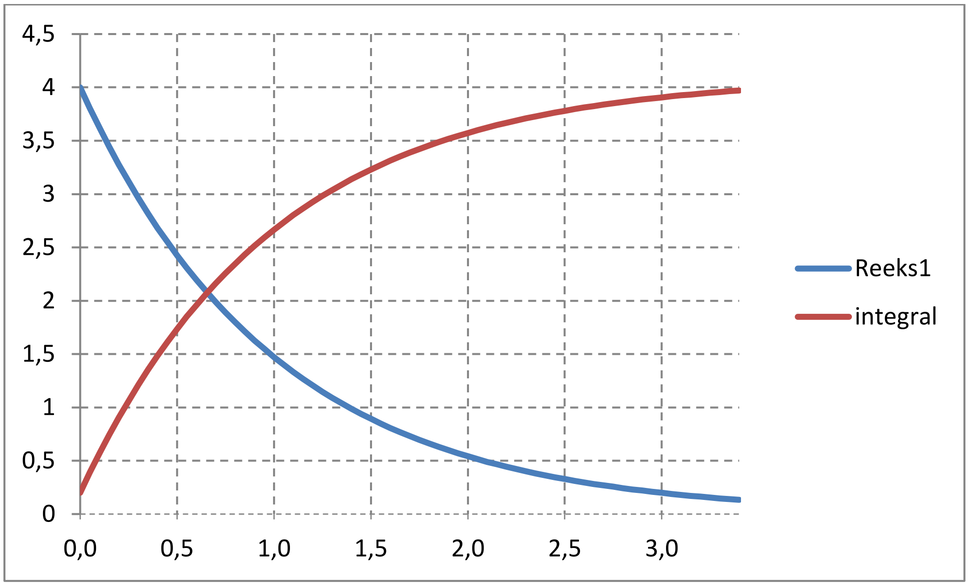
In deze wet wordt wel gezegd dat het de volledige omsloten oppervlakte moet zijn, maar in ons geval hebben we aangenomen dat alle lading zich bevindt op de rand van de holle buis en zijn er dus geen elektronen in het midden van de buis, daarom hoeven we geen rekening te houden met het voor- en achter-vlak, beide gelijk aan πR^2 , maar wel met de oppervlakte van de holle buis.

8.5 Invloed van skin effect op de inductie

We hebben al gesproken over de dichtheid van de elektronen in een ronde koperdraad, en waarin we tot de bevinding kwamen dat de dichtheid van de lading in het midden van de draad tot 0 komt en recht evenredig met de straal de dichtheid vermeerdert.

Maar bij zeer hoge frequenties gaan ook de hoger gelegen elektronen minder heen en weer kunnen bewegen zelfs zodanig dat alleen nog maar in een dunne schil aan de buitenkant van de draad de stroom nog voldoende beweegt om een wisselstroom te veroorzaken.

Men definieert nu de skindiepte δ als de afstand waarover een wisselende kracht (Spanning, Stroom, E-veld of M-veld) verzwakt is met $1/e$. Hierin is e het grondtal van het natuurlijk logaritme (ln).



Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.

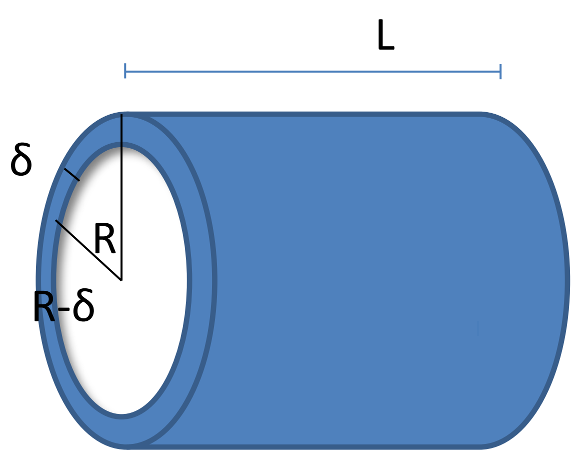
In deze figuur is de formule $y = \frac{4}{e^x}$ afgebeeld alsook de $\int y = 4|-e^{-x}|\ \ _0^\infty = 4$. Hierin ziet men dat op punt 1 de kromme met $\frac{4}{e} = 1.4715$ gedaald is

Deze skindiepte is $\delta = 1/\sqrt{\pi.f.\mu.\sigma}$. Hierin is σ de geleidbaarheid /meter en deze is voor koper $5{,}8.10^7\left[\frac{1}{\Omega.m}\right]$ of ook uitgedrukt in $\rho = 1/\sigma[\Omega.m]$ of $\rho = 1.678.10^{-8}[\Omega.m]$.

Maar dit is nog steeds geen relatie tussen de verandering van een deel van de inductie in functie van de frequentie.

We weten dat $Rdc = \frac{\rho.l}{A}$ waarin voor een ronde draad $A = \pi.R^2$ waarin R de straal is van de draad.

Maar door het skin effect wordt de effectieve oppervlakte verkleind tot een straal $r = R - \delta$ en hierin is $\delta = \sqrt{\frac{2.\rho}{\mu.\omega}}$.



Figuur 9

En dus wordt de effectieve oppervlakte voor een draad waarin wisselstroom gaat gelijk aan de oppervlakte van de draad vermindert met de oppervlakte van de draad maar met een straal $R - \delta$.

Dit is te zien in

Figuur 9 en dus wordt de effectieve oppervlakte $Aeff = \pi. R^2 - \mu(R-\delta)^2$ of uitgewerkt $Aeff = \mu.\delta(2.R-\delta)$.

Dit is strikt genomen niet volledig juist, want de skin diepte is de afstand waar de geleidbaarheid met $1/e$ afgenomen is. Maar dit is een exponentiele functie die daarna zeer sterk naar nul gaat.

Maar de integraal van de functie $y = \int \frac{dx}{e^x} \approx \delta. y$. Het is niet volledig juist maar het werkt.

Nu weten we dat $Rdc = \frac{\rho.l}{\pi.R^2}$ en Rac wordt dan op gelijkaardige wijze

$Rac \frac{\rho.l}{\pi.\delta(2.R-\delta)}$.

De verhouding tussen $\frac{Rac}{Rdc}$ is dan gelijk aan $\frac{Rac}{Rdc} = \frac{\delta(2R-\delta)}{R^2} = \frac{2.\delta}{R} - \frac{\delta^2}{R^2}$.

Vermits $R \gg \delta$ zal zeker $R^2 \gg \delta^2$ en dus verwaarloosbaar ten opzichte van de rest zodat de verhouding van l $\frac{Rac}{Rdc} = \frac{2\delta}{R}$. en dus $Rac = Rdc.\frac{2.\delta}{R}$

Met Rdc hadden we uitgerekend dat de inductie gelijk is aan $L_{in} = \frac{\mu.l}{8.\pi}$

Dan zal met Rac de inductie ook met een factor $\frac{2.\delta}{R}$ moeten vermenigvuldigen of

$\boldsymbol{Linac} = \frac{\mu.l}{8.\pi}.\frac{\mathbf{2.\delta}}{\boldsymbol{R}}$ en vullen we hierin nog δ in dan wordt $Linac = \frac{\mu.l}{8.\pi}.\frac{\mathbf{2}}{\boldsymbol{R}}.\sqrt{\frac{\rho}{\mu.\pi.f}}$. of uiteindelijk $Linac = \frac{l}{4.\pi.R}.\sqrt{\frac{\mu.\rho}{\pi.f}}$ en dat is dan de volledige uitdrukking. Om volkomen juist te zijn kan men de exacte verhouding $\frac{2.\delta}{R} - \frac{\delta^2}{R^2}$ aanhouden en wordt de uitdrukking iets ingewikkelder, maar dat laat ik over aan de naarstige lezer.

8.6 Besluit

In dit kort document heb ik aangetoond dat men de inductie van een stuk ronde draad kan berekenen enkel door te steunen op de wet van Coulomb maar aangepast voor bewegende ladingen. Deze aanpassing is het gevolg van de relativiteit theorie van Einstein.

Bij uitbreiding kan men dit ook toepassen op strip stroken, coax kabels of parallel draden.

Elektrische velden of magnetische velden of fluxdichtheid en diens meer hebben mijns inziens alleen een wiskundige betekenis die voortspruit uit een velden theorie die uitgedokterd werd vooraleer men het bestaan van fotonen en elektronen kende. Maxwell heeft er een wiskundige formule voor ontworpen die allen in zijn tijd bestaande empirische wetten samenbracht in een zestal wiskundige driedimensionale formules steunend op de vectoren leer.

Deze formuleringen zijn niet foutief maar zeggen niets over de fysica wat er zich in een draad afspeelt tussen de krachten die ontstaan wanneer verschillende ladingen elkaar beïnvloeden.

Deze redenering is analoog met een fietser die een bocht wilt nemen. Met de wiskundige formules van Newton kan men perfect uit rekenen hoeveel de fietser zijn stuur moet draaien zijn lichaam moet overhellen welke snelheid moet aanhouden, enz… om perfect de bocht te nemen. Maar ik heb nog nooit één fietser ontmoet die vooraleer hij een bocht neemt een half uurtje langs de weg met zijn rekenmachientje gaat uitrekenen wat hij allemaal moet doen. Wij weten nu dat de fietser niet steunt op de wetten van Newton maar wel op regeltechniek waarmee hij (bijna) perfect de bocht kan nemen zonder één integraal of wiskundige formule uit te rekenen.

Dat verschil heb ik hier ook getracht aan te tonen, en tot een formulering te komen die veel eenvoudiger is en fysisch te begrijpen valt.

Wanneer gaat men in ons onderwijs eens beginnen na te denken dat op de manier men nu bezig is, men de leerlingen niet aan het voorbereiden is om in de werkelijke wereld goed te laten functioneren.

8.7 Een stuk draad verbonden met een stroombron

Wanneer een stuk draad verbonden is met een stroombron, en we veronderstellen dat deze stroombron er al een hele tijd aan verbonden is, we noemen deze conditie de regime toestand, dan zullen er evenveel (extra vrije) elektronen langs de ene kant van de draad bijkomen maar langs de andere kant ook even veel elektronen uit de draad verdwijnen. Vermits alle elektronen hetzelfde zijn, zijn er op elk ogenblik evenveel elektronenlading in het stuk draad als protonenlading en dus is de som van alle ladingen in dit stuk draad nog steeds gelijk aan nul. Of deze (vrije) elektronen zich zig-zag bewegen in de draad ofwel allemaal in dezelfde richting gaan maakt, op het eerst zicht geen enkel verschil. De draad blijft voor de buitenwereld volkomen neutraal. Met andere woorden, in regime toestand is er geen enkel verschil in de totale lading van de draad of er nu wel of niet een gelijkstroom (DC stroom) door de draad vloeit.

Wanneer er echter nog een andere draad parallel aan deze draad bevindt en ook doorlopen wordt door een DC stroom dan zal er (volgens de theorie van Einstein) er wel een extra kracht ontstaan in de richting van de stroom die, zoals reeds aangehaald gelijk is aan
$F_M = -\frac{Q_1.\Delta Q_2}{4.\pi.\varepsilon.R^2}[N]$ en hierin is $\Delta Q = Q\frac{v^2}{c^2}$. Maar dit verandert niets aan de DC stroom.

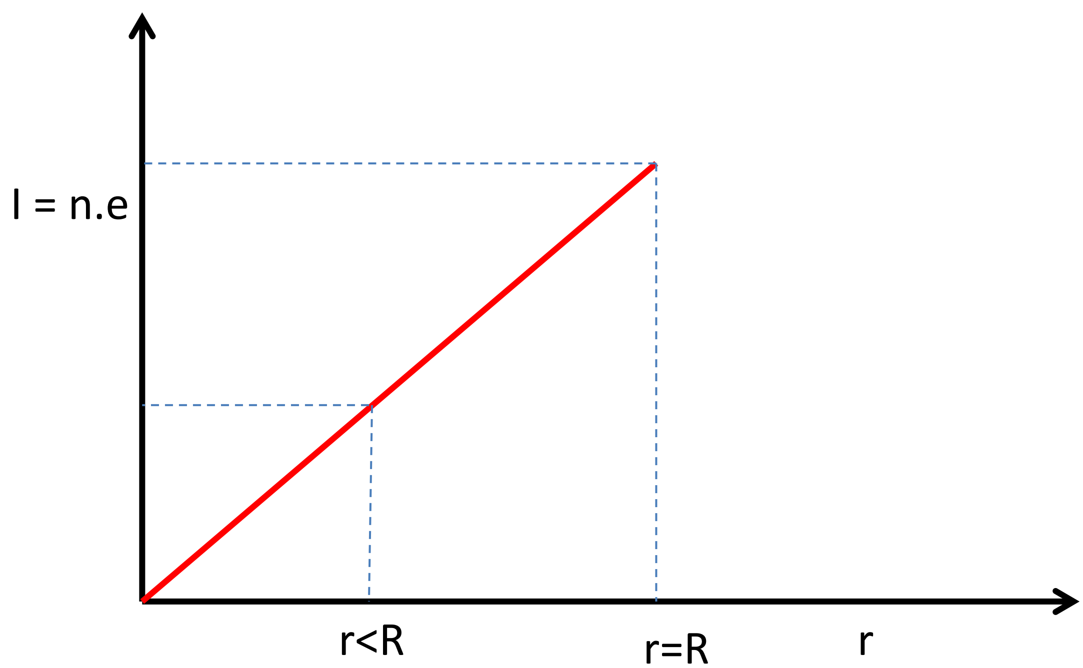
8.9 Een stuk draad verbonden met een veranderende- stroom of spanningsbron

Hier spreken we dus van een aantal extra elektronen die plotseling aan de ingang van de draad worden ingeduwd (door de plotseling aanschakelen van de stroombron) zonder dat er aan de andere kant van de draad iets verandert. De andere kant weet in de korte tijd $t = l/c$ niets van wat er gebeurt is aan de ingang van de draad.

De draad was neutraal, maar nu niet meer en een hoop elektronen worden, in eerste instantie gelijk over de ganse doorsnede van de draad verdeeld, er aan toegevoegd.

Maar elektronen die zich in een draad bevinden stoten elkaar af. Laten we dit visualiseren door een verticale doorsnede van een ronde draad. Dan zien we dat de elektronen aan de buitenkant meer tegenwerking krijgen van de vele elektronen aan de andere kant, en dus naar buiten opschuiven. Maar hierdoor wordt de afstand van de meer naar binnen gelegen elektronen groter tussen de elektronen die reeds naar buiten zijn opgeschoven. Dusdanig krijgt men een reactie dat vanuit het midden van de draad alle elektronen naar buiten beginnen te bewegen totdat er terug een evenwicht is bekomen tussen de afstotende krachten tussen de extra toegevoegde elektronen. Dit is te zien in Figuur 11.

Deze verplaatsing van elektronen naar de buitenkant gebeurt lineair, met ander woorden 0 in het centrum van de draad en maximum aan de rand van de draad, zoals afgebeeld in Figuur 10

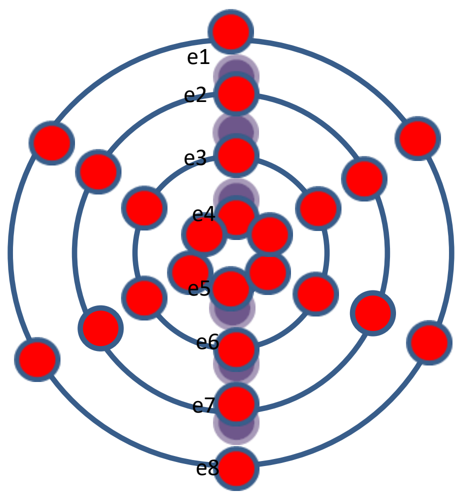


Figuur 10

Dit is in de literatuur beschreven als : “de grootte van het geïnduceerde elektrisch veld (of het magnetisch veld) in functie van de straal” of in formulevorm :$B = \frac{\mu.I.r}{2.\pi.R^2}$ waarin B het magnetisch veld voorstelt (wat dit eigenlijk voorstelt is mij niet duidelijk) en r de afstand is van het middelpunt tot een elektron en R de straal van de draad.

Nemen we daarentegen een doorsnede op een bepaalde afstand van het midden van de draad, dan zien we dat ieder elektron evenveel afstotende krachten van zijn naburige elektronen, links en rechts , krijgt die elkaar opheffen en dus de verplaatsing niet verstoren, en dus in de lengte richting van de draad de elektronen, waarvan er aan de buitenkant meer zijn dan aan de binnenkant vrij kunnen doorstromen.

Dit fenomeen houdt (geleidelijk) op te bestaan wanneer de toegevoegde elektronen ook de andere kant van de draad hebben bereikt en doorstromen naar de stroombron. De draad is dan in zijn regime toestand gekomen, en van dat ogenblik af zijn steeds in de draad evenveel elektronen ladingen als positronen ladingen, en de draad gedraagt zich als een neutraal stuk draad, zonder de minste verplaatsing van elektronen naar de buitenkant.



Figuur 11

We kunnen hieruit besluiten dat zolang er een verandering (vermeerdering of vermindering) van het aantal elektronen (dus stroom) aan de draad wordt toegevoegd de bijkomende elektronen zich verplaatsen naar de buitenkant van de draad. Maar eenmaal in regime toestand dit fenomeen ophoudt en de elektronen zich gedragen als vrije elektronen zij het dan soms in zig-zag vorm soms in een éénrichting vorm.

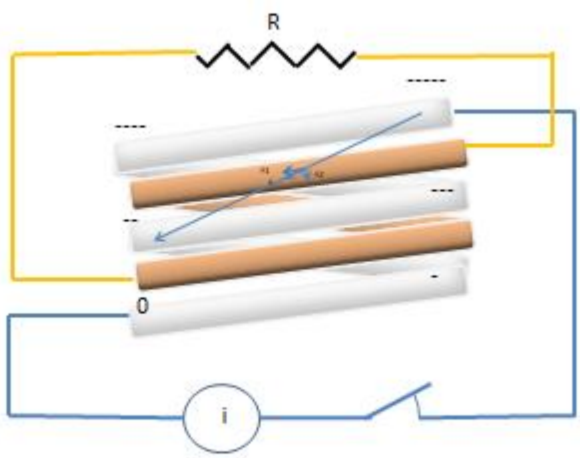
9. Wederzijdse inductie in transformator

De vraag die hier gesteld wordt is, hoe is het mogelijk dat er stroom kan ontstaan vanuit de primaire wikkeling, naar een secundaire wikkeling van een transformator waarvan de draden van de twee spoelen galvanisch van elkaar gescheiden zijn.

Laten we even een eenvoudige (lucht)spoel uitvergroten zoals te zien is in Figuur 12

Hierin is een stroombron , via een schakelaar verbonden met een primaire wikkeling (in het lichtblauw) bestaande uit drie wikkelingen. Een secundaire wikkeling is hiertussen gewikkeld (in het lichtbruin) bestande uit twee wikkelingen en verbonden met een weerstand.

Op het ogenblik dat de schakelaar gesloten wordt, worden er een hele massa extra elektronen in de draad ingeduwd. En slechts geleidelijk zullen deze elektronen zich verplaatsen in de draad met een snelheid gelijk aan $c = \frac{l}{t} = 300\ 000\ km/s$ of na een tijd $t = \frac{l}{c}$ zal na een afstand l (willekeurig stuk lengte van de primaire draad) de elektronen daar aangekomen zijn.



Figuur 12

Daardoor ontstaat er een spanningsverschil tussen het (bijvoorbeeld) begin van de primaire winding en een winding verder (aangeduid in Figuur 12 met ---- en -- elektronen lading). Daartussenin ligt een winding van de secundaire spoel. Maar vermits deze draad volkomen neutraal is (evenveel elektronen als protonen) zal deze secundaire draad niet in het minst reageren op om op de een of andere manier een stroom (verplaatsing van elektronen in een zijwaartse richting) te ondergaan.

Wat gebeurt er dan wel?

9.1 Een zender en ontvanger van radio signalen.

Iedereen kent een radio en weet dat een radio signaal wordt uitgezonden door en zender via een antenne en een radio ontvanger ontvangt een (zeer klein gedeelte) signaal op via zijn ontvangst antenne. Er is dus sprake van een overdracht van energie vanuit een zender naar een ontvanger welke volledig galvanisch van elkaar gescheiden zijn. Wel is waar dat veel van de uitgezonden energie verloren gaat (maar er kunnen ook duizenden ontvangstantennes verbonden worden aan die ene zender) en langs de andere kant als we de ontvangstantenne zeer dicht bij de zendantenne plaatsen wordt er ook veel energie overgedragen. (zelfs een gewone lamp kan branden wanneer deze in de omgeving van een FM radio zender staat). Dus er is misschien een grote overeenkomst tussen een transformator en een zender ontvanger.

9.2 Het zenden van fotonen bij verandering van elektronen in versnelde beweging.

Juist zoals in een zendantenne zullen er, ten gevolge van de extra beweging energie die de elektronen krijgen, er fotonen uitgezonden worden in alle richtingen, en de dichtheid zal afnemen met het kwadraat van de afstand.

Deze fotonen zijn energie partikels, massaloos en hebben geen lading en bewegen zich steeds rechtlijnig met de snelheid van het licht. Elk afzonderlijk foton heeft een energie die gelijk is aan $E = h.\nu$. Hierin is h de constante van Planck welke gelijk is aan $h = 6.63\ x\ 10^{-34}[J.s]$, en ν de frequentie van de wisselende versnellende en afremmende beweging van de elektronen (Met andere woorden, de frequentie van de aangelegde wisselstroom).

Dat deze frequentie gelijk is aan de aangelegde wisselspanning is een tamelijk moeilijk uit te leggen fenomeen, en heeft te maken met het" Bose-Einstein" meesleep effect. Dit fenomeen is te vergelijken met de frequentie van een laser die opgesloten zit in een buis (cavity), of een antenne waar de elektronen heen en weer bewegen van de voet van de antenne en de top van de antenne, en waar de uitgezonden fotonen een frequentie aannemen die gerelateerd is aan de fysische eigenschappen van het materiaal. Dit is uitvoerig beschreven in mijn document "AntenneStraling.docx").

Men beweert in de meeste boeken dat fotonen geen massa hebben, omdat ze anders niet met de snelheid van het licht kunnen voort bewegen, maar als volgens Einstein $E = m.c^2$ en volgens Planck de energie van een foton gelijk is aan $E = h.\nu$ waarin h de constante van Planck is en ν de frequentie dan is de massa van een foton gelijk aan $m = {h.\nu}/{c^2}$. en hiermee heb ik geen enkele moeilijkheid mee, en is meteen bewezen waarom licht (een hele hoop fotonen van een ster bijvoorbeeld) kan afgebogen worden door de nabijheid van een grote massa de zon bijvoorbeeld (simpel met de gravitatie wet van Newton).

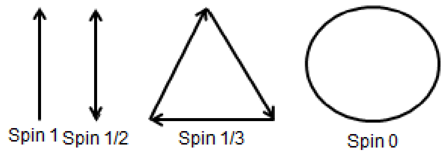
Hier in ons geval worden de elektronen heen en weer bewogen door de spanningsbron over de transformator, en volgen ook dit fenomeen zodat bij een voedings-transformator op het net, de frequentie van de fotonen gelijk is aan 50 Hz, maar in een HF-antenne transformator van bijvoorbeeld een FM-radio, de frequentie in de buurt van 100 MHz zal zijn.

9.3 De spin van een foton.

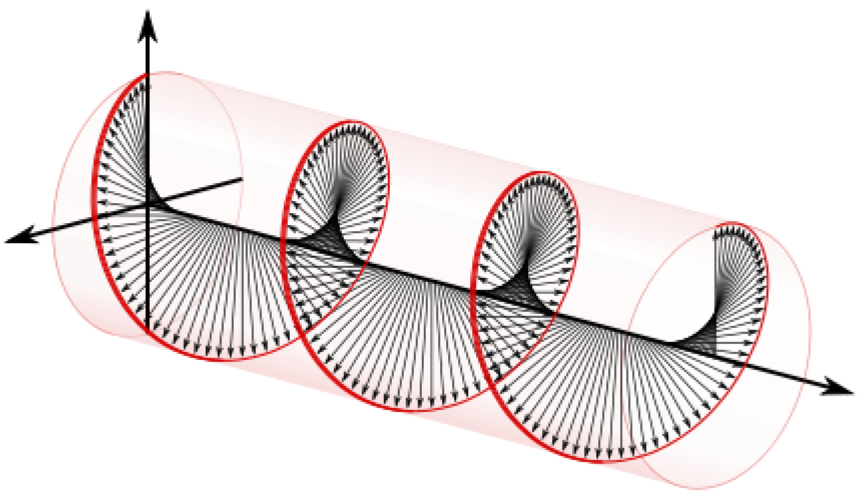
Waarover veel minder gesproken wordt maar in ons geval, voor het begrijpen wat er fysisch gebeurt , van fundamenteel belang is, is dat ieder elementair deeltje buiten zijn energie ook een "spin" bezit.

Dit is een nog veel moeilijker probleem, maar het "Stern-Gerlach" experiment bevestigt de voorspelling van het "Pauli" uitsluiting verbod. Wie er meer wil over weten moet maar op het internet "electron-spin" aanklikken.

Maar voor fotonen kunnen we, zeer sterk vereenvoudigd, dit als volgt voorstellen. De energie van een foton is een energie vector die ronddraait rond zijn as. (zoals voorgesteld in Figuur 14).De spin is gelijk aan 1, dat betekent dat slechts na een omwenteling van een volledige toer van de vector hetzelfde "beeld" verschijnt. In Figuur 13 zijn verschillende "vormen" getekend met een verschillende spin. Men ziet dat een ronddraaiende pijl zijn zelfde vorm laat zien na een volledige omwenteling. Deze bezit een "spin" van 1. Een recht stuk draad daarentegen zal na een halve toer reeds hetzelfde beeld vertonen . Deze bezit dus een spin gelijk aan ½ . Zo zal een driehoek na een derde gedeelte van zijn gehele omwenteling hetzelfde beeld laten zien, en bezit dus een spin gelijk aan 1/3.



Figuur 13



Figuur 14

Men moet dit echter in drie dimensies zien, en dan wordt de situatie nog veel ingewikkelder. Maar een foton gaat met de snelheid van het licht vooruit, hieruit volgt dat zijn spin niet in de richting van de voortgaande beweging kan bestaan anders zou de energie vector sneller kunnen gaan dan de lichtsnelheid. Daarom kan de spin alleen loodrecht draaien op de voortplanting beweging. Wel kan de vector links of rechts draaien (spin-1 of +1) en deze draairichting hangt af van de richting van de stroom.

Figuur 14, is een vector voorstelling van een foton. Deze figuur heb ik overgenomen van Quora op het internet, en stelt de foton vector voor in de drie dimensies (x, y en de voortplantingsrichting z)

9.4 Opnemen van fotonen in een neutrale draad.

Op analoge wijze, zoals in een radio antenne, zal ook in een stuk draad dat gebombardeerd wordt door een enorme massa van ronddraaiende energie fotonen, wanneer de vectoren naar (laten we zeggen) naar boven gericht zijn, de vrij elektronen in de neutrale draad een duwtje krijgen naar boven, zodat de elektronen in beweging komen. Een halve periode later zullen de fotonen hun energie afgeven in de tegenovergestelde richting en dus de elektronen in omgekeerde richting bewegen. Deze voortdurende uitwisseling van energie aan vrije elektronen gebeurt op een sinusoïdale wijze, zodat er ook een wisselspanning ontstaat aan de uiteinden van de secundaire draad.

Wanneer nu de secundaire draad verbonden wordt door een belasting (weerstand) dan zal er dus een (wissel) stroom lopen door de secundaire draad. Deze stroom loopt in dezelfde richting als in de primaire draad.

Noteer dat dit heen en weer verplaatsen van de elektronen in feite geen grote verschuiving van de vrije elektronen te weeg brengt. Deze elektronen verplaatsen zich niet meer dan ongeveer 0.1mm heen en weer. Moest dit veel meer zijn dan zou de draad roodgloeiend worden door de wrijvingskrachten.

9.5 Van een stuk draad naar een wikkeling.

Al wat tot nog toe verteld werd over de overdracht van energie tussen twee stukjes draad die dicht naast elkander liggen kan natuurlijk sterk versterkt worden als men de draden verlengen en ombuigen en bifilair wikkelen. Dit leidt dan tot de formule van inductie van een draad of wikkeling zoals in vorige hoofdstukken uitgelegd.

Er ontstaat dus een kracht tussen punt ---- en -- welke we kennen als $F = \frac{Q1.Q2}{4.\pi.\varepsilon.r^2}$. Maar deze krachtlijn gaat ook door de secundaire winding en zal dus ook een kracht uitoefenen op de vrije zig-zag bewegende elektronen. Deze kracht kan vectorieel gesplitst worden in neergaande kracht (F2) en een zijwaartse kracht (F1).Maar zoals hierboven uitgelegd kan een foton alleen een zijwaartse kracht uitoefenen in een linkse beweging of een rechtse beweging naargelang de richting van de stroom. Deze laatste kracht is er oorzaak van dat de vrije elektronen in de secundaire winding verder weg geduwd worden hetzij links hetzij rechts, tot ze uiteindelijk op het einde van de draad een stroom van elektronen veroorzaken in de weerstand.

Deze toestand blijft bestaan, maar vermindert geleidelijk totdat de eerst elektronen, de elektronen aan het uiteinde van de draad naar de stroombron hebben doorgeschoven. Vanaf dat ogenblik verkeerd de primaire winding in een toestand dat er evenveel elektronen de draad ingaan als er elektronen uitgaan. De draad bevindt zich dan in wat men noemt een regime toestand. Maar er is geen spanningsverschil meer tussen de uiteinden van de draad. De draad is in een volkomen neutrale toestand. Er gaan evenveel elektronen in de draad als er elektronen uit de draad gaan en dus is er geen verschil meer tussen het aantal protonen en elektronen.

Het gevolg hiervan is dat ook in de secundaire winding geen (Coulomb) kracht wordt geïnduceerd en de elektronen stroom stopt.

Wanneer men nu de stroombron omdraait gebeurt natuurlijk het tegenovergestelde en zal de stroom in de tegenovergestelde richting lopen.(gedurende een korte tijd).

Men kan echter deze elektronen stroom blijven onderhouden indien men regelmatig (en tamelijk snel afhankelijk van de grootte van de inductie van de spoelen) de stroombron continu om-poolt zodat steeds een wisselende stroom ontstaat.

9.6 Wederzijdse inductie.

Einstein heeft bewezen dat als twee draden parallel aan elkaar, die beiden door een (gelijk)stroom worden doorlopen een extra kracht veroorzaken in dezelfde richting als de afstand tussen de draden, en dus opgeteld worden met de normale krachten (Coulomb krachten) van ladingen tussen twee draden doorlopen met een stroom.

De totale kracht is dan $F_t = F_e + F_m$. Hierin is $F_e = Electrostatische\ kracht$ of met andere woorden de wet van Coulomb toegepast op elektronen en protonen in de twee naast elkaar gelegen draden en $F_m = Electromagnetische\ kracht$ dit is een extra kracht in dezelfde richting als de $F_e = Electrostatische\ kracht$ maar veroorzaakt door elektronen (of protonen) in beweging ten opzichte van elkaar, als gevolg van de relativiteit theorie (zoals uitgebreid uitgelegd in mijn document LRC).

Vermits er nog altijd evenveel elektronen zijn als protonen in de draad zal de F_e gelijk zijn aan 0, maar de F_m zal wel een kracht ontwikkelen omdat zij niet afhankelijk is van het aantal elektronen (of protonen) maar alleen afhankelijk van de elektronen (of protonen) in beweging. En alhoewel deze extra F_m veel maal kleiner is dan F_e namelijk $\Delta Q = Q\,\frac{v^2}{c^2}$ is deze extra kracht de enige die nog een bijdrage levert, tussen de bifilaire gedraaide draden van de transformator. Indien echter er een wisselspanning wordt aangelegd zal er steeds ook een spanningsverschil ontstaan tussen het begin van de draad en het einde van de draad. Dit veroorzaakt dus wel een $F_e = Electrostatische\ kracht$

Het is deze kracht die door de fotonen overgedragen wordt van de ene naar de andere draad. En deze kracht per foton is gelijk aan $F_{foton} = h.f$ waarin $f = constante\ van\ planck$ en $f = frequentie\ wisselspanning$.

Het aantal fotonen dat overgezonden wordt is gelijk aan de energie die de belasting in de secundaire wikkeling absorbeert, met andere woorden omzet in (b.v.)warmte energie in een weerstand.

Maar als er stroom loopt door de secundaire wikkeling zal deze op zijn beurt ook een fotonen stroom uitzenden naar de primaire wikkeling en deze energie is gelijk aan de geabsorbeerde energie in de weerstand, want het is dezelfde stroom vermits belasting en secundaire wikkeling in serie staan.

Nu is energie/seconde gelijk aan vermogen, en vermogen is spanning x stroom ($[W] = [V].[I]$).

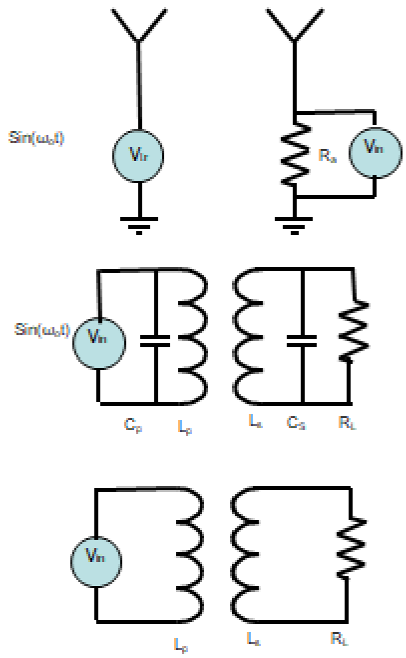
De belangrijkste vraag die moet gesteld worden is deze:

Hoe kan het dat door verkleinen van de belastingweerstand in de secundaire winding er meer stroom in de primaire winding ontstaat?

Er moet dus een antwoord komen van de secundaire wikkeling naar de primaire. Immers er ontstaat alleen een verandering in de secundaire wikkeling, door verandering van de belasting, die er de oorzaak van is dat er meer stroom uit de bron moet geleverd worden.

Om het eenvoudig te houden. Veronderstel dat het aantal wikkelingen in de primaire gelijk is aan het aantal wikkelingen in de secundaire, dan mogen we veronderstellen dat $V_p = V_s$ (Dit is hier strikt genomen niet bewezen) en veronderstel dat er geen verlies optreedt noch in de primaire wikkeling noch in de secundaire wikkeling, met andere woorden de weerstanden van de wikkeldraden zijn enorm klein ten opzichte van de impedanties, dit gebeurt door het aantal wikkelingen (n) zo groot te kiezen dat $L.\omega \gg R_{bel}$. Noteer dat bij definitie de inwendige weerstand van de wisselspanningsbron (bijna) gelijk is aan 0.

De verklaring is te vinden in de antenne theorie. Immers als een ontvangstantenne zeer dicht in de nabijheid staat van de zendantenne dan zal de ontvangstantenne, omdat er stroom vloeit in de afsluitende antenne impedantie, ook als zendantenne beginnen te functioneren en fotonen uitzenden, ook naar de zendantenne.



Figuur 15

Deze extra fotonen afkomstig van de ontvangstantenne , zijn in fase met de zendantenne wanneer ze met slechts een zeer minieme afstand van elkaar staan. Of vertaald in een transformator, wanneer de primaire wikkeling bifilaire gewikkeld is met de secundaire wikkeling.

Deze extra fotonen vanuit de secundaire wikkeling naar de primaire wikkeling zullen extra elektronen heen en weer doen bewegen in de primaire wikkeling zodat de spanningsbron extra stroom levert.

De weerstand van de bron is zeer klein (theoretisch gelijk aan 0) , zodat deze bron gelijk welke stroom kan leveren.

De belastingweerstand is niet gelijk aan 0 maar een bepaalde waarde (R) zodat de stroom die deze secundaire wikkeling kan produceren is ${V_s}/{R_{bel}} = I_s$ en dus het vermogen aan fotonen is dan $n.h.\frac{f}{s} = \frac{E}{s} = P = V_s.I_s$.

Het is nu nog maar een kleine stap om te bewijzen dat $V_p.I_p = V_s.I_s$, wat de overbekende formule is van een transformator.

9.7 Praktische formules voor transformators

Uit mijn document LRC hebben we kunnen bewijzen dat de inductie van een spoel gelijk is aan $L = \mu.S.n^2/d$. Hierin is $\mu = 1.26.10^{-6}[H/m]$ permeabiliteit constante, $S = doorsnede = \pi.r^2$, $n = aantal\ wikkelingen$, en $d = lengte\ van\ de\ wikkeling$.

Wanneer we nu eens twee wikkelingen in serie schakelen ($n_1 + n_2$). Dan kunnen we uit onze formule afleiden dat $n_1 = \sqrt{L_1.d/(\mu.S)}$ en $n_2 = \sqrt{L_2.d/(\mu.S)}$ en dus $n_1 + n_2 = \sqrt{L_1.d/(\mu.S)} + \sqrt{L_2.d/(\mu.S)}$. en noemen we $n_T = n_1 + n_2$ dan is $n_T{}^2 = (n_1 + n_2)^2 = \left(\sqrt{L_1.d/(\mu.S)} + \sqrt{L_2.d/(\mu.S)}\right)^2$ of uitgewerkt is $n_T{}^2 = \frac{d}{(\mu.S)}.\left(L_1 + L_2 + 2.\sqrt{L_1.L_2}\right)$ ofwel $n_T{}^2.\frac{\mu.S}{d}. = \left(L_1 + L_2 + 2.\sqrt{L_1.L_2}\right) \quad = L_T$

Wanneer we de tweede wikkeling omdraaien dan is. $L_T = \left(L_1 + L_2 - 2.\sqrt{L_1.L_2}\right)$

Dit wordt nog steeds onderwezen in alle leerboeken als de "wederzijdse inductie" $2.M = \sqrt{L_1.L_2}$ en gedefinieerd als $M_{12}.L_1 = \emptyset_2$ en $M_{21}.L_2 = \emptyset_1$, maar probeer dit maar eens fysisch in te beelden laat staan te begrijpen, alhoewel het is maar doodgewoon het gevolg dat de inductie verandert met het kwadraat van het aantal wikkelingen.

Verder kunnen we afleiden, indien de twee wikkelingen over dezelfde oppervlakte $S = \pi.r^2$ en over dezelfde afstand d gewikkeld zijn, maar met n_1 windingen voor L_1 en n_2 windingen voor L_2 (dus de draden bifilair gewonden) dat dan $L_1 = \mu.S.n_1^2/d$ en $L_2 = \mu.S.n_2^2/d$ zodat $\frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$.

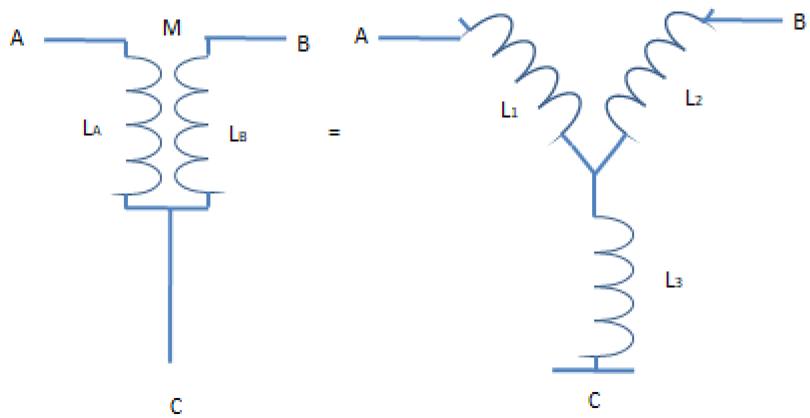
Verder kunnen we ook afleiden dat als de twee wikkelingen niet in serie staan maar afzonderlijk maar bifilair gewonden zijn dat dan $\Delta v_1 = L_1.\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$ aan de primaire zijde ofwel $\Delta v_1/\Delta i_1 = L_1/\Delta t$ dat is $Z_1 = L_1/\Delta t$ en zo ook aan de secundaire zijde $Z_2 = L_2/\Delta t$ en ook hieruit volgt dat $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$.

Nu is het vermogen (zonder verlies) aan beide zijden van de transformator gelijk. Waar anders zo het vermogen naartoe gaan als er geen verlies is?

Dus $P_1 = P_2$ ofwel $v_1.i_1 = v_2.i_2$ waaruit volgt dat ${v_1}/{v_2} = {i_1}/{i_2} = {L_1}/{L_2}$.

Houden we rekening met verlies en dus fotonen die verdwijnen in de ruimte, dan kunnen we dit voorstellen als $P_1 = v_1.i_1 + v_v.i_v$ waarin $v_v.i_v$ het verlies vermogen voorstelt. Stellen we ${v_v.i_v}/{v_1.i_1} = k'$ en $1 - k' = k$ dan kan dit verlies mee opgenomen worden in de formule. k noemt men dan de koppeling coëfficiënt.

Nu ga ik even Maxwell spelen en me geen fluit van aantrekken wat heel dit gedoe fysisch te betekenen heeft . Maar ik gebruik een gereedschap namelijk wiskunde en ***wiskundig*** gezien is deze transformator mogelijkerwijze ook voor te stellen als een driehoekschakeling zoals te zien is in Figuur 16



Figuur 16

Dan is $L_A + L_B \pm 2M = L_1 + L_2$

En $L_A = L_3 + L_1$

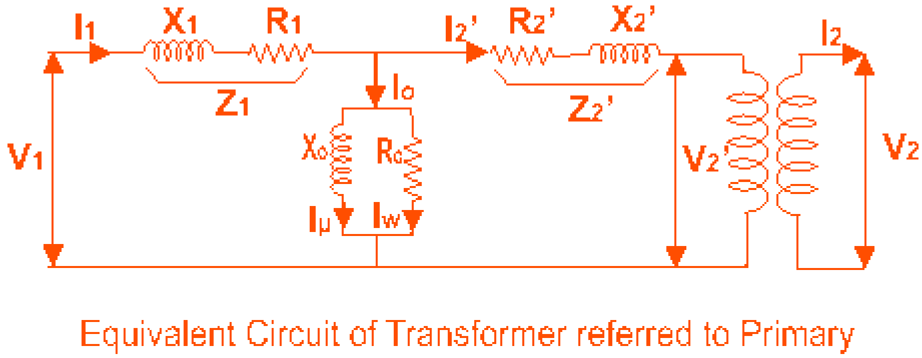
En $L_B = L_2 + L_3$

Dit zijn drie vergelijkingen waaruit, met wat algebra, kan vinden dat

$L_1 = L_A \pm M$, en $L_2 = L_B \pm M$ en ook $L_3 = \mp M$ waarin nog steeds $M = \sqrt{L_A . L_B}$

Voor de rest kan men dit nog aanvullen met wat weerstand van de draad in de primaire en ook secundaire wikkeling en een belasting aansluiten tussen B en C.

Indien het aantal wikkelingen in de primaire anders is dan in de secundaire wikkeling dan moeten we in de secundaire kant de belasting nog transformeren met een factor $\left({}^{n_1}/_{n_2}\right)^2$ en dat is dan de wiskundige voorstelling van een transformator die in alle (gedegen) documenten over transformators wordt gepresenteerd, zoals te zien inFiguur 17



Figuur 17

Ik heb nooit beweerd dat dit fout is, maar het is slechts een wiskundige simulatie, en zegt niets over de fysische werking van een transformator. Maar om gemakkelijker de componenten uit te rekenen is deze voorstelling wel bruikbaar.

10 Epiloog

In dit document heb ik getracht de fundamentele fysische principes uit te leggen. Als het ware in het vel te kruipen van een elektron en foton om dan proberen te volgen hoe deze elementen, die toch de fundamentele elementen zijn wat betreft de beweging en overbrenging van energie in de elektronica wereld, zich gedragen.

Van daaruit de formules af te leiden die we kunnen gebruiken om verder andere circuits uit te vinden.

Heel het verhaal steunt slechts op één geloofsbelijdenis namelijk de wet van Coulomb en het aannemen dat fotonen bestaan.

Magnetische veldlijnen samen met elektrostatische veldlijnen of mysterieuze definities als B = u.H uitgedrukt in Tesla zijn hier niet aan bod gekomen en ook heb ik geen beroep moeten doen op de wetten van Maxwell met zijn mysterieuze inductie stroom D om te verklaren waarom het licht direct aangaat als ik de schakelaar aanzet.

Naar het schijnt zou Albert Einstein eens gezegd hebben : “ Maak alles zo eenvoudig mogelijk, maar vereenvoudig niets”. Dat eerste gedeelte heb ik geprobeerd maar vereenvoudig niets is voor mij een onhoudbare kaart, en moet toegeven dat ik daar niet in gelukt ben.

Ik moedig alle lezers aan dit document nog eenvoudiger nog leesbaarder te maken zodat we na onze schoolbanken we niet gefrustreerd de wereld instappen met de overtuiging:” ik heb wel mijn diploma gehaald maar niet begrepen wat men mij verteld heeft”.

Jan Spaenjers