

Radio straling

1. De geloofsbelijdenis.

Iedereen heeft vandaag een GSM waarmee hij telefoneert, en velen hebben “wireless” verbindingen tussen de randapparatuur en de computer, en toch blijft voor de meeste mensen “radio-straling” een vaag begrip.

En dit is best te begrijpen, omdat we gedurende onze tijd dat we op de schoolbanken ons broek versleten, nooit een fatsoenlijke uitleg hebben gekregen van onze leraars. Meer nog, ik beweer dat (bijna) geen enkele leraar weet wat straling is. Maar geen enkele van de leraars heeft dit ooit durven zeggen en zij pretendeerden al maar door dat zij de wijsheid in pacht hadden.

En om de waarheid te zeggen, ik weet het ook niet, ik begrijp het ook niet helemaal. Maar ik ben niet alleen want ook dokters in de fysica, die op zoek zijn, in CERN (centre européenne pour la recherche nucléaire) naar de elementen van de natuur, beweren dat zolang we het graviton (Het deeltje dat verantwoordelijk is voor de zwaartekracht) niet gevonden hebben, we niet weten wat massa is. En vermits volgens Newton $F=m.a$ (kracht is massa maal versnelling) weten we dus ook niet wat kracht is!! Neen, we weten het niet!!!

Zook zolang we niet weten wat lading is zullen we niet begrijpen waarom de wet van Coulomb

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2} \text{ betekent.}$$

Natuurlijk is de definitie van lading (q) een hoop (n) bijeengevoegde elektronen, en als deze bewegen dan heeft men stroom.

Immers $q = n \cdot e$ en $q = i \cdot t$ of $i = q / t$ maar dat is alleen maar het probleem verschuiven en zich afvragen wat is dan de lading van een elektron (e)? Waarom is dat negatief? Waar komt het vandaan?

Maar de wet van Coulomb is het dogma van de elektronica. Je gelooft erin, en je hoopt dat iemand het kan uitleggen. Maar heel mijn leven heb ik met veel liefde aan elektronica gedaan en nooit spijt van gehad. Als dat geen geloofsbelijdenis is.

Een ander even interessant geval is een foton.

Een foton is een energiepakketje dat zich verplaatst in vacuum en in de lucht altijd met een constante snelheid (c), namelijk de snelheid van het licht ($c \approx 300.000 \text{ km/s}$)

Dit energiepakketje heeft geen massa, gaat altijd rechtdoor (in de vrije ruimte), wobbelt niet en heeft geen lading.

Dit is weeral een onbegrijpelijke definitie en gehoorzaamt zelfs niet aan de meest beroemde formule van Einstein $E = m \cdot c^2$!!! Want als de massa = 0 draait en keert het zoals je wilt maar dan is $E = 0 \cdot c^2 = 0$. En dan mag je nog komen aandragen dat dit in feite maar een statische energie

toestand is en dat in feite de formule van Einstein is: $E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$ en als $v = 0$ dan is

$E = m \cdot c^2$ maar als $v = c$ dan is $E = \frac{m \cdot c^2}{0} = \infty$ maar we weten met zekerheid dat de energie

niet oneindig groot is. En als ook m gelijk aan 0 is dan is $E = \frac{0 \cdot c^2}{0} = \frac{0}{0}$ dat theoretisch gelijk

welke waarde kan hebben. Wat is het dan wel??? De oplossing zou kunnen zijn dat m zeer, zeer klein is, maar dat heeft nog niemand kunnen berekenen of bepalen.

Maar ontegensprekelijk voelen we dat de zon warmte uitstraalt naar ons en zelfs elektronen doet wegspringen uit een rooster en elektrische stroom veroorzaakt in zonnepanelen. We zijn er van overtuigd dat het energie overbrengt. En Einstein beweert dat deze energiestroom veroorzaakt wordt door een storm van fotonen.

Ik ben nog geen bladzijde ver, en dit is nu al het derde onbegrijpelijk geval dat we tegenkomen. Als het foton niet op en neer beweegt, geen sinus-achtig verschijnsel is, maar alleen een massaloos bolletje voorstelt dat wat energie overbrengt, wat doet dat dan?

2. Energie van een foton

Planck heeft zelfs kunnen berekenen hoeveel energie zo een foton bevat, namelijk $E = h \cdot \nu$. Hierin is $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ de constante van Planck en ν is de frequentie van het uitgestraalde licht. Nu is de golflengte van het licht tussen $0,5$ en $0,7 \mu\text{m}$ en met de wetenschap dat $1 \mu\text{m}$ gelijk is aan $1/1.000.000 \text{ [m]}$ en $\nu = 300.000 \text{ [km/s]} / 0,6 \text{ [\mu m]} = 50 \times 10^{13} \text{ [Hertz]}$ dan is de energie van 1 licht foton gelijk aan

$E_{\text{lichtfoton}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s]} \times 50 \times 10^{13} \text{ [s}^{-1}] = 331,5 \times 10^{-21} \text{ [J]}$ wat een bijzonder klein getal voorstelt en dus impliceert dat er veel fotonen moeten de ether ingestuurd worden om bijvoorbeeld 1 Watt energie over te brengen. Dit aantal is $1 / 331,5 \times 10^{-21} \text{ [J]} = 3 \times 10^{24} \text{ [fotonen]}$.

Maar hoe moet ik die frequentie ν voorstellen, want een frequentie is normaal gezien toch in relatie met een sinus-achtige beweging (zoals het golven van het water wanneer men een steen in een poel gooit), terwijl een foton gewoon rechtdoor in de ether suist zonder de minste wobbeling.

Veronderstel dat een LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) één foton uitstoot en dan geen en dan terug één en dan geen enz. En dat dit uitzenden en niet uitzenden op een zeker ritme gebeurt n -fotonen per seconde, dan kan men van een eigen frequentie spreken (oscillatie) waarmee de LASER fotonen uitzendt namelijk n fotonen / s. En als m -roosters van de LASER materie dat allemaal op hetzelfde ogenblik doen, dus zonder phase verschuiving dan zullen er $m \times n$ fotonen / s uitgezonden worden met een bepaalde frequentie welke gelijk is aan $n / s \text{ [Hertz]}$. Men spreekt in dit geval van een "coherent licht" of een licht met een "coherente frequentie".

Voor een robijn LASER is deze frequentie gelijk aan rood licht en dus ongeveer $6 \times 10^{14} \text{ [Hertz]}$.

3. Een andere interpretatie van een energiepakket

De formule. $E = h\nu$ Kan men (wiskundig) ook voorstellen als de energie overdracht door een "elektrisch magnetische" golf, die zich rechtlijnig voortplant in de ruimte met de snelheid van het licht en een frequentie ν (eigen aan de materie) en waarvan de energie gelijk is aan het product $h\nu$. Maar het probleem is dan even groot als de voorstelling van een foton! Immers als een golf energie wil overbrengen dan moet er een "medium" zijn dat een massa moet hebben, een materiaal dat kan op en neer bewegen en/of links en rechts kan bewegen (zoals bv. De golven op het water, die de massa van het water nodig heeft, of trillingen in de lucht die de lucht verdichten of verdunnen, of trillingen door een metalen staaf, dat het rooster (de protonen) in het materiaal heen en weer doet bewegen. Maar een (licht)straal heeft geen massa!!!

Maxwell dacht er ook zo over en bedacht de "ether" dat hij voorstelde als een strak gespannen laken (materie) dat op en neer kan bewegen worden om de energie door te geven. Maar

Einstein bewees dat deze “ether” niet bestaat. Wat is nu juist en wat is fout, ik weet het niet en niemand weet het. Erger nog men heeft dan maar aanvaard dat er een “dualiteits principe” bestaat, soms zijn het golven en soms zijn het fotonen. Deze dualiteit van het wezen van een energie-pakket is nog steeds niet opgelost. Maar fotonen lijken mij een betere voorstelling dan golven vandaar deze ietwat persoonlijke interpretatie om radio-golven uit te leggen.

4. Verschil tussen licht en radio-golven

Vele boeken beweren dat straling is straling en dat er geen enkel verschil is tussen de stralen van de zon en de stralen van een radio-zender.

Zij vergissen zich.

1) Een radio-zender zendt een signaal uit van één bepaalde frequentie (de draaggolf bv. 100 Mhz). De zon zendt een heel spectrum van frequenties uit gaande van ver beneden infra-rood tot ver boven ultra-violet. De zon is dus een sterk vervuilde zender.

2) Een radio-zender zendt een signaal uit waarbij alle fotonen op hetzelfde moment in de ruimte worden geslingert, en op een ander moment geen enkele foton uitstraalt (Alle fotonen zijn in phase). (Coherente frequentie zoals een LASER doet). Bij zonnestrallen is dat niet het geval. Alle materiaal in de zon zendt zijn licht-frequentie uit zonder in phase te zijn met het materiaal dat juist er naast staat. Een LED (light Emitting Diode zendt één bepaalde frequentie uit maar niet in phase)

3) Het grootste verschil is dat de energie per foton dat uitgestraald wordt door de zon ongeveer 5.000.000 maal meer energie bevat dan een foton van een radio-zender. Immers we hebben hierboven gezien dat de energie inhoud van groen licht (maar ook van een LED of een LASER) ongeveer $300 \times 10^{-21} [J]$ bevat en doen we dezelfde berekening voor een radio-zender die uitzendt op 100 Mhz dan zien we dat $E_{radio} = 6.63 \times 10^{-34} [J.s] \times 100 \times 10^6 [s^{-1}] = 663 \times 10^{-28} [J]$ en delen de beide cijfers met elkaar dan zien we dat het licht foton ongeveer 5.000.000 keren meer energie bevat.

Dit enorm verschil in energie per foton heeft voor gevolg dat een licht foton die bv. Op een fotogevoelige plaat valt, een elektron kan losmaken uit het rooster van bv. fotopapier of een koperen plaat (of ander semi-geleidend materiaal zoals een foto-cel). Maar fotonen van een radio-zender kunnen dat niet, bijlange niet!! al mogen ze met nog miljoenen meer er aankomen.

Wat is dan een radiostraling, al lijkt het geweldig goed op een straling van een LASER, maar dat geen enkel elektron in een ontvangstantenne kan losmaken, laat staan in beweging brengen.

5. Verschil tussen eigenfrequentie van een antenne en van een element

Wanneer we spreken van het uitzenden van licht dan spreken we over een frequentie die eigen gebonden is aan de molculaire structuur van een element en hierdoor kunnen we met het onderzoeken van de spectrale lijnen in het licht bepalen welke elementen de straling veroorzaken. Met radiogolven spreken we over frequenties die ontstaan door de VRIJE elektronen die zich in een antenne verplaatsen. Deze opgewekte frequentie heeft dus niets te maken met de gebonden elektronen rondom de protonen en die door de een of andere grote energie toevoer in een hogere schil rond de kern zouden beginnen te draaien en bij terugval een foton uitzenden.

Men moet deze VRIJE elektronen beschouwen als een gas die zich vrijerlijk kunnen bewegen in een “cavity” een holte, een dunne buis waarvan de lengte gelijk is aan een even veelvoud of

even deelvoud van de golflengte (λ). Daarom spreken we van het uitzenden van fotonen door een $\lambda/2$ of $\lambda/4$ antenne. De fotonen zullen dus de karakteristieke eigenschap (frequentie) van de antenne uitsturen en niet van het koper of aluminium materiaal waaruit de antenne gemaakt is.

6. Straling van fotonen in een antenne

Telkenmale dat aan een elektron energie wordt toegevoegd, op welke manier heeft ten slotte geen belang, zal het VRIJE elektron deze energie absorberen en daardoor bijvoorbeeld een hogere snelheid verkrijgen. Eens die snelheid behaald zal het elektron geen energie meer nodig hebben en stuurt de verkregen energie uit onder de vorm van een foton.

Een foton in een zender wordt uitgezonden wanneer de **vrije elektronen** die zich in een antenne-draad bevinden, door **verandering in snelheid** veroorzaakt door de wisselspanning aangelegd aan de voet van de antenne. Hierdoor gaan de elektronen zich in een bepaalde richting naar de top van de antenne bewegen en daarna terug naar de bodem van de antenne. Vermits beweging van elektronen gelijk is aan stroomverandering zal er dus in phase stroom (i) en spanning (v) ontstaan verscheidene keren per seconde $v \times i = w$ (energie/sec) aan de elektronen worden toegevoegd.

(Noteer dat een goed afgestemde antenne zich als een Ohmse weerstand gedraagt. Zo heeft een $\lambda/4$ antenne een Ohmse weerstand van $36,5 \text{ Ohm}$)

De verandering in snelheid van de elektronen is veroorzaakt door de toevoeging van deze extra energie, en deze extra energie wordt omgezet in fotonen pakketjes. Met andere woorden, er worden zoveel fotonen uitgezonden als er bewegingsenergie is toegevoegd ($E = v \times i$). Of nog anders gezegd, een zender zendt n aantal fotonen uit per periode als er zendvermogen aan de antenne geleverd wordt.

Een zender van 1 Watt ($[W] = [J/s]$) die uitzendt op 100 Mhz (Studio Brussel bv.) zal gemiddeld een intensiteit (aantal fotonen per vierkante meter) uitzenden van $1[W]/h.v = 1/(6.63 \times 10^{-34} \times 100 \times 10^6) = 0.15 \times 10^{26} \text{ fotonen/s}$ en vermits de tijd van 1 periode gelijk is aan $1/v = 1/(100 \times 10^6)$ is het aantal fotonen per vierkante meter gedurende één periode gelijk aan $0.15 \times 10^{26} \text{ [fotonen/s]} / (100 \times 10^6) = 15 \times 10^{16} \text{ [fotonen/m}^2\text{/periode]}$.

$150.000.000.000.000.000$ fotonen, een getal om van te duizelen. Dit is de reden waarom men niet graag rekent met fotonen om de energieoverdracht aan te duiden, maar het geeft wel een duidelijk beeld wat er allemaal door de lucht aan fotonen stroomt.

Noteer als de spanning afneemt, ja zelfs negatief wordt, dan zullen er steeds minder vrije elektronen overblijven en zullen er ook geen of veel minder fotonen uitgezonden worden. Noteer dat een negatieve spanning eigenlijk maar een referentie is ten overstaan van een rooster waar er evenveel elektronen in voorkomen als protonen maar eigenlijk zouden we de nul lijn moeten leggen op een spanningsniveau waar er geen vrije elektronen meer aanwezig zijn in het materiaal (de koperen of aluminium draad van de antenne) zoals te zien is in **fig. 1**.

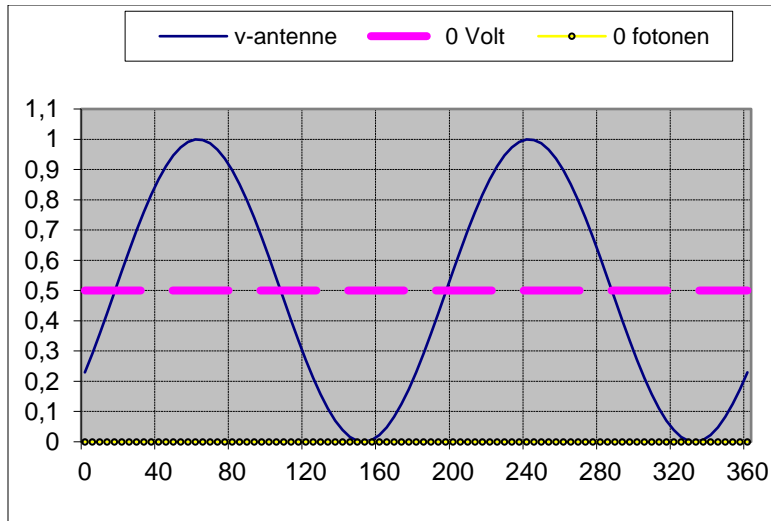


fig. 1

Als men dit voor ogen houdt dan pas ziet men klaar en duidelijk waarom fotonen, die geen lading hebben, toch de energie overdragen van elektronen die wel lading hebben, maar waarvan de stilstaande protonen geen enkele foton produceren.

De fysische voorstelling van zo een fotonenstroom is voorgesteld in volgende fig. 2. en lijkt op een aanzwellende en terug afnemende groep bijen.

Nogmaals leg ik er de nadruk op dat een negatieve fotonen stroom niet bestaat. Fotonen hebben geen lading, en daarom is het voor mij echt moeilijk om dit verschijnsel voor te stellen als een positief-negatief gaande Elektrisch veld en daarenboven nog een haaks daarop een positief-negatief gaande Magnetisch veld.

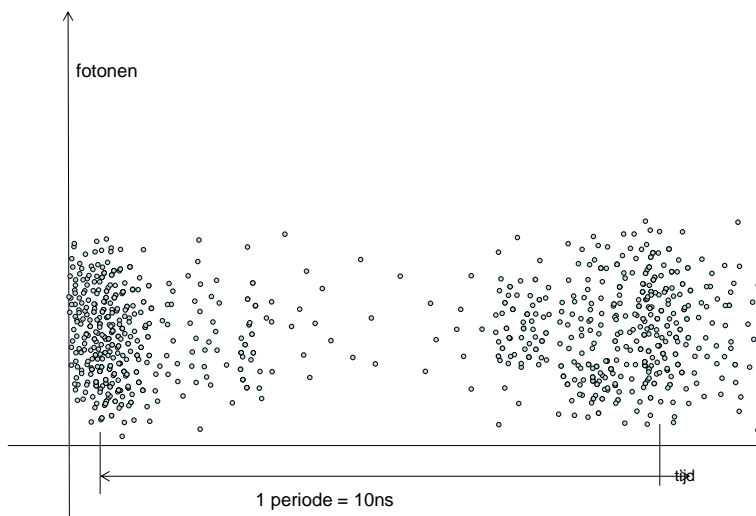


fig. 2

7. Waarom straalt een antenne en bv. een koperen plaat niet?

Een antenne is een afgestemde kring. Dat betekent dat een antenne een eigenfrequentie heeft, juist zoals een schommel of de slinger van een klok, en dat men eigenlijk maar weinig energie moet toevoegen om de slinger in gang te houden. Bij een schommel en slinger moet men energie toevoegen om de weerstand van het materiaal te compenseren, maar de energie in de slinger (potentiele en kinetische energie) is veel maal groter dan de toegevoegde energie. In een zendmast, hebben we gezien, is het verlies dat moet toegevoegd worden gelijk aan de energie die verloren gaat door het uitzenden van fotonen. Maar de bewegings energie van de elektronen is veel maal groter dan het uitgestraald vermogen. De verhouding hiervan noemt men de kwaliteitsfactor (Q) van het systeem. Dit gebeurt omdat wanneer de spanning wordt opgedreven aan de voet van de zendantenne de elektronen moeten opschuiven (zoals ik in een vorig artikel "Wat is de snelheid van de elektronen stroom in een koperdraad?" heb uitgelegd). Dit gaat ongeveer gelijk aan de snelheid van het licht namelijk $300.000.km/s$. Maar aan de top van de antenne kunnen de elektronen niet verder meer bewegen, en van de antenne mast vallen doen ze al evenmin. Er wordt dan een spanning opgebouwd en die veroorzaken dat de elektronen in de andere richting naar beneden tegen de nog aankomende elektronen gaan botsen. Tegelijkertijd vermindert de spanning aan de voet van de antenne zodat de terugkerende elektronen zelfs versneld naar beneden komen. Als dit op en neer gaan nu precies overeenkomt met het ritme dat de spanning op en neer gaat dan treedt er wat men noemt resonantie op. De antenne oscilleert.

En dit is de reden waarom een antenne straalt en een koperenplaat die niet de juiste afmetingen heeft bijna niet straalt.

Op gelijkaardige manier kan men voorstellen dat tussen de platen van een condensator er fotonen uitgezonden worden die de toevoer van elektronen op de ene plaat omzetten in een fotonenstroom naar de andere plaat (Wat Maxwell de inductiestroom noemt) maar de condensator platen zijn geen afgestemde kringen.

Men kan dit populistisch vergelijken met een lange rij mensen die staan aan te schuiven voor een gesloten poort. Wanneer van achter aan de rij geduwd wordt schuiven alle mensen op. Dit duurt een tijdje vooraleer de mensen aan de poort de druk beginnen te voelen en samengeperst worden. Deze oplopende druk op zijn beurt veroorzaakt een tegeovergestelde beweging van de rij als ook op dat ogenblik men niet meer duwt maar integendeel trekt aan de rij, dan begint de rij hevig heen en weer te bewegen, maar iedere persoon beweegt maar enkele passen heen en weer. Het zweet dat daardoor ontstaat verdwijnt in de omgeving maar is ontstaan door het extra energieverbruik van de mensen in de rij.

Bij een $\lambda/2$ dipool antenne hebben de elektronen zich juist een paar milimeter naar boven en dan terug naar beneden verplaatst in het ritme van de aangevoerde spanning. Nu is er een eenvoudig formuleetje dat zegt dat $\lambda = c / \nu$ of de golflengte (van een antenne) is gelijk aan de snelheid van het licht gedeeld door de frequentie. Voor een $100 Mhz$ zender is dus $\lambda / 2 = c / (2 \cdot \nu) = 300.000[km/s] / (2 \cdot 100Mhz) = 1,5m$. Een $\lambda/4$ whip antenne is een speciaal geval van $\lambda/2$ dipool antenne en heeft dus een lengte van $1,5 m / 2 = 0,75 m$ en dat is de normale lengte van onze antenne voor de FM-band.

Op enkele kilometers verwijderd van de zendmast ziet men de zender nog maar als een kleine stip. Men kan zich dus voorstellen alsof alle energie onstaat uit een minuscule kleine bol die zijn fotonen uitstraalt in alle richtingen. Men noemt zo een theoretische antenne een isotropische (naar alle kanten uitstralende) antenne. Zo een antenne kan men niet maken maar voor de zaken eenvoudig te houden is de voorstelling aannemelijk.

Dit betekent dat de fotonen zich verspreiden als een steeds groter wordende bol en de intensiteit of het aantal fotonen per vierkante meter zal verminderen evenredig met de oppervlakte van de bol. Nu is de oppervlakte van een bol gelijk aan $4 \times \pi \times r^2$ en bijvoorbeeld op een afstand van 1000 m zullen er nog maar $n / (4 \times \pi \times 1000^2)$ fotonen overblijven. Op een zekere afstand waar de ontvangstantenne staat ziet zo een stukje uit die bol praktisch gelijk aan een platvlak.

(Noteer dat $4 \times \pi \times r^2$ ook terug te vinden is in de formule van Coulomb.) Dit is voorgesteld in **fig. 3**

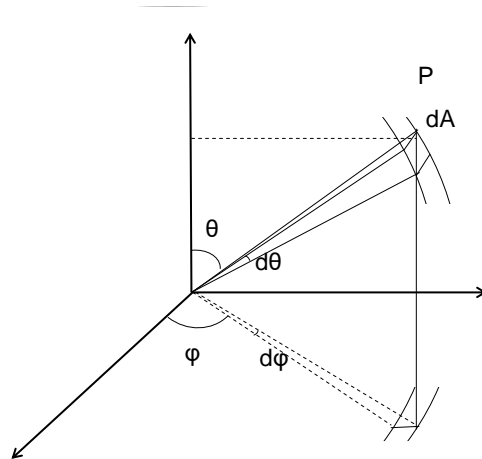


fig. 3

8. De ontvangst antenne

Een zendantenne of een ontvangstantenne is in principe hetzelfde. Met een goede zendantenne kan men evengoed ontvangen. Omgekeerd echter niet, maar dat komt omdat een zendantenne veel maal meer vermogen moet leveren dan een ontvangst antenne nodig heeft. Een dunne draad zal meer weerstand hebben dan een dikke draad. Maar de stroom door deze weerstand veroorzaakt alleen maar extra warmte, en om dit te vermijden zullen zendmasten steeds uit dikker materiaal bestaan dan ontvangstantennes.

Wanneer nu zo een groep van energiepakketjes in de omgeving van de antenne komt dan zal deze toegevoegde energie de VRIJE elektronen die zich in de antenne bevinden doen schommelen. De elektronen absorberen de fotonen en krijgen hierdoor een extra bewegings energie. Vermits deze elektronen zich in een afgestemde kring bevinden zullen de elektronen zich gaan bewegen op het ritme van de aanstormende fotonen en als deze fotonen aankomen in hetzelfde ritme als de afgestemde kring van de antenne dan gebeurt er precies zoals er gebeurt met een schommel of een slinger. De slingerbeweging van de elektronen gaat steeds groter

worden totdat deze afgeremd worden door allerlei wrijvingen die er steeds aanwezig zijn. Deze beweging van elektronen veroorzaakt een kleine stroom en dus op de ingang van een hoogfrequent versterker een kleine spanning die dan sterk kan versterkt worden zodat een voldoende hoge spanning bereikt is om verder behandeld te worden.

Met nadruk zeg ik hier dat de fotonen alleen invloed hebben op de VRIJE elektronen in de ontvangstantenne, en dat is over het algemeen ongeveer 1 elektron per kopermolecule, of 1 van de 29 elektronen die een kopermolecule bezit. De andere aan het rooster vasthangende elektronen worden door deze fotonen stroom onaangeroerd gelaten. Maar mispak je niet, het aantal vrije elektronen in een koperdraad per mm^3 is ongeveer $8,5 \times 10^{22}$. Ook weer een getal om van te duizelen.

9. Epiloog

Ik heb hier getracht op een vrij coherente manier het meest essentiële te vertellen wat eigenlijk straling voor mij betekent. In heel het verhaal is geen enkel ogenblik gebruik gemaakt van de wetten van Maxwell noch enig gebruik gemaakt van Elektische en Magnetische velden. Voor mij zijn dat puur mathematische modellen maar die niets vertellen over de natuurlijke fenomenen die zich afspelen tussen zender en ontvanger.

Maxwell heeft wiskundige formules samengesteld, die tot op vandaag nog steeds schijnen te kloppen, maar hij heeft niets fysisch uitgelegd. Zelfs meer, om het verschijnsel van de schijnbare stroom die door een capaciteit gaat heeft hij de "inductie stroom" uitgevonden. Maar zolang dat stroom gedefinieerd wordt als een beweging van elektronen zegt deze inductiestroom niets, daar er geen enkel elektron zich verplaatst van de enen plaat, waar de stroomdraad aan verbonden is) naar de andere plaat (waar de andere stroomdraad verder gaat). De elektronen verplaatsen zich alleen maar van de elektrische draden tot op de platen van een condensator, maar nooit tussen de platen van een condensator. Op de ene plaat worden er elektronen bijgevoegd en op dat ogenblik worden er op de andere plaat elektronen weg gezogen, of andersom.

Coulomb, Oersted, Faraday en al die andere pioniers van het magnetisme wisten niet dat er zoiets als fotonen bestonden en moesten dus een wiskundig model fabriceren dat leek op een gespannen laken dat heen en weer kon wiebelen. Maar dat is wiskunde maar geen fysica. Totdat Einstein met de stoute bewering kwam dat energie kan overgedragen worden door energiepakketjes die hij fotonen noemde. Dit was een duidelijke ommekeer in het denken over straling, en toch blijven we op de schoolbanken maar steeds opnieuw aandraven met de proef van de stroomdraad die een kompas doet bewegen of ijzerpoeder in cirkels rond de stroomdraad doet ontstaan zonder hierbij een fatsoenlijke uitleg te geven wat de oorzaak hiervan is.

Al de formules (Wet van Biot en Savart, Wet van Gauss, Wet van Ampere, Wet van Faraday, wetten van Maxwell kunnen evengoed uitgelegd en wiskundig beschreven worden met de algemene wet van Coulomb zoals op bladzijde 1 aangehaald, de relativiteits theorie van Einstein en het aanvaarden van het bestaan van fotonen.

Graag had ik hierover commentaar willen krijgen die, naar ik hoop, voor mij maar ook voor jullie nog beter inzicht verstrekt over dit mysterieus verschijnsel "straling van radiogolven" waar in de schoolboeken en zelfs in de literatuur zo weinig fatsoenlijk wordt over geschreven.

Jan Spaenjers.