



M.H. Trompstraat 6
3601 HT Maarssen
Nederland
Tel: + 31 (0) 346 284004
Fax: + 31 (0) 346 283691
Email: info@totech.nl
Web: www.totech.nl
KvK: 30169033
BTW: NL1731.97.863.B.01

De eindgevoede halve golf dipool (halve golf monopool). The Half-wave end-fed dipole (Half Wave monopole).

Eerste publicatie: 30 aug 2007

Versie 1.3, 25-feb-2009, Wim Telkamp

Dit document is slechts ter informatie geplaatst op de Website van TeTech en is bedoeld voor persoonlijk, niet commercieel gebruik. TeTech is niet aansprakelijk voor enige directe of indirecte schade voortvloeiende uit het gebruik van enig gegeven uit dit document. Kopiëren van dit document is toegestaan uitsluitend t.b.v. niet commercieel gebruik, mits in zijn geheel, ongewijzigd en voorzien van bronvermelding. Locatie <http://www.totech.nl/divers/HWmonopoleNL1.pdf>. Copyright (c) 2006-2009, TeTech.

Samenvatting.

Veel mensen zijn vertrouwd met de halve golf dipool. Zijn stralingsweerstand ($Re(Z_i)$) is niet erg afhankelijk van de stralerdikte. In diverse gevallen is voeden in het midden echter niet optimaal en dan biedt de halve golf monopool een oplossing.

De halve golf monopool (of eindgevoede dipool), heeft een stroomverdeling die nagenoeg overeenkomt met die van de middengevoede halve golf dipool. De stralingsweerstand ($Re(Z_i)$) is echter aanzienlijk hoger dan die van de halve golf dipool, en sterk afhankelijk van de stralerdikte (draaddikte) en lengte.

In dit document worden de eigenschappen van de halve golf monopool behandeld, de voordelen ervan als het aankomt op common mode aspecten en verliezen in ground netwerken. In diverse gevallen stelt de halve golf monopool minder strenge eisen aan (kunstmatige) ground.

De stralingsweerstand van de halve golf monopool kan variëren van grofweg 100 Ohm (dikke straler) tot 10 kOhm (dunne straler over grondvlak, bijv NVIS antenne). Indien in geval van een halve golf dipool de stralingsweerstand afneemt ten gevolge van obstakels (bijv grondvlak), dan neemt die van de halve golf monopool (of hele golf dipool) juist toe.

Vanwege de afwijkende impedantie ten opzichte van coaxiale kabels, en de hogere spanning in het voedingspunt, wordt ook aandacht besteed aan aanpassingsnetwerken en het afregelen van antenne en aanpassingsnetwerk. De afregelprocedure wijkt nogal af van die van de halve golf dipool.

Inhoudsopgave.

1. Inleiding.	4
2. Eigenschappen van de halve golf monopool.	5
2.1. De basisgedachte.	5
2.2. De Dipoolvarianten.	6
2.2.1. De halve golf dipool:	7
2.2.2. De hele golf dipool.	7
2.2.3. De halve golf monopool/dipool over grondvlak.	9
2.2.4. De halve golf monopool zonder grondvlak.	10
2.3. De verkorte halve golf monopool.	12
2.4. Enkele praktische voorbeelden.	13
2.4.1. Eindgevoede halve golf dipool voor 3.6 MHz (verticaal aan vlieger), 2mm draaddikte, over grondvlak.	13
2.4.2. Eindgevoede halve golf dipool (20mm dik) voor 145 MHz op mast.	14
2.4.3. Eindgevoede halve golf dipool (5mm dik) voor 2.45 GHz op relatief groot Aluminium grondplaatje.	14
2.5. Samenvatting halve golf monopool.	15
3. Eigenschappen van de halve golf monopool parallel aan een grondvlak.	16
3.1. Inleiding.	16
3.2. De karakteristieke impedantie van de lijn bij aanwezigheid van het grondvlak.	16
3.3. De stralingsweerstand ten gevolge van de aanwezigheid van het grondvlak.	18
3.4. Strips (Ribbon) of ronde geleiders.	19
3.5. Samenvatting eind gevoede halve golf dipool (of hele golf dipool) over grondvlak.	19
4. Common mode aspecten van de halve golf monopool.	21
4.1. Inleiding.	21
4.2. Stromen in de kwart golf "Ground Plane Antenne".	21
4.3. Stroomverdeling in de halve golf "Ground Plane Antenne".	24
4.4. Conclusie mantelstroom en halve golf monopoolstralers.	26
5. Afregelen en Aanpassen.	27
5.1. Inleiding.	27
5.2. Het bepalen van de stralerlengte.	27
5.3. Enkele praktische hints bij het meten van de common mode stroom.	29
5.4. Aanpassing.	30
5.5. Bandbreedte aspecten en "geavanceerde methoden".	33
6. Tips ten aanzien van het ontwerp van antenne en componenten, met nadruk op HF gebruik.	36

6.1.	<i>Isolatiematerialen en condensatoren.</i>	36
6.2.	<i>Spoelen.</i>	39
6.3.	<i>Gebruik van de formules.</i>	41
7.	Hoogspanningsaspecten.	41
7.1.	<i>Parallele platen condensator.</i>	41
7.2.	<i>Randeffect (Edge effect).</i>	43
7.3.	<i>Een rekenvoorbeeld 30pF/1kV condensator.</i>	46
7.4.	<i>Eindeffect bij draden (end-effects).</i>	46
7.5.	<i>Samenvatting:</i>	47
8.	Slot.	49

1. Inleiding.

De halve golf dipool is een veel gebruikte antenne, bij veel mensen bekend en goed gedocumenteerd. De impedantie bij resonantie bedraagt, afhankelijk van de lengte/diameter verhouding in orde van 40..65 Ohm waardoor deze makkelijk te gebruiken is met coaxiale kabels (mits een balun gebruikt wordt).

Er zijn echter ook veel gevallen waarbij asymmetrische voeding de voorkeur heeft. Denk aan sprietantennes gemonteerd op voertuigen of masten, draden gevoed vanaf een mast of hoog gebouw, halve golf patch antennes op PCB, etc. De kwart golf straler en sleeve dipool worden vanwege hun gunstige impedantie vaak gebruikt. Aan de kwart golf straler kleeft het nadeel van de "mantelstroom" (common mode stroom, retourstroom). Deze is even groot als de voedingstroom en straalt. De uiteindelijke eigenschappen van de gehele antenne zijn daardoor sterk afhankelijk van hoe de retourstroom loopt (via grondvlak, zijradialen, kabelmantel, behuizing, etc).

De halve golf monopool (of eindgevoede dipool) is een alternatief. Door de hogere ingangsimpedantie is de voedingstroom lager en daarmee ook de retourstroom. Deze kan zo laag zijn, dat het niet bezwaarlijk is om deze via de kabelmantel of mast te laten lopen (zoals bij de halve golf verticale spriet voor CB [27 MHz band], "ringo" antenne en de J-pole [voor 2m]).

Doordat de stroomverdeling in de halve golf monopool nagenoeg gelijk is aan die van de halve golf dipool en het aandeel van de mantelstroom meestal klein is, is het stralingsdiagram (en daarmee de gain) nagenoeg gelijk aan die van de halve golf dipool.

In tegenstelling tot de halve golf dipool, is de ingangsimpedantie van de halve golf monopool sterk afhankelijk van de dikte van de straler en is de benodigde verkortingsfactor groter dan van een even dikke dipool. In bepaalde gevallen is de bandbreedte in orde van 30% groter (ten opzichte van een halve golf dipool).

Dit document behandelt de halve golf dipool en verschaft informatie ten behoeve van experimenteren en ontwerp van halve golf monopool antennes.

2. Eigenschappen van de halve golf monopool.

2.1. De basisgedachte.

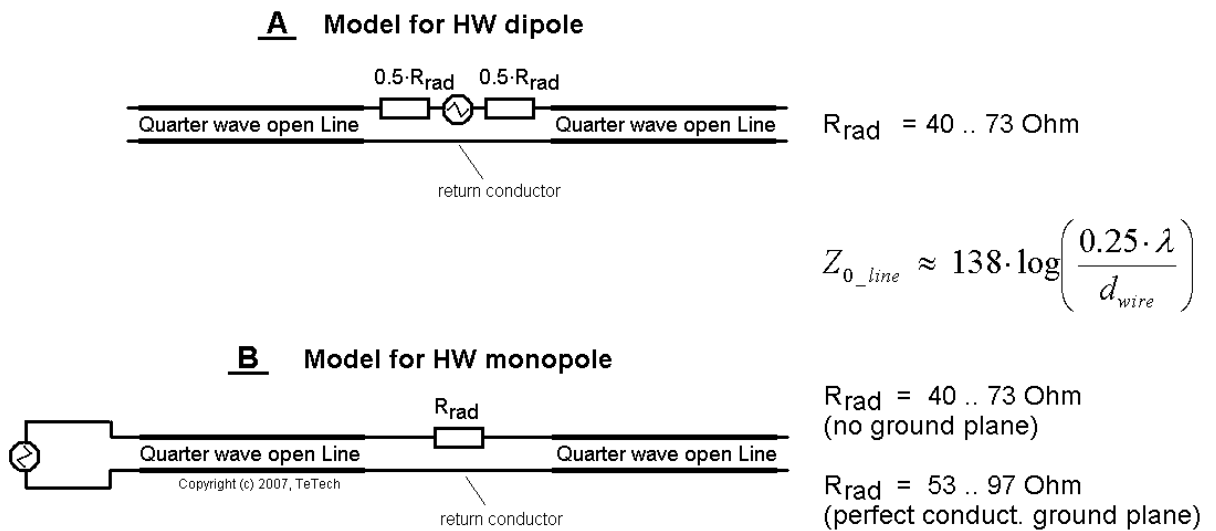
De Halve Golf dipool kan men zien als twee stukken verliesgevend transmissielijn (met lengte 0.25λ) waartussen zich de signaalbron bevindt, In figuur 1A is dit weergegeven. De verliezen in de lijnstukken ontstaan door straling en zijn gemodelleerd als $0.5 \cdot R_{rad}$. De karakteristieke impedantie komt overeen met die van een coaxiale kabel met een buitendiameter van 0.25λ en binnendiameter gelijk aan de diameter van de geleiders waaruit de dipool is opgebouwd. De diameter van de denkbeeldige coax structuur is gebaseerd op de uitbreidingsafstand van de het reactieve E- en H-veld.

In werkelijkheid is er geen retourgeleider zoals in de figuur getekend is (return conductor). De E-veldlijnen steken rechtstreeks over van het linkerlijnstuk naar het rechterlijnstuk en het H-veld loopt om de geleiders heen.

In figuur 1B is de situatie voor de eindgevoede dipool weergegeven (halve golf monopool). Deingangsimpedantie bij resonantie (dus reëel) kan men vinden m.b.v. de kwart golf transformator formule ($R_i \cdot R_{rad} = Z_0^2$), zie ook figuur 1C. Zolang R_{rad} niet wijzigt, verandert ook de Q factor van de transmissielijnresonator niet.

De Z_0 van de lijn bedraagt in orde van honderden Ohms terwijl R_{rad} in orde van 40..73 Ohm bedraagt. De bron in figuur 1B zal daardoor een reële impedantie zien $\gg 50$ Ohm (formule figuur 1C). Dit verklaart onmiddellijk de hogeingangsimpedantie van de halve golf straler (of hele golf dipool). Het gedrag van een halve golf resonator (of kortgesloten kwart golf resonator) komt overeen met dat van een parallelresonantiekring (voor niet te grote afwijkingen van de resonantiefrequentie).

Transmission Line Model for Half-Wave monopole and Half-Wave Dipole



The Transmission lines do not radiate. All radiation effects are in the radiation resistance.

HW monopole input impedance can be found with the Quarter Wave transmission line transformer formula ($Z_I \cdot Z_L = Z_0^2$):

C

$$Z_{Res_HW_monopole} = \frac{(Z_{0_line})^2}{R_{rad}} \quad Q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{Z_{0_line}}{0.5 \cdot R_{rad}}$$

Please note: R_{rad} can change significantly because of presence of (for example) a groundplane parallel to the antenna (as with NVIS antennas). This affects both Q (so Bandwidth) and input impedance.

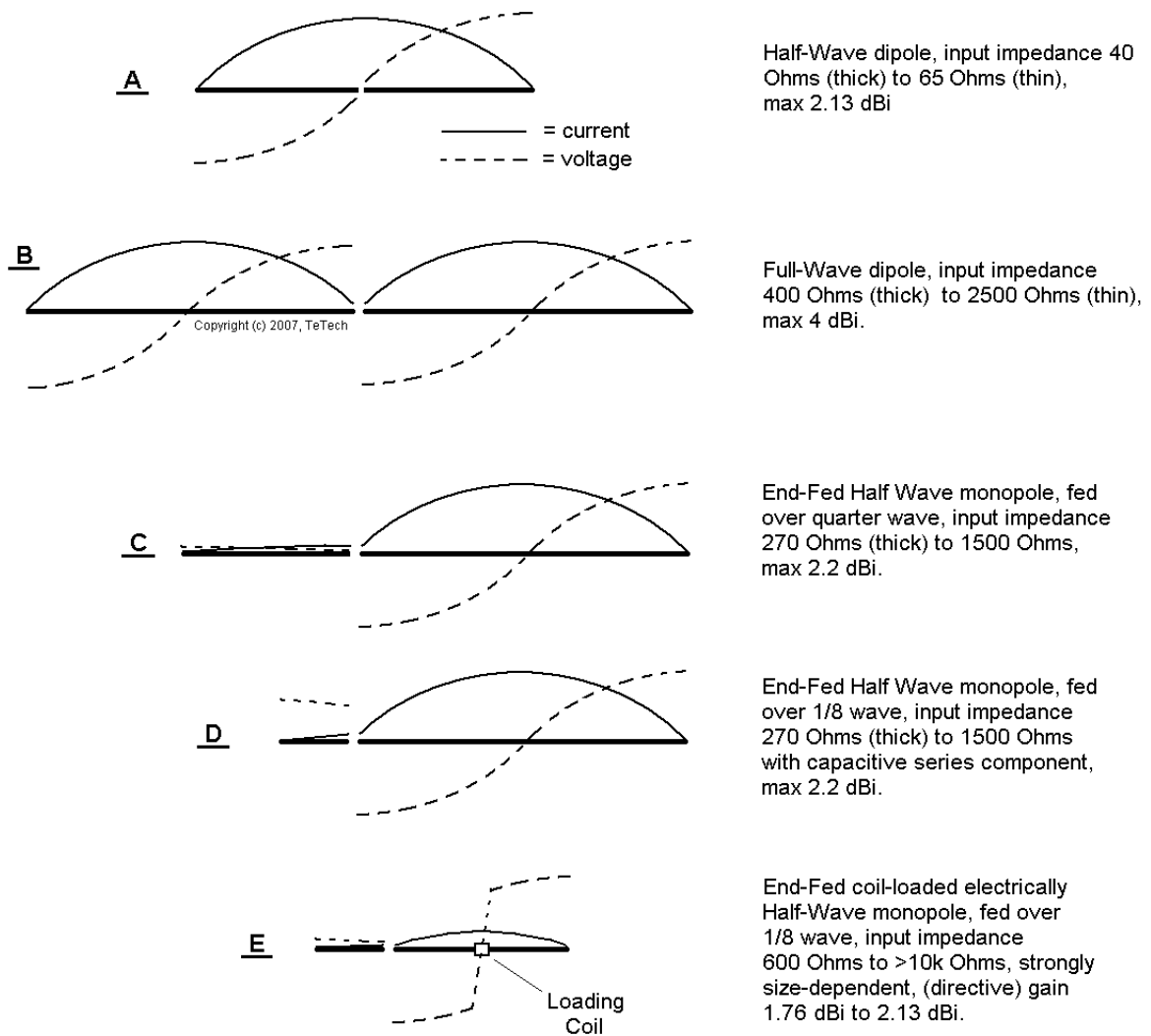
Figuur 1: Transmissielijnmodel voor halve golf dipool en halve golf monopool.

2.2. De Dipoolvarianten.

We kunnen in het kader van de halve golf monopool 4 varianten onderscheiden:

1. De halve golf dipool
2. De hele golf dipool
3. De halve golf dipool/monopool over grondvlak
4. De halve golf dipool/monopool zonder grondvlak

current/voltage distributions of various wire antennas



Figuur 2: Stroomverdeling voor diverse draadantennes.

2.2.1. De halve golf dipool:

De stroomverdeling is weergegeven in figuur 2A. voor verdere behandeling wordt verwezen naar: <http://www.tetech.nl/divers/NVISantenneNL1.pdf>.

2.2.2. De hele golf dipool.

Figuur 2B toont de stroomverdeling. Twee dicht bij elkaar geplaatste halve golf dipolen hebben dezelfde stroom- en spanningsverdeling en daarmee hetzelfde stralingsdiagram en gain (4 dBi) als een hele golf dipool. Door de capacitieve koppeling tussen de einden in het midden, moet men ze t.b.v. resonantie wel ietsje korter maken dan een vrijstaande halve golf dipool.

Door het bij elkaar plaatsen van de twee dipolen neemt de stralingsweerstand van de beide dipolen met ongeveer 30% toe. De lijnimpedantie (Z_0) blijft gelijk waardoor de bandbreedte met 30% toeneemt (ten opzichte van de halve golf dipool, zie figuur 1C). Het bandbreedte voordeel verdwijnt indien de dipolen verder uit elkaar geplaatst worden (bijv zoals bij een 1.25λ dipool).

Voor de ingangsimpedantie geldt bij benadering (d is diameter van antennegeleiders, Q = kwaliteitsfactor van de hele golf dipool):

$$Z_{Res_FWdip} \approx 460 \cdot \log^2\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right) \quad [Ohm]$$

$$Q_{FWdip} \approx 2.7 \cdot \log\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right) \quad []$$

Deze formules zijn bepaald door gebruik te maken van het basisprincipe (dipool stralingsweerstand en kwart lambda transformator formule). Met bovenstaande formules kan men een LCR equivalent opzetten (alleen geldig rondom de resonantiefrequentie). Figuur 3 toont het LCR equivalent. Aan de hand van de Q-factor, Z_{res} en centerfrequentie kan men L en C bepalen (zie figuur 3 voor de formules).

Met behulp van:

$$BW_{vswr=2} = 0.71 \cdot \frac{f_0}{Q} \quad [Hz]$$

geldt voor de relatieve bandbreedte:

$$\frac{BW_{FWdip, VSWR=2}}{f_c} \approx \frac{0.27}{\log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot d}\right)} \quad [Hz / Hz]$$

Opmerking:

Bij deze formules is uitgegaan van een dipoolimpedantie bij voeden in het midden van 60 Ohm (voor een enkele vrijstaande dipool). Dit is een gemiddelde waarde. Indien men echter zeer dikke stralers heeft, zijn deze aanzienlijk korter dan 0.5λ . Het gevolg is dat het product van lengte-stroom aanzienlijk lager is. Er wordt dus minder veld geproduceerd en daardoor minder vermogen uitgestraald. Dit leidt tot een lagere dipoolimpedantie dan 60 Ohm.

Het gevolg is dat in werkelijkheid de eindgevoede impedantie en Q-factor hoger uitvalt (dan op grond van de resultaten met deze formules, zie formules in figuur 1C). De ontwerper dient daar rekening mee te houden indien hij antennes ontwerpt waarvoor $le/d < 100$ (of $le/d < 50$ voor monopool) is.

Andersom zal voor een antenneontwerp met zeer grote le/d de bandbreedte en impedantie (op basis van deze formules) iets te laag uitvallen.

Omwille van de overzichtelijkheid van de formules is besloten om de variatie in dipoolstralingsweerstand als functie van de feitelijke resonantielengte niet in de formules op te nemen.

Ten gevolge van eindeffect is de resonantielengte ietwat korter dan de vrije veld golflengte. Onderstaande formule kan men als indicatie gebruiken voor de daadwerkelijke (elektrische) lengte van de hele golf dipool.

$$\frac{l_{FWdipole}}{\lambda} \approx 1 - 0.093 \cdot \frac{1}{\sqrt{\log(l_e/d_{wire}) - 1.2}}$$

In tegenstelling tot eerdere formules, is bovenstaande indicatieve formule een "curve fitting" over grafische resultaten volgens methode Hallén en gegevens uit "Experimentally Determined Impedance Characteristics of Cylindrical Antennas", G.H. Brown, O.M. Woodward, jr. Deze formule is bruikbaar voor $l_e/d > 18$ en voor niet geïsoleerde geleiders.

De daadwerkelijke lengte wordt beïnvloed door de afstand tussen de twee uiteinden en de manier van voeden en aanwezige isolatie. Bij uiteinden die zeer dicht bij elkaar zitten, dienen de dipoolhelften verder ingekort te worden.

Als u deze formules gebruikt voor een monopool over oneindige grond, is de ingangsimpedantie de helft en dient u de monopool lengte ($l_{e_{monopole}}$) te verdubbelen alvorens in te vullen in de lengtecorrectie formule, zie volgende paragraaf

2.2.3. De halve golf monopool/dipool over grondvlak.

Als we uitgaan van een goed geleidend grondvlak, kunnen we gebruik maken van spiegeltheorie/symmetrie. Een helft van de dipool wordt vervangen door het grondvlak. Het stralingsdiagram en stroomverdeling blijven gelijk. Alleen vervalt de straling beneden / achter het grondvlak. Over een oneindig goed geleidend grondvlak bedraagt de gain 7 dBi.

Voor de ingangsimpedantie geldt:

$$Z_{Res_HWmonoGND} \approx 230 \cdot \log^2\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right) \quad [Ohm]$$

De Q factor bedraagt:

$$Q_{HWmonoGND} \approx 2.7 \cdot \log\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right) \quad []$$

De relatieve bandbreedte bedraagt:

$$\frac{BW_{HWmonoGND, VSWR=2}}{f_c} \approx \frac{0.27}{\log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot d}\right)} \quad [Hz / Hz]$$

Onderstaande empirische formule kan men gebruiken als indicatie voor de elektrische lengte van de halve golf monopool (bruikbaar voor $le/d > 9.5$):

$$\frac{le_{HWmonoGND}}{0.5 \cdot \lambda} \approx 1 - 0.093 \cdot \frac{1}{\sqrt{\log(2 \cdot le/d_{wire}) - 1.2}}$$

De monopool/dipool discussie.

Kijkende naar het uiterlijk, is sprake van een monopool. Kijk je echter naar de ladingsuitwisseling/stroomverdeling, dan vindt ladingsuitwisseling voornamelijk plaats tussen de onderzijde en bovenzijde van de monopool (hoogste stroom in het midden, net als bij een halve golf dipool). De ladingsuitwisseling met het grondvlak is gering. Voor dunne halve golf monopolen is de stroom welke naar het grondvlak gaat in orde van een factor 5 lager dan de stroom in het midden van de antenne. Elektrisch gezien kan men daardoor spreken van een eindgevoede dipool.

2.2.4. De halve golf monopool zonder grondvlak.

Figuur 2C geeft de stroomverdeling weer van een eindgevoede dipool waarbij in plaats van een grondvlak een kwart golflijnstuk toegevoegd is. De linkerzijde van de bron kijkt in een laagohmige impedantie (in orde van 35 Ohm), terwijl de rechterzijde de hoogohmige eindgevoede dipool ziet.

De stroom door het kwartgolfstuk is in de praktijk veel lager dan de stroom in het midden van de halve golf straler. Dit kwartgolf stuk beïnvloedt het stralingsdiagram van de dipool nagenoeg niet. Het stralingsdiagram van deze constructie komt daardoor nagenoeg overeen met dat van een halve golf dipool (en niet met dat van een hele golf dipool). De stralingsweerstand bij in het midden voeden van de halve golf dipool blijft gelijk aan die van een dipool zonder het (dan losse) kwartgolf stuk links van de halve golf dipool. De ingangsimpedantie en Q factor is wat hoger (ten opzichte van de halve golf monopool over grondvlak).

De formules:

$$Z_{Res_HWmono} \approx 310 \cdot \log^2\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right) \quad [Ohm]$$

$$Q_{HWdip} = Q_{HWmono} \approx 3.6 \cdot \log\left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d}\right)$$

De bandbreedte volgt uit:

$$BW_{vswr=2} = 0.71 \cdot \frac{f_0}{Q} \quad [Hz]$$

De relatieve bandbreedte bedraagt:

$$\frac{BW_{HWmono, VSWR=2}}{f_c} \approx \frac{0.20}{\log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot d}\right)} \quad [Hz / Hz]$$

Onderstaande empirische formule kan men gebruiken als indicatie voor de elektrische lengte van de halve golf monopool (bruikbaar voor $le/d > 9.5$):
Bij gebruik van een mast zal de lengte iets groter uitvallen:

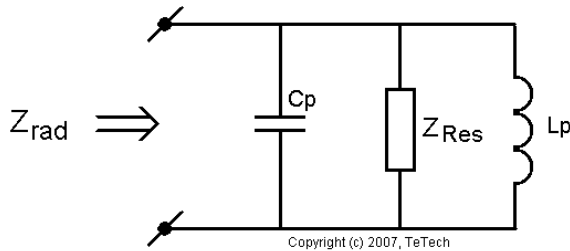
$$\frac{le_{HW_monop}}{0.5 \cdot \lambda} \approx 1 - 0.093 \cdot \frac{1}{\sqrt{\log(2 \cdot le/d_{wire}) - 1.2}}$$

Tegencapaciteit.

Om de eindgevoede halve golf dipool (monopool) goed te laten werken is een tegencapaciteit vereist. Als de bron op zijn rechteraansluiting momentaan 1A levert, moet er links van de bron 1A naar binnen gaan. Zolang de impedantie van de linkertak maar veel kleiner is dan die van de halve golf monopool, is er niets aan de hand. Figuur 2D toont de stroomverdeling voor een tegencapaciteit (counterpoise) van 0.125λ . De stroom in de linkertak is even groot, alleen de spanning is toegenomen vanwege de hogere impedantie (capacitief) ten opzichte van de 0.25λ tegencapaciteit.

Circuit Model for Half-Wave Monopole and Full-Wave Dipole

Impedance, Quality factor (Q) and Bandwidth relations for the HW monopole, HW monopole over infinite Ground and FW dipole.



$$Z_{Res_HWmono} \approx 310 \cdot \log^2 \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d} \right)$$

$$Z_{Res_FWdip} \approx 460 \cdot \log^2 \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d} \right)$$

$$Z_{Res_HWmono_infGND} \approx 230 \cdot \log^2 \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d} \right)$$

$$Q_{HWdip} = Q_{HWmono} \approx 3.6 \cdot \log \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d} \right)$$

Z_{res_xx} has a real (Ohmic) value
HW = half-wave, FW = full-wave

$$Q_{FWdip} = Q_{HWmono_infGND} \approx 2.7 \cdot \log \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d} \right)$$

$$BW_{VSWR=2} = 0.71 \cdot \frac{f_c}{Q}$$

Quality factor relations for the parallel resonant circuit.

$$Q_{PAR} = \frac{Z_{RES}}{X_P} = \frac{Z_{RES}}{\omega \cdot L_P} = \omega \cdot Z_{RES} \cdot C_P$$

Note:

Total antenna impedance (Z_{ant}) is sum of radiator impedance (Z_{rad}) and ground system impedance (Z_{gnd}). With a half-wave radiator it is mostly easy to realize $Z_{ant} \gg Z_{gnd}$, so $Z_{ant} \approx Z_{rad}$.

The formulas do not account for ground or other objects parallel to the radiator (as in a horizontal oriented dipole close to ground, for example NVIS antennas).

Figuur 3: LCR model voor hele golf dipool en halve golf monopool.

2.3. De verkorte halve golf monopool.

Het verkorten van een halve golf dipool heeft tot gevolg dat de stralingsweerstand afneemt en dat een inductie en/of capacatieve eindplaten nodig zijn om het geheel in resonantie te krijgen. Figuur 2E geeft de stroom- en spanningsverdeling weer van een verkorte halvegolf monopool met spoel in het midden.

Om de symmetrie te handhaven, dienen spoelen en/of helix constructies symmetrisch ten opzichte van het midden van de dipool/monopool geplaatst te worden. Stel dat

men de spoel uiterst links (figuur 2E) aanbrengt, dan ontstaat een geheel andere stroomverdeling welke niet meer lijkt op die van een verkorte dipool.

De stralingsweerstand (verliezen niet meegerekend), hangt af van hoe de stroomverdeling langs de dipool is. Als vuistregel kan men aanhouden:

Als de stralingsweerstand in geval van voeden in het midden met een factor 2 afneemt, neemt de stralingweerstand in geval van voeden aan het eind met een factor 2 toe.

Dit volgt ook uit de kwartgolf transformatieformule. Op basis van een LCR model kan men ook zien dat de resonantie-impedantie van een parallelkring toeneemt als eventueel verlies in serie met L of C afneemt.

De hoge stralingsweerstand kan problemen opleveren met het voeden van de antenne. De ontwerper dient kritisch te kijken naar mogelijke diëlectrische doorslag en diëlectrische verliezen.

Voor wat betreft de bandbreedte kan men aanhouden:

Verdubbeling van stralingsweerstand in geval van voeden aan het eind, geeft halvering van bruikbare bandbreedte.

De verkorte halve golf monopool gedraagt zich hierin niet anders als de verkorte halve golf dipoolvariant.

Ohmse verliezen in de verkorte halve golf dipool leiden tot een toename van de totale ingangsimpedantie (=Rrad+ Rloss). Bij de Halve golf monopool leiden ohmse verliezen juist tot afname van de totale ingangsimpedantie. Dit kan men afleiden met behulp van de kwart lambda transformator, maar ook met een LCR parallelkring waarbij men wat serieweerstand aanbrengt in de spoel.

Stel men maakt een dipool van ijzerdraad (magnetisch). Uit meting (of berekening) blijkt dat de resonantie-impedantie bij voeden in het midden 120 Ohm bedraagt. Dit betekent dat ongeveer 50% van het elektrisch vermogen in warmte omgezet wordt (de verliesweerstand blijkt rond de 60 Ohm). Stel dat men nu deze dipool als monopool wenst te gebruiken, dan zal de eindgevoede weerstand een factor twee lager liggen dan op grond van de formules.

2.4. Enkele praktische voorbeelden.

De bedoeling van deze paragraaf is om vertrouwd te raken met de formules wat men in de praktijk kan verwachten. Probeer de getallen zelf na te rekenen.

2.4.1. Eindgevoede halve golf dipool voor 3.6 MHz (verticaal aan vlieger), 2mm draaddikte, over grondvlak.

$\lambda = 83.33$, $d = 2\text{mm}$, $L_e/d = 40/2\text{mm} = 20\text{k}$ (40k als het een hele golf dipool was geweest).

Z_{in} bij resonantie = 4.3 kOhm (reëel dus 650Vrms bij 100W input)

Q-factor = 10.8

$BW_{SWR=2} = 235$ kHz.

Lengte = $0.950 \cdot 0.5 \cdot \lambda = 39.56$ m (in geval van geïsoleerd draad, is extra verkorting nodig).

Indien de kabelmantel niet aangesloten is op en of andere vorm van ground, bedraagt de common mode stroom in de mantel in orde van 0.15A, de stroom in het midden van de draad bedraagt in orde van 1.3A. De mantelstroom ligt ongeveer 19 dB lager ten opzichte van een kwartgolf straler.

Het plaatsen van een common mode choke dicht bij het voedingspunt heeft alleen zin indien de retourstroom via een andere weg kan lopen (bijv hekwerk, aardelektrode, gronddraad, etc).

2.4.2. Eindgevoede halve golf dipool (20mm dik) voor 145 MHz op mast.

$\lambda = 2.07$ m, $d = 20$ mm, $L_e/d = 1/20$ mm = 50 (100 voor full wave dipole)

Z_{in} bij resonantie = 620 Ohm (reëel dus 250Vrms bij 100W input)

Q-factor = 5.1

$BW_{SWR=2} = 20$ MHz.

Lengte = $0.90 \cdot 0.5 \cdot \lambda = 0.93$ m

Common mode current in de mast zal rond $250/620 = 0.40$ A bedragen. De stroom in midden straler = $\sqrt{100/55} = 1.35$ A). De common mode stroom bedraagt nu – 10dB van de stralerstroom. De straling van de mast/kabel t.g.v. de common mode stroom is nu niet meer verwaarloosbaar. Hier zouden twee radialen op zijn plaats zijn om het grootste deel van de common mode stroom via de radialen te laten lopen. Doordat deze tegen elkaar in lopen, is het aandeel in het verre veld stralingsdiagram van die 2 radialen minimaal.

2.4.3. Eindgevoede halve golf dipool (5mm dik) voor 2.45 GHz op relatief groot Aluminium grondplaatje.

$\lambda = 122$ mm, $d = 5$ mm, $L_e/d = 61/5$ mm = 12.

Le zal aanzienlijk korter uitvallen vanwege de geringe l_e/d verhouding waardoor l_e/d in feite kleiner uitvalt (één keer itereren is meestal voldoende).

Z_{in} bij resonantie = 142 Ohm (reëel dus 120Vrms bij 100W input)

Q-factor = 2.1

$BW_{SWR=2} = 800$ MHz.

Lengte = $0.78 \cdot 0.5 \cdot 122$ mm = 48mm

Enige overdenking met betrekking tot geldigheid formules.

Stel dat we een halve golf dipool zouden hebben van 48mm, dan zou deze bij 1A ingangsstroom aanzienlijk minder uitstralen dan dat deze 62mm lang zou zijn. Het

product van lengte-stroom is aanzienlijk lager (in orde van factor 1.25). Dit betekent dat de stralingsweerstand als halve golf dipool eveneens lager uit zal vallen. Men kan in orde van $73 \cdot (1/1.25)^2 \cdot 1.64/1.6 = 48$ Ohm verwachten.

In alle formules voor bandbreedte en impedantie is uitgegaan van 60 Ohm dipoolimpedantie. Doordat de stralingsweerstand (middengevoed) een factor 0.8 van 60 Ohm bedraagt, is de eindgevoede weerstand factor $1/0.8 = 1.25$ hoger (dus rond 180 Ohm). De Q_factor is daardoor ook een factor 1.25 hoger (dus rond 2.6 met een bandbreedte van 640 MHz).

Kortom, pas de genoemde formules niet klakkeloos toe, maar kijk of de basisgedachte achter de formules (halve golf stralingsweerstand en kwart golf transformatormodel) nog wel opgaat.

2.5. Samenvatting halve golf monopool.

De ingangsimpedantie van de eind gevoede halve golf dipool (monopool) kan bepaald worden aan de hand van de stralingsweerstand van de halve golf dipool (middengevoed) en de denkbeeldige karakteristieke impedantie van de geleiders waaruit de dipool opgebouwd is.

De ingangsimpedantie van zowel de hele golf dipool, halve golf dipool over ground en halve golf eindgevoede dipool is sterk afhankelijk van de verhouding lengte/diameter. In de praktijk kan de resonantie-impedantie liggen tussen pakweg 100 Ohm (kleine l/d) en 10 kOhm (grote l/d).

De fysieke lengte van de halve golf eind gevoede antenne voor resonantie is wat minder dan op grond van de fysieke lengte voor een halve golf dipool verwacht wordt.

3. Eigenschappen van de halve golf monopool parallel aan een grondvlak.

3.1. Inleiding.

In het vorige hoofdstuk is de hele golf dipool en halve golf monopool aan bod gekomen zonder invloed van obstakels (behalve dan een grondvlak of tegencapaciteit). In de praktijk kunnen zich echter andere situaties voordoen.

Net als bij de halve golf dipool is ook bij de halve golf monopool de impedantie bij resonantie sterk afhankelijk van de aanwezigheid van een grondvlak evenwijdig aan de dipool. Omdat de stroomverdeling van halve golf monopool en halve golf dipool aan elkaar gelijk is, komen stralingsdiagram en gain ook met elkaar overeen.

Met behulp van het transmissielijnequivalent kan men uitgaande van eigenschappen van de halve golf dipool boven een grondvlak goede uitspraken doen over het gedrag van de halve golf monopool boven een grondvlak. Ook de halve golf patch antenne gevoed via strip line of microstrip is uiterlijk gezien een halve golf monopool boven een grondvlak (en elektrisch gezien een dipool).

Ter info, in <http://www.tetech.nl/divers/NVISantenneNL1.pdf> wordt de invloed van een grondvlak op de dipool behandeld. Het vormt de basis voor de impedantiebepaling van de eindgevoede dipool boven een grondvlak.

Voor de eindgevoede halve golf dipool geldt (zie ook figuur 1C):

$$Z_{Res_HWmono} = \frac{(Z_{0_line})^2}{R_{rad_dip}}$$

Om een goede indruk te krijgen van Z_{res} hoeven we alleen te weten hoezeer R_{rad_dip} en Z_{0_line} veranderen ten gevolge van het plaatsen van de monopool parallel aan een grondvlak.

3.2. De karakteristieke impedantie van de lijn bij aanwezigheid van het grondvlak.

Deze zal ten gevolge van de uitbreiding van het nabije veld niet hoger zijn dan van een coaxiale structuur met diameter $D = 0.25\lambda$, ofwel

$$Z_{coax_air} \leq 138 \cdot \text{Log} \left(\frac{0.25 \cdot \lambda}{d_{wire}} \right)$$

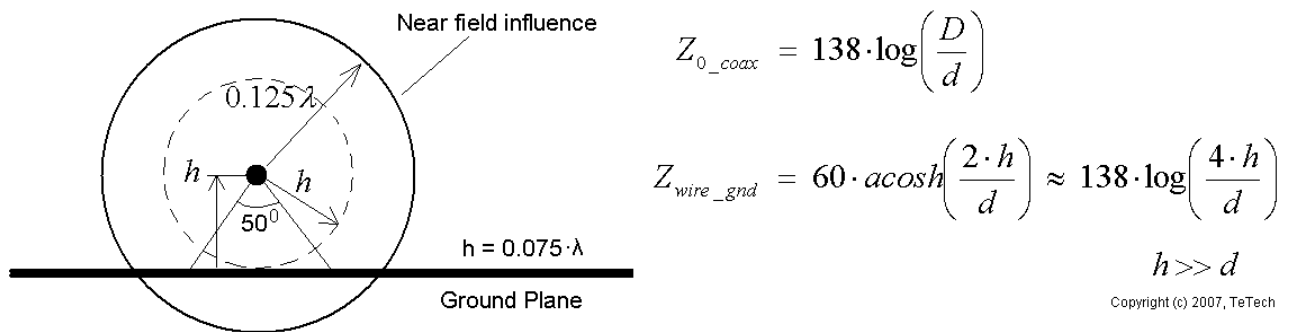
Als de lijn zich dicht bij het grondvlak bevindt zal de invloed van het grondvlak toenemen. Z_{0_line} van een draad boven een grondvlak bedraagt:

$$Z_{wire_gnd} \geq 60 \cdot \operatorname{acosh}\left(\frac{2 \cdot h}{d_{wire}}\right) \approx 138 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot h}{d_{wire}}\right) \quad h \gg d$$

In werkelijkheid hebben we echter te maken met een interactie van de twee structuren.

Stel we hebben een 3mm dikke eindgevoede dipool op 0.075λ boven een grondvlak, de frequentie bedraagt 10 MHz ($\lambda=30\text{m}$). Hoe groot zal Z_{0_line} dan (ongeveer) zijn?

Assessment of Characteristic Impedance of dipole/monopole wire



Characteristic impedance is for about 310/360 part dominated by characteristic impedance of coaxial structure with $D = 0.25 \cdot \lambda$ (and for 50/360 part by the coaxial structure with $D = 2 \cdot h$).

figuur 4: Inschatting van karakteristieke impedantie van dipool/monopool boven grondvlak.

Figuur 4 toont de situatie waarbij het grondvlak zich 0.075λ onder de dipool bevindt. In plaats van de formule voor Z_0 van een lijn boven een grondvlak, passen we de coax formule toe met $D=h$.

$$Z_{0_line} \text{ zal dan ergens liggen tussen: } 438 \text{ Ohm} < Z_{0_line} < 469 \text{ Ohm}$$

Als je naar figuur 4 kijkt, zal de invloed van het grondvlak zich uitstrekken over ongeveer 50° , terwijl de invloed van de denkbeeldige "kabelmantel" met $r=0.125\lambda$ zich over 310° uitstrekt.

Als we "even" lineair wegen/interpoleren, zal Z_{0_line} uitkomen op:

$$Z_{0_line} = (438 \cdot 50 + 469 \cdot 310) / 360 = 464.7 \text{ Ohm}$$

Het aanbrengen van het grondvlak parallel aan de straler zal een verlaging van Z_{0_line} te zien geven van 469 naar 464.7 Ohm (factor 0.991, verwaarloosbaar).

Samengevat:

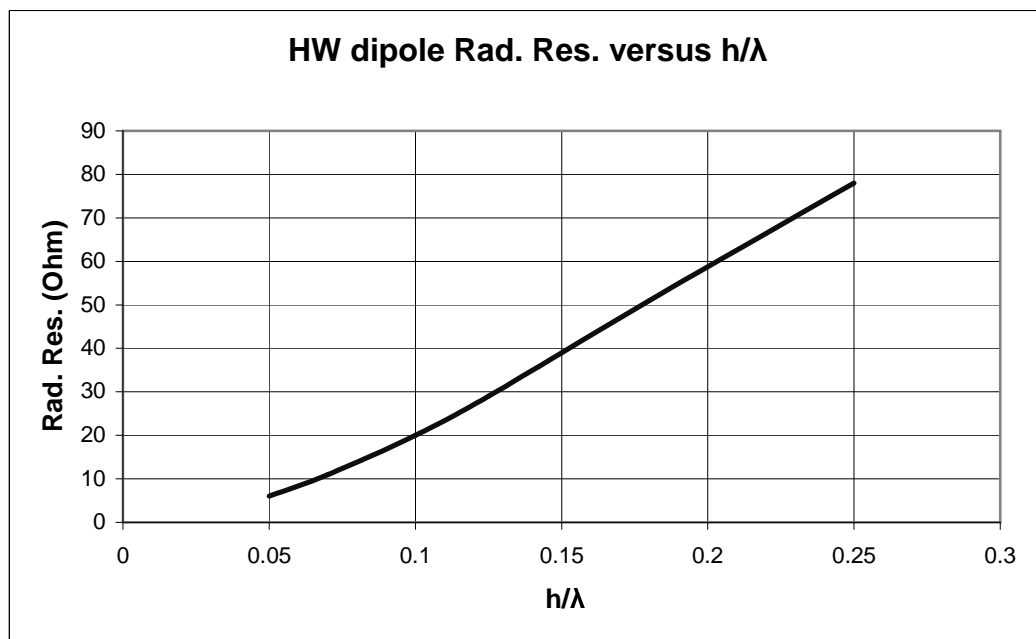
Indien $d_{\text{wire}} \ll h$ en $h > 0.05\lambda$ dan is de invloed van het grondvlak op Z_{0_line} gering. In geval van dikke geleiders of strips (zoals bij een patch antenne) in combinatie met geringe h/λ , dient men per geval een inschatting te maken van Z_{0_line} .

3.3. De stralingsweerstand ten gevolge van de aanwezigheid van het grondvlak.

Het aanbrengen van een grondvlak onder een dipool of eindgevoede dipool/monopool heeft grote invloed op het stralingsdiagram en daarmee het uitgestraald vermogen (bij zekere stralerstroom). De stralingsweerstand (in geval van halve golf dipool) wordt dan ook sterk beïnvloedt door het grondvlak.

Voor een uitgebreide behandeling van de impedantie van een dipool boven een grondvlak wordt verwezen naar <http://www.tetech.nl/divers/NVISantenneNL1.pdf>.

Onderstaande figuur geeft weer de stralingsweerstand voor de halve golf dipool als functie van h/λ (over oneindig goed geleidende grond, gebaseerd op gegevens uit bovengenoemd document).



Grafiek 1, halve golf dipool stralingsweerstand als functie van h/λ .

In de in dit document genoemde formules voor de stralingsweerstand van de eindgevoede dipool is uitgegaan van 60 Ohm als stralingsweerstand voor de halve golf dipool.

De stralingsweerstand van de eindgevoede dipool kan gevonden worden door de berekende waarde (zonder obstakels) te corrigeren met $60/R_{\text{rad}}$ (volgens grafiek).

De Q-factor neemt eveneens met een factor $60/R_{\text{rad}}$ (volgens grafiek) toe.

Indien het grondvlak dissipeert, daalt de stralingsweerstand van de halve golf dipool aanzienlijk minder, dan in de grafiek weergegeven. De impedantie van de halve golf monopool stijgt dan ook minder.

Draadantennes geplaatst over een goed geleidende ondergrond (bijv. vochtige kleigrond), kunnen bij geringe h/λ in orde van 10 kOhm resonantie-impedantie hebben. Ontwerpers van antennes dienen rekening te houden met de optredende hoge spanning.

3.4. Strips (Ribbon) of ronde geleiders.

Op hogere frequenties, vooral in combinatie met grondvlakken, is het gebruik van een strip in plaats van ronde geleider soms meer op zijn plaats.

Indien de hoogte van de strip boven het grondvlak $< 0.05\lambda$, wordt de karakteristieke impedantie voornamelijk bepaald door de aanwezigheid van het grondvlak. Je kunt hier de standaardformules gebruiken. Indien je in een situatie zit zoals in figuur 4, wordt de karakteristieke impedantie voornamelijk bepaald door de denkbeeldige coaxiale structuur.

Indien een strip (met breedte d_{strip}) als antennegeleider (straler) gebruikt wordt, kan men niet rechtstreeks de Z_0 formule voor een coaxiale structuur gebruiken. Echter indien $d_{strip} < 0.25\lambda$, kun je de strip gewoon vervangen door een staaf met halve diameter. Ofwel voor de effectieve diameter voor een strip geldt:

$$d_{eff.strip} = 0.5 \cdot d_{strip}$$

d_{strip} = breedte van de strip in m, $d_{eff.strip}$ = effectieve diameter van een strip t.b.v. berekening karakteristieke impedantie in formules voor ronde geleiders, in m.

Deze eigenschap kun je ook gebruiken als je staafantennes wilt simuleren, maar beschikt over een simulatieprogramma voor vlakke structuren. Deze simulatiepakketten maken meestal gebruik van de "infinite thin strip" benadering in plaats van de "thin wire" benadering (zoals in NEC). Het scheelt enorm in de simulatietijd als je een cilindrische structuur door een vlakke kunt vervangen.

3.5. Samenvatting eind gevoede halve golf dipool (of hele golf dipool) over grondvlak.

Daar waar in een praktische situatie een halve golf dipool een lagere stralingsweerstand heeft, zal de stralingsweerstand van de halve golf monopool toenemen (ten opzichte van de formules in dit document). Een verandering van 60 naar 30 Ohm, zal leiden tot een verdubbeling van de eindgevoede impedantie. De reden daarvoor is dat de karakteristieke impedantie van de draad/geleider nagenoeg niet wijzigt t.b.v. het aanbrengen van het grondvlak.

De Q-factor van de eindgevoede dipool is nagenoeg recht evenredig met de toename in impedantie (dus hogere impedantie, geeft geringere bandbreedte). De bandbreedte en verliezen in de halve golf dipool zijn gelijk aan die van een halve golf monopool.

Het plaatsen van de eindgevoede dipool dicht boven een goed geleidend grondvlak heeft tot gevolg dat de resonantie-impedantie toeneemt. Voor $h/\lambda = 0.1$ bedraagt de toename een factor 3. De Q-factor neemt evenredig toe met de toename van impedantie. In geval van echte grond is de toename van Q-factor en impedantie minder.

4. Common mode aspecten van de halve golf monopool.

4.1. Inleiding.

Met behulp van de informatie uit hoofdstuk 2 en 3 zijn we in staat om deingangsimpedantie en bandbreedte te kunnen bepalen van:

1. hele golf dipool,
2. halve golf monopool over ground
3. halve golf monopool
4. Halve golf monopool parallel aan een grondvlak.

We kunnen zelfs een transmissielijn of LCR model opzetten (bijv. t.b.v. simulatie in een SPICE pakket).

Op deze manier zijn we in staat om zowel de voedingsstroom als retourstroom te kunnen bepalen. De retourstroom (de stroom die via de afscherming van de kabel weer naar binnen gaat), dient wel ergens vandaan te komen. Voor HF gebruik kan dit vaak vanuit een aardpunt, maar zelfs dat is niet altijd voorhanden. In dit hoofdstuk wordt wat dieper op de "ground" ingegaan.

4.2. Stromen in de kwart golf "Ground Plane Antenne".

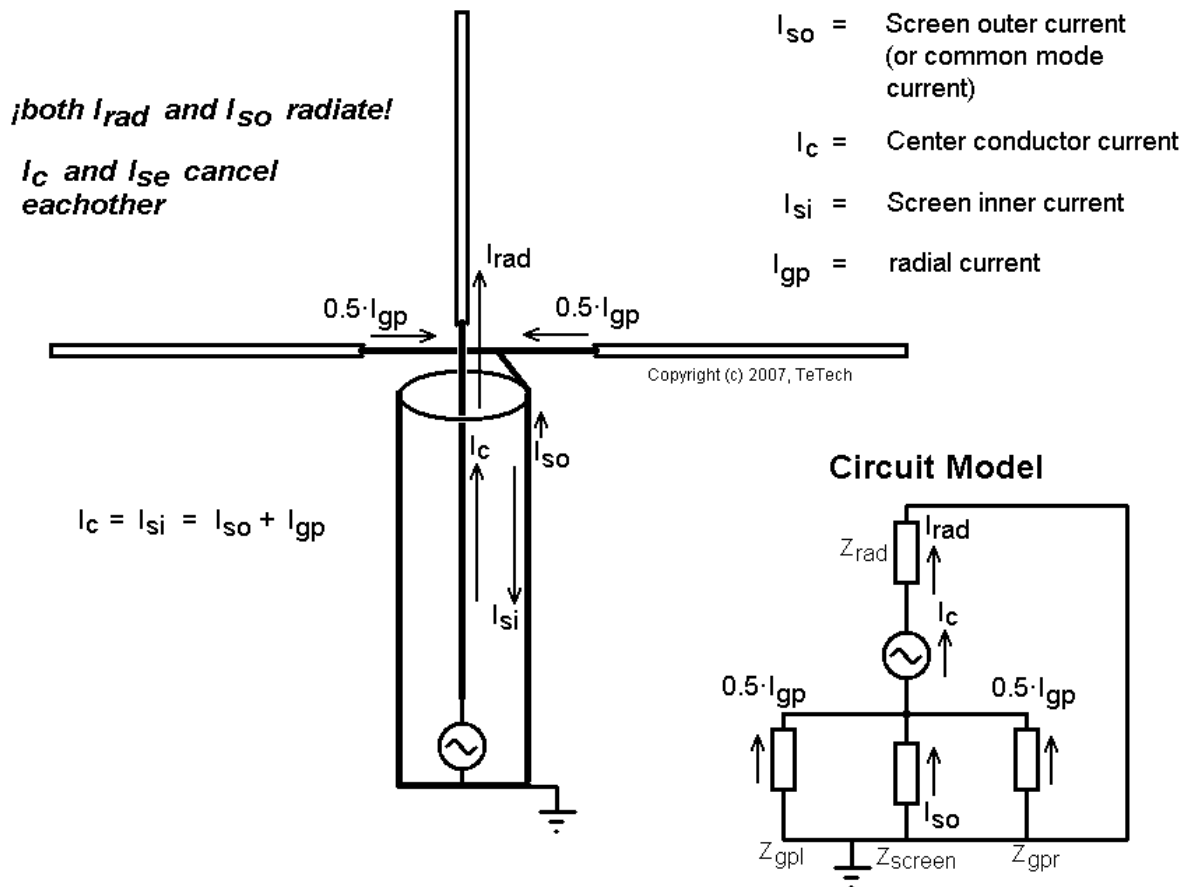
Figuur 5 toont een kwart golf straler met twee zijradialen.

Een paar uitgangspunten:

1. We gaan uit van een coaxkabel met massieve mantel welke véél dikker dan de skindiepte is. Er kan dan onafhankelijk van elkaar stroom aan de binnenzijde en buitenzijde van de kabelmantel lopen. Dit vereenvoudigt het uitleggen
2. De diameter van de coax is véél kleiner dan de golflengte. Hier wordt in de praktijk nagenoeg altijd aan voldaan.
3. De stroompijlen hebben betrekking op de stroom welke loopt op de overgangen kabel/straler, kabel/radialen, etc. Zij zijn niet representatief voor de stroom op bijvoorbeeld 0.1λ van het knooppunt radialen/kabelmantel.

Bovenstaande heeft tot gevolg dat de stroom aan de binnenzijde mantel (I_{si}) gelijk is aan de stroom binnengeleider (I_c). I_{si} is aangegeven als een stroom in het rechterdeel van de mantel, maar loopt in werkelijkheid verdeeld over de gehele mantelomtrek. Het stralingseffect (nabije als verre veld) van I_c en I_{si} is nul (ofwel geen straling of E, H-veld buiten de kabel t.g.v. I_c en I_{si}).

1/4 lambda GP radiator overview of currents



figuur 5: Overzicht van stromen in de 1/4 lamda "GPA"

I_{si} bestaat uit de som van de stroom uit de twee radialen en de stroom welke over de buitenzijde van de kabelmantel loopt (I_{so}). Hoe I_{si} zich verdeelt over de radialen en de kabelmantel, wordt bepaald door de impedanties die men ziet als men vanuit de binnenzijde kabelmantel kijkt naar de radialen en de buitenzijde mantel.

Het circuitmodel (met de nadruk op model) toont de impedanties.

Opmerking:

Dit model is alleen van toepassing op de stroom dicht bij de overgangen waar zich de straler bevindt. Het model suggereert bijvoorbeeld dat I_{so} bij het aardpunt gelijk is aan I_{so} op het kabeleinde waar zich de straler bevindt. Zodra de kabel langer is dan pakweg 0.1λ , is dit niet meer het geval (denk bijvoorbeeld aan een kwart golf transformator).

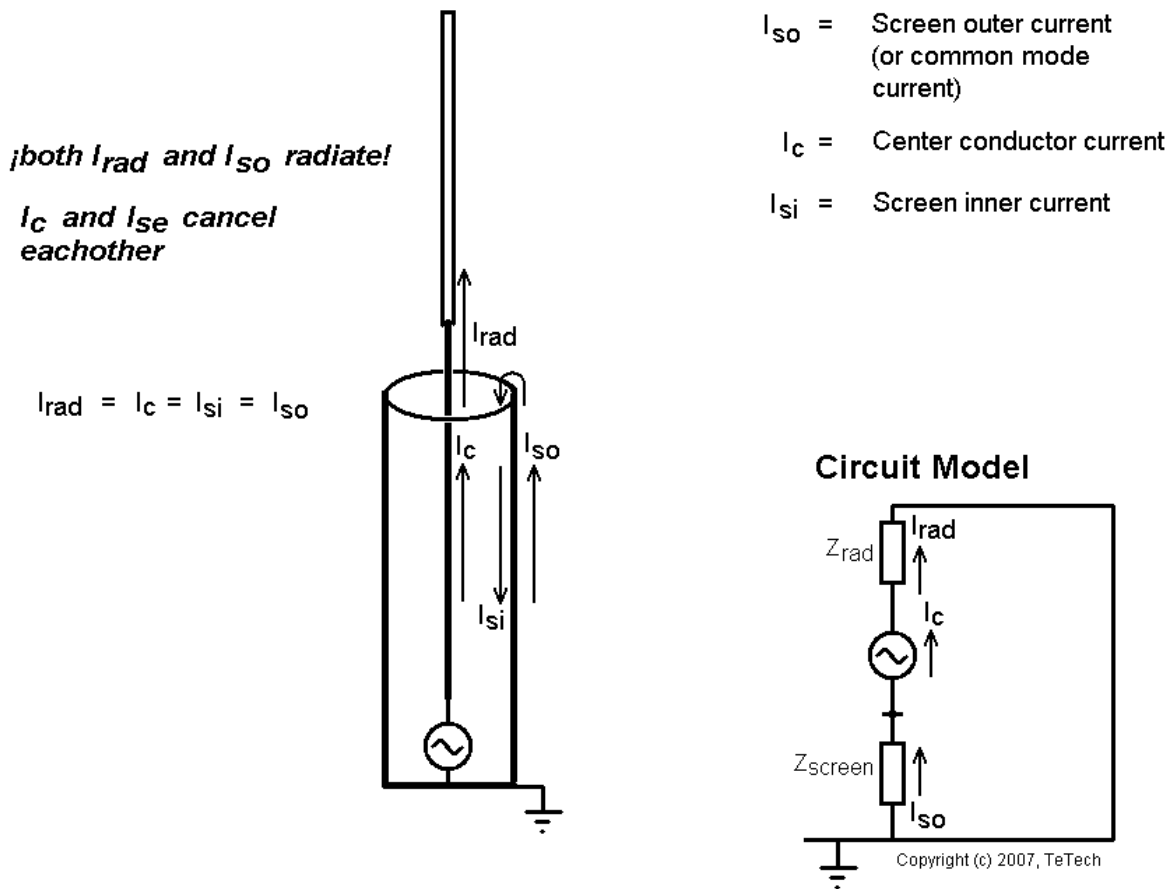
De bedoeling van de radialen is om voor de retourstroom welke de mantel ingaat (I_{si}) een laagohmig pad te vormen (ten opzichte van Z_{screen}). Bij radialen van 0.25λ lengte wordt daar meestal aan voldaan. Als de aardconnectie relatief laagohmig is en de voedingskabel is 0.25λ lang, zal Z_{screen} hoog zijn (kortgesloten kwartgolf

resonator) waardoor I_{so} veel kleiner dan I_{rad} zal zijn. De coaxkabel zal dan geen deel uitmaken van de stralende constructie.

Waar gaat het niet goed? Stel dat de kabel 0.5λ lang is en de aardaansluiting is zeer laagohmig is (bijv vlechtwerk van betonplaat of stervormig aardnet), dan is Z_{screen} eveneens laag en zal de stroomverdeling minder gunstig zijn. Dit is de reden dat vaak 3 of 4, of meer radialen aangebracht worden om Z_{gp} zo laag mogelijk te krijgen.

Figuur 6 toont een situatie waarbij alle retourstroom 'uit' de buitenzijde coaxmanteel komt.

1/4 wave radiator without radials



figuur 6: Overzicht van stromen in de 1/4 lamda "GPA" zonder radialen.

Er geldt nu $I_{si} = I_{so}$. Aangezien I_{so} niet opgeheven wordt door een andere (kabel)stroom, straalt de kabel. Welke impedantie men ziet tussen einde kabelmanteel (ter plekke gebogen pijl) en ingang straler, hangt nu sterk af van Z_{screen} . Als de kabel laagohmig geaard is en 0.25λ lang is, zal Z_{screen} in orde van honderden ohms zijn, terwijl de kwartgolfstraler (Z_{rad}) zelf in orde van 30 Ohm zal zijn. Ten gevolge van lange leiding effecten, zal de stroom lager in de kabelmanteel aanzienlijk hoger zijn dan I_{so} (nu ziet men weer de beperkingen van het "Circuit Model"). In deze opstelling zal via de mantel van de kabel aanzienlijk meer vermogen uitgestraald worden dan via de eigenlijke straler.

Een opstelling als in figuur 6 geschetst heeft bij onbekende kabellengte een onvoorspelbaar gedrag. In de praktijk kan men dit bij (VHF) antennes nagaan door naar de VSWR te kijken terwijl men de kabel beetpakt op verschillende plaatsen. Verandert de SWR, dan is het zeer waarschijnlijk dat de kabel straalt.

4.3. **Stroomverdeling in de halve golf "Ground Plane Antenne".**

Figuur 7 toont een halve golf radiator zonder radialen (welke, onterecht, in de CB wereld "ground plane" antenna genoemd wordt).

Aan het eind van de kabel (of in dit geval nog net in de kabel), is een aanpassingsnetwerk aangebracht om 50 Ohm naar pakweg 1600 Ohm te transformeren. 1600 Ohm treedt op bij veel 27 MHz 0.5λ sprietantennes.

Omdat nu I_{rad} in orde van factor 5.5 lager is (t.o.v. kwart golf straler), is I_{SI} dat ook. I_{SO} is nu eveneens een factor 5.5 lager. De stroom in het midden van de radiator (I_{rad}) heeft zijn oorspronkelijke waarde echter behouden!

Zolang als Z_{screen} maar aanzienlijk lager is dan Z_{rad} (1600 Ohm), zal deze geen effect hebben op de overall impedantie welke gezien wordt vanuit het aanpassingsnetwerk.

Ter info:

Het aanpassingsnetwerk "ziet" een impedantie van $Z_{rad}+Z_{screen}$. De vermogensopname van Z_{screen} zal dan ook veel kleiner zijn dan de vermogensopname van Z_{rad} , en daarmee dus ook de straling van de kabel.

Waar gaat dit minder goed?

Normaal gesproken worden halve golf verticals op een mast gemonteerd welke aanzienlijk dikker dan de antennestaaf is. Stel dat de mast zéér goed geaard is (rechtstreeks op aardnetwerk) en 0.25λ (elektrisch) lang is, dan zal Z_{screen} relatief hoog zijn. Door de diameter van de mast (bijv vakwerkmast), zal Z_{screen} echter geen 1600 Ohm zijn, maar 500 Ohm is wel haalbaar. In dit geval wordt er toch een significant deel van het zendvermogen in Z_{screen} gedissipeerd. Dit kan leiden tot inspraak in apparatuur dicht bij de mast, omgekeerd kan storing uit apparatuur via de mast bij de antenne komen.

Hoe dit te voorkomen?

Indien de mast rechtstreeks op de grond staat en via één of meerdere aardelektroden geaard is, is het aan te bevelen om geen mastlengte te hebben welke precies $(0.25 + 0.5k)\cdot\lambda$ is ($k = 0, 1, 2, 3$, etc). Anders gezegd, de mast moet niet in hoogohmige resonantie komen. Indien dit niet te vermijden is (bijvoorbeeld bestaande situatie), kan men een aantal (korte) radialen aanbrengen bij de antennevoet. Deze worden bij diverse antennes standaard meegeleverd.

Andere mogelijkheid is de resonantie te verleggen (bijvoorbeeld door het aanbrengen een stuk metaal aan de mast).

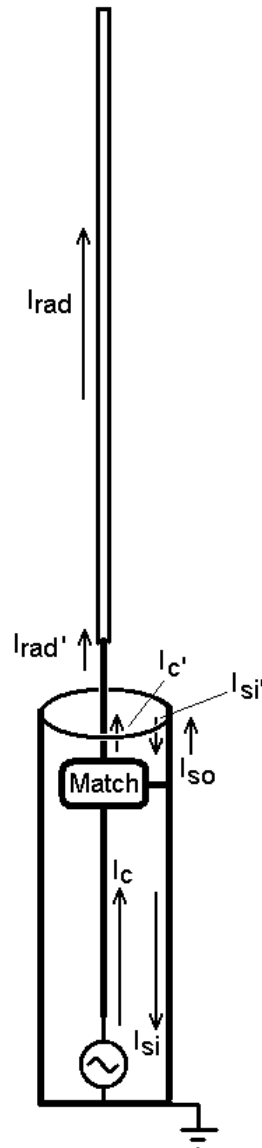
1/2 wave radiator without radials

both I_{rad} and I_{SO} radiate!

I_C and I_{se} cancel each other

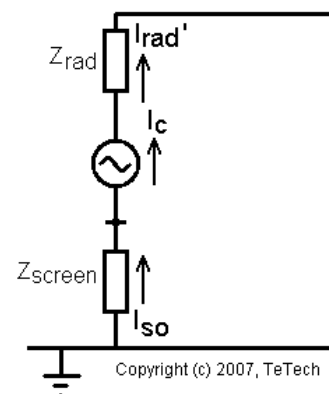
Because of high impedance of HW dipole, input current (I_{rad}') is low. Therefore the common mode current (outer screen current, I_{SO}) is also low, even without radials.

$$I_{rad}' = I_{c'} = I_{si'} = I_{SO}$$



- I_{SO} = Screen outer current (or common mode current)
- I_C = Center conductor current
- I_{SI} = Screen inner current
- $I_{C'}$ = Center conductor current just after the matching network
- $I_{SI'}$ = Screen inner current, just after the matching network
- I_{rad}' = Radiator input current

Circuit Model



figuur 7: Overzicht van stromen in de $1/2 \lambda$ "GPA" zonder radialen.

Getuide masten, komen zelden in resonantie in het hoge HF deel en hoger.

Voor antennes (bijv antennes voor 14m, 10m, 27MHz en 6m) welke rechtstreeks aan een niet metalen zijgevel bevestigd worden, is het raadzaam om de kabel op 0.25λ afstand te voorzien van een common mode filter (mantelstroomfilter). Het mantelstroomfilter plaatsen op 0.5λ wordt afgeraden vanwege de hoge spanning die dan over het filter komt te staan. Het plaatsen van een common mode filter direct onder aan de voet van een antenne die geen zijradialen heeft geen zin. Men koppelt in feite de tegencapaciteit los van de antenne.

Opmerking:

Antennes, welke tegen een muur of boeibord bevestigd worden en waarvan de kabel rechtstreeks naar binnen gaat, geven een verhoogd risico op ernstige schade in geval van blikseminslag. De werking van een eventueel aanwezige bliksemafleider kan ernstig (negatief) beïnvloed worden.

Antennes met lage le/d.

Om enige breedband eigenschappen te verkrijgen, is een straler nodig met lage le/d (dikke straler). Deze heeft ook een aanzienlijk lagere impedantie waardoor I_{rad} hoger uitvalt. Hiermee vervallen deels de voordelen van de halve golf monopool.

Men ontkomt dat niet aan maatregelen welke ook gebruikt worden voor kwart golfstralers. Te denken valt aan kwart golf zijradialen, sleeves, common mode chokes, etc.

4.4. Conclusie mantelstroom en halve golf monopoolstralers.

De halve golf monopool wekt, gezien zijn fysische eigenschappen, minder mantelstroom op dan een kwart golfstraler. Hoe groter le/d, hoe hoger de ingangsimpedantie en hoe lager de mantelstroom. Er zijn situaties te bedenken waarbij de resterende mantelstroom nog zodanig hoog is dat maatregelen nodig zijn.

Men kan niet standaard aannemen dat de mantelstroom laag genoeg is. De antenneontwerper dient per geval te beoordelen of maatregelen (radialen, verleggen resonantie, mantelstroomfilters, etc) noodzakelijk zijn.

5. Afregelen en Aanpassen.

5.1. Inleiding.

Antennes gebaseerd op halve golf dipolen (of kwart golf monopoles), worden vaak afgeregeld door de lengte wat aan te passen. Het aanpassingsnetwerk (indien nodig) wordt meestal niet getuned (of eenmalig in het begin).

Wanneer je deze procedure toepast bij halve golf monopolen die ontworpen zijn om lage mantelstroom op te wekken, kan het mis gaan. Indien je afwijkt van de resonantielengte, gaat $\text{Re}(Z_{\text{ant}})$ omlaag. De halve golf eindgevoede straler gedraagt zich immers als een parallelkring. Het gevolg is een hogere voedingsstroom (I_{rad} in figuur 7) en dus hogere mantelstroom.

Bij de halve golf antenne waarbij mantelstromen een rol kunnen spelen, dient men eerst de resonator te tunen op maximale impedantie en vervolgens via het aanpassingsnetwerk naar 50 Ohm aan te passen, zonder de stralerlengte te veranderen.

Bij de halve golf straler bevinden zich metalen delen dicht bij een stralerruimte (ook de coax kabel bevat veel metaal). Daardoor is de exacte stralerlengte niet goed te voorspellen. Bij de formules voor de lengte is niet voor niets het woord "indicatie" gebruikt. Diverse bronnen geven verschillende correctiewaarden voor l_e/d . Bovendien dient men nog een correctie toe te passen indien geïsoleerde geleiders gebruikt worden en/of het eind van de antenne zich eveneens bij een obstakel bevindt (bijv metalen mast).

De optimale waarde voor de stralerlengte kan het beste via meting bepaald worden onder representatieve omstandigheden, of beter nog, direct op de plek van feitelijke installatie inclusief alle overige metalen delen in de buurt (bijv radialen, tuidraden, etc).

5.2. Het bepalen van de stralerlengte.

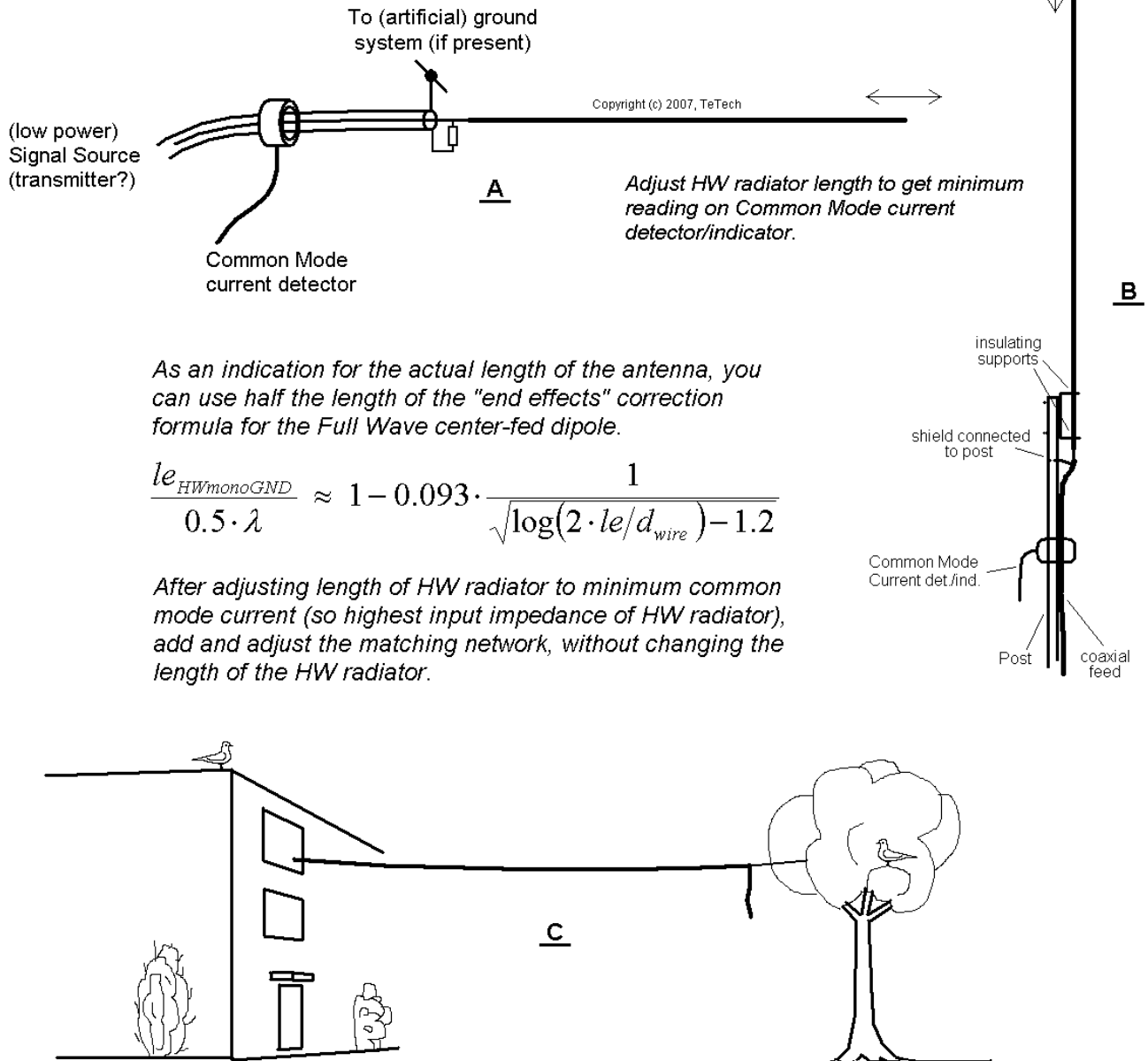
Is het doel van je antenneontwerp het zo laag mogelijk houden van de common mode stroom?, ¿Ja? ¡meet hem dan!

Je zult zien dat de common mode stroom het laagst is, indien de ingangsimpedantie van de halve golf monopool iets capacitief is. Het bepalen van de lengte op basis van reële ingangsimpedantie geeft niet de laagste common mode stroom.

Als je deze (capacitieve) impedantie omzet naar een parallelvervangingschema, zie dat de "stralingsweerstand" erg hoog is.

In principe zou men ook de stralerstroom (voedingsstroom) kunnen meten (I_{rad}), maar vanwege de hoge impedantie is dit in de praktijk lastig en men meet dan de capacitieve component mee welke niet voor common mode stroom zorgt. Het rechtstreeks meten van de common mode stroom via spanning of stroom is de beste aanpak.

Radiator Adjustment and Matching Procedures 1



Please note that lowest common mode current does not coincide with real input impedance of the end-fed dipole. This is because some of the input current couples to the shield of the feeder via the capacitance between the monopole and the shield (and does not result in radiation current). This capacitance appears as a parallel capacitor end causes the input impedance to have a capacitive component. One has to account for this capacitance when designing the matching network.

Figuur 8: Afstemming van de straler.

Waarom wil je de common mode stroom laag hebben?

1. In veel gevallen wil je niet dat de kabel deel uitmaakt van de stralende constructie in verband met adsorptie door de omgeving, wijziging van stralingsdiagram of dat het stralingscentrum lager komt te liggen.
2. Voorkomen/verminderen van interferentie op andere apparatuur.
3. Voorkomen/verminderen van interferentie veroorzaakt door andere apparatuur (geschakelde voedingen, monitors, voorschakelapparaten [VSA's], etc).
4. Vermindering van vermogensverlies in common mode chokes.
5. verminderen van verlies in ground (in geval van over aarde gevoede antennes).

Figuur 8A toont het basisprincipe. Het uitgangspunt is dat de stralerimpedantie veel hoger is dan 50 Ohm. Uitgaande van 50 Ohm kabelimpedantie zorgt de weerstand voor enige afsluiting en 25 Ohm impedantie bezien vanuit de straler.

De bron, welke door middel van de coax naar de straler is gebracht, kan men zien als een spanningsbron. Door de lengte van de straler te variëren, kan men optimaliseren op laagste radiatorstroom (I_{rad} in figuur 7).

Aangezien $I_{rad} = I_{so} =$ common mode stroom, kan men met een current probe (of indirect via een spanningsprobe) bepalen of men met de stralerlengte de goede kant op gaat.

De plaats voor de probe is van belang. In principe zou men hem direct bij de overgang kabel/straler kunnen plaatsen, maar dan bestaat het risico dat de probekabel capacitief koppelt met de straler. Dit kan leiden tot foutieve meting (common mode naar differential mode conversie in de probe of probekabel) of de probekabel verstemt de straler. Beter is om de common mode probe wat bij de straler vandaan te plaatsen. De probe hoeft geen hoge absolute nauwkeurigheid te hebben, het is een kwestie van het vinden van die stralerlengte die de laagste waarde te zien geeft.

5.3. Enkele praktische hints bij het meten van de common mode stroom.

Als je op voorhand kunt bepalen dat de impedantie van de (zwevende) ground binnen de gewenste frequentieband voldoende laag is, kan men de frequentie van de bron variëren om te bepalen of de antenne te kort of te lang is.

In geval van een lange dunne mast in de buurt van de resonantielengte, kan men beter de frequentie vastzetten, en de stralerlengte variëren. Het kan gebeuren dat de koppeling van common mode effect naar de probe sterk frequentieafhankelijk is.

Als je de meting op de coaxiale kabel uitgevoerd wordt, kan men een ferrite clamp gebruiken met enkele secundaire windingen.

Figuur 8B toont een constructie welke veelvuldig voor HF verticals gebruikt wordt (waaronder 27 MHz CB antennes). De straler bevindt zich gedeeltelijk naast de mast, waardoor er parallel aan de straler extra capaciteit staat. Bovendien zit de

voedingskabel niet vast aan het deel dat boven de mast uitsteekt, maar een stukje lager. Naast de mechanisch eenvoudige constructie, kan je deze capaciteit ook gebruiken als "component" in het aanpassingsnetwerk.

Als je nu de stralerstroom zou bepalen door de stroom door de binnengeleider van de coax te meten, of m.b.v. van een vector netwerk analyser, dan meet je eveneens de capacatieve stroom welke via de mast loopt. Door gezamenlijk de common mode stroom te meten door zowel mast als kabel, meet je alleen de voedingsstroom van de straler.

Bij een dikke mast is de methode met current probe niet mogelijk. Een (resonante) koppellus (8 lus) kan uitkomst bieden. In plaats van de common mode stroom, kan men ook een spanningsmaximum langs de mast zien te vinden en daar een E-veld probe plaatsen.

Indien de antenne is voorzien van een ground (bijvoorbeeld kwart golf radialen), dan kan de common mode stroom in de mast of kabel zo laag zijn, dat deze niet meer met een simpele diode detector te detecteren is, uitgaande van een meetzender of SWR meetbrug met ingebouwde oscillator (bijv MFJ, Wiltron, Anritsu, etc). Een mogelijkheid is dan om de stroom te meten in een van de radialen (current probe) of de tipspanning met een E-veld probe. Als je legaal meer vermogen kan gebruiken kan je in nagenoeg alle gevallen een schottky diodedetector gebruiken in combinatie met hoogohmige voltmeter.

Figuur 8C toont een opstelling welke vanaf een appartement gebruikt kan worden. Het balkon (en eventueel dat van beneden- en bovenburen) gebruik je als tegencapaciteit. In zo'n geval meet je de common mode stroom in de kabel die vanaf de groundaansluiting op het hekwerk naar je bron gaat. Als deze kabel erg kort is, en je bron is batterijgevoed, is de common mode stroom wellicht erg laag. De kabel verlengen in de tegenovergestelde richting van de antennedraad, geeft meestal iets meer common mode stroom.

Als je de optimale lengte gevonden hebt, blijf je er vanaf nu vanaf, en kunnen we verder naar de aanpassing.

5.4. Aanpassing.

In geval van eindgevoede dipolen/monopolen van 0.5λ , moeten we nagenoeg altijd in impedantie omhoog. Figuur 9 toont een aantal aanpassingsmethoden (welke natuurlijk ook gecombineerd kunnen worden). Naast de formules om de componentwaarden te bepalen, zijn ook de Q-factoren gegeven (indien van toepassing).

De Methoden A en B maken gebruik van serieresonantie (dit geeft spanningsopslinging). Methode A heeft een laagdoorlatend karakter en geeft daarmee geen enkele bescherming tegen de LF energetische component in een nabije blikseminslag. Methode geeft B wel enige protectie tegen nabije blikseminslag.

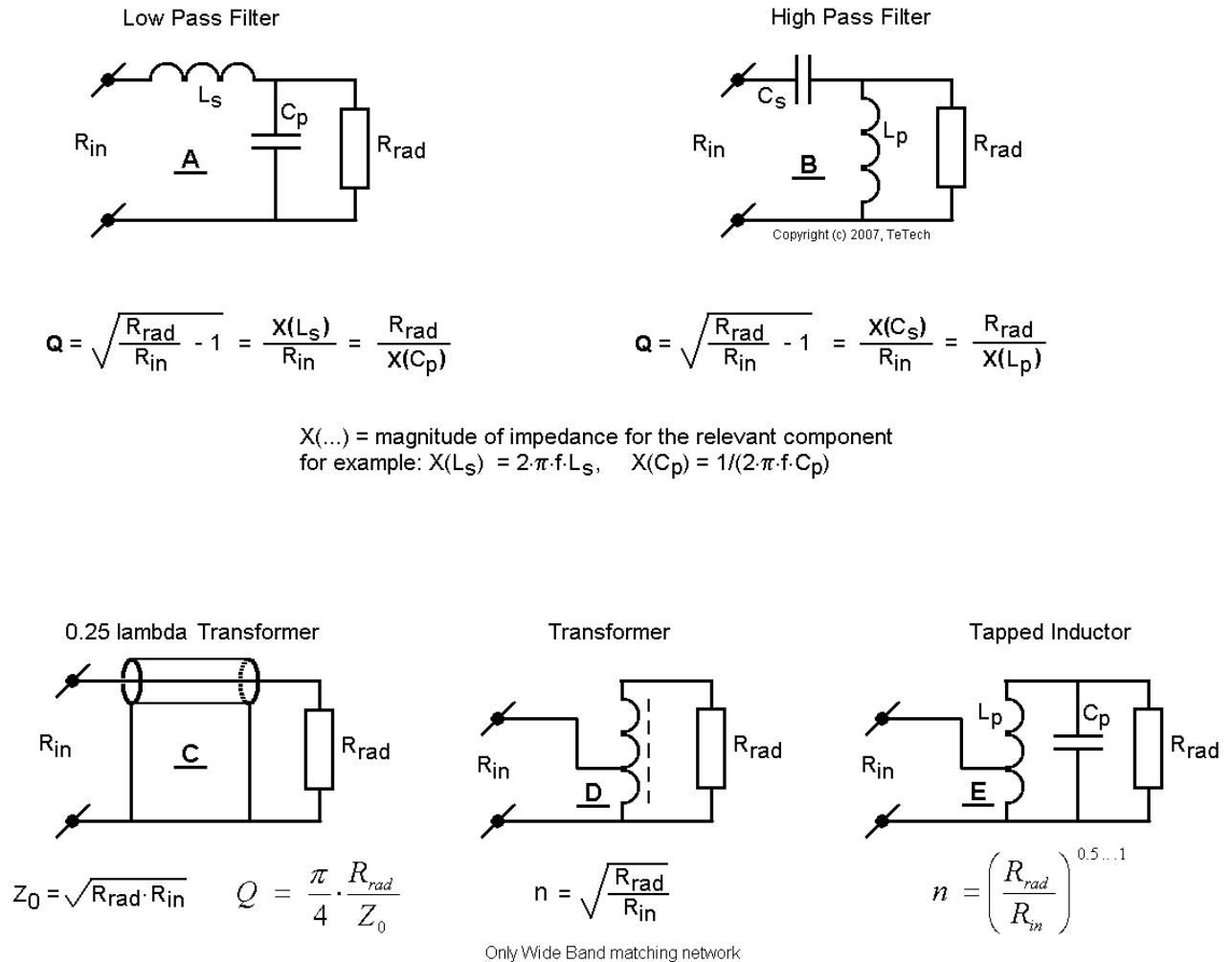
Methode C is handig en wordt veel gebruikt op VHF, UHF en SHF. Veel 0.5λ patch antennes worden ook met een kwart golf lijnstukje aangepast naar bijvoorbeeld 50

Ohm. Ook deze methode heeft een laagdoorlatend karakter en geeft geen bescherming tegen nabije blikseminslag. De Zepp maakt gebruik van de kwart golf kring. De J-pole is een variant op deze aanpassing (getapte kwart lambda kring, in feite de transmissielijnvariant van methode E).

Hoewel als coaxiale kabel getekend, wordt voor HF antennes (in orde van kOhms ingangsimpedantie) meestal symmetrische voedingslijn (twinlead, kippenladder) gebruikt. Het weegt weinig, is goedkoop en geeft weinig verlies. Een tussenvorm tussen coax en twinlead is de co-planar wave guide (CPWG). Deze kan men uitvoeren als midden geleider met aan weerszijden een retourgeleider. Voordel ervan is dat de common mode impedantie van deze lijn lager is. Bovendien is het stralingsverlies t.g.v. de differentiële stroom aanzienlijk minder. Als er verder niets aan de lijn vast zit dat als (kunstmatige) ground kan dienen en je wilt dat de lijn niet straalt, dan moet je het laagohmige voedingspunt niet aarden (dus common mode choke met $Z > 500$ Ohm).

Methode D is bij antennes met hoge le/d verhouding (dus hoge ingangsimpedantie) lastig in geval van hoogvermogen toepassingen. Last met windingcapaciteit en dielektrische doorslag liggen op de loer. We zullen later zien dat het combineren van de transformator met andere methoden een aantal gunstige eigenschappen heeft.

Radiator Adjustment and Matching Procedures 2

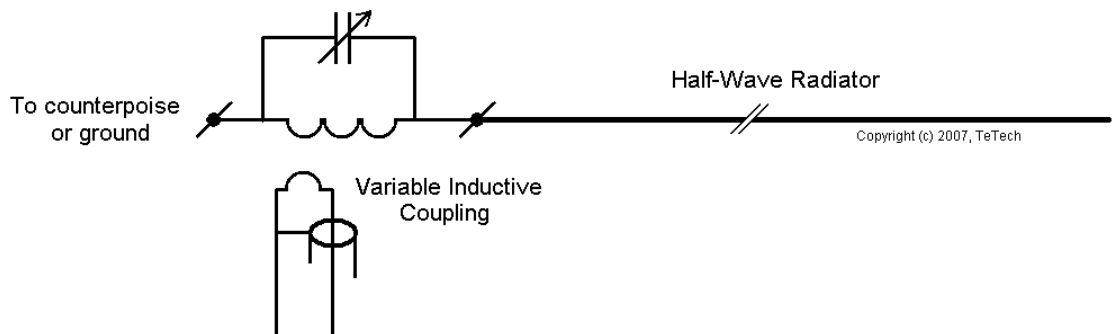


The Bandwidth of the 4 narrow band solutions can be enhanced by doing the transformation in two steps. Sqrt(Rrad*Rin) can be chosen as the intermediate impedance. For very high Rrad, this may lead to unpractical component values.

Figuur 9: Aanpassingsnetwerken.

Methode E is de standaard resonantiekring, waarbij men veel invloed uit kan oefenen op de belaste Q factor van de kring. Indien men de Q te hoog kiest, kunnen verliezen significant worden. Bij de "Ringo" antenne is sprake van een combinatie van C en E. De spoel wordt om de voet van de antenne gewikkeld. Doordat de spoel aan massa zit, geeft deze methode ook enige bescherming tegen nabije bliksemingslag.

Matching with tank circuit and variable inductive coupling



Figuur 10: Aanpassing met parallelkring en variabele inductieve koppeling.

Bovenstaande figuur (figuur 10) toont een variatie op de getapte kring. M.b.v. de variabele inductieve koppeling kan men de impedantiesprong variëren (losse koppeling geeft grotere impedantiesprong). Door de uitsluitend inductieve koppeling ontstaat er weinig mantelstroom, zelfs al is de counterpoise/ground niet zo goed. Ook hier geldt dat de bruikbare bandbreedte door het aanpassingsnetwerk afneemt en dat je componenten nodig hebt met relatief hoge Q-factor.

Een circuit als dit is ook toepasbaar als je de impedantie van de antenne wilt bepalen. Stel de capaciteit en inductieve koppeling zodanig af dat $SWR=1$, verwijder antenne en counterpoise en sluit weerstanden aan opdat $SWR=1$, vervolgens kan je via de weerstands- en capaciteitswaarde de som van $Z_{counterpoise}$ en $Z_{radiator}$ bepalen.

Welke methode je gebruikt voor de definitieve aanpassing, hangt af van persoonlijke voorkeur (ervaring?), frequentie, zendvermogen, en niet te vergeten de beschikbare componenten.

5.5. Bandbreedte aspecten en "geavanceerde methoden".

Stel we hebben een halve golf monopool voor 2m, de stralerdiameter bedraagt 10mm en we passen enkele radialen toe (gebruik formules voor monopool over grondvlak).

Invulling geeft een stralingsweerstand van 664 Ohm en een $Q = 4.6$.

Aanpassen volgens A geeft een Q factor van 3.5 (alleen het netwerk)

Aanpassen volgens D geeft een Q factor van 2.9 (alleen het netwerk)

Wat heeft dit voor gevolgen voor de Q-factor van de combinatie straler/aanpassingsnetwerk?

De straler gedraagt zich rond de ontwerp frequentie als een parallelkring. Op de transformator na (methode D), gedragen alle andere methoden zich ook als parallelkring. We plaatsen twee kringen letterlijk parallel. Dit betekent dat de

resulterende capaciteit omhoog gaat, en resulterende inductie naar beneden, Dit geeft een hogere belaste Q factor.

Praktisch gezien bedraagt de systeem Q factor de som van de twee Q-factoren. Aanpassen volgens methode A, geeft een $Q_{sys} = 4.6 + 3.5 = 8.1$. Dit resulteert in een $BW_{VSWR=2} = 0.71 \cdot 145 \text{ MHz} / 8.1 = 12.8 \text{ MHz}$ (terwijl de radiator een bandbreedte heeft van 22.4 MHz).

Voor 2m band amateur gebruik, is dit voldoende, maar als we op deze manier een VHF Air band antenne moeten ontwerpen, gaat dit niet goed, we zijn 43% van de bandbreedte kwijt.

Als bandbreedte van belang is, kan men de impedantietransformatie in stappen doen. Enkele voorbeelden:

Twee stappen met transformator.

Men kan als eerste stap een 1:2 (1:4 impedantie) transformator toepassen. Dit is goed te doen vanaf het lage HF tot hoge VHF gebied. Vervolgens kan een stap van 200 Ohm naar 664 Ohm gemaakt worden.

Volgens methode A levert dit een $Q = 1.5$ op. Q_{sys} komt dan op 6.1.

Dit resulteert in een bandbreedte van 16.9 MHz. Dit is een verbetering met 32% ten opzichte van aanpassen in een keer van 50 naar 664 Ohm).

Twee stappen met LC netwerken.

Een andere methode met tussenstap is een tussenimpedantie van $\sqrt{664 \cdot 50} = 182$. Bereken de twee netwerken en stop ze in een simulatie. Het resultaat is een vlakke overdracht met een relatieve bandbreedte (VSWR=2 van 58%), maar welke wel te hoog staat. Via frequentietransformatie kan dit naar de gewenste band omgezet worden.

Opgemerkt dient te worden dat van een tweestaps LC filter voor deze antenne de bruikbare bandbreedte van het aanpassingsnetwerk meer dan 60 MHz bedraagt. Op deze manier is de volledige straler bandbreedte beschikbaar.

Ieder voordeel heeft in veel gevallen ook een nadeel: in de tweede sectie (die direct bij de straler zit) komt men veelal uit op grote spoelen en kleine C'tjes. Vaak dient men dan de laatste C te verkleinen ter compensatie van de capaciteit van de spoel ten opzichte van de lokale massa. Indien het impedantieniveau zeer hoog is (draad antennes over grondvlak), komt men vaak uit op niet realiseerbare componentwaarden, of dat uitzonderlijk veel fine tuning nodig is.

Meerdere stappen met parallelkring/seriekring afwisseling.

Deze methode maakt gebruik van systematische filterontwerp methoden waarbij de straler als onderdeel van een passief LCR filter gezien wordt. Chebyshev en Butterworth benaderingen worden veelal gebruikt. De resulterende bandbreedte wordt dan zelfs groter dan die van de straler alleen. Deze bandbreedte vergrotende technieken zijn gemeengoed binnen de wereld van antenneontwerpers, maar vallen buiten het bestek van dit document.

Dikkere straler.

Door een dikkere radiator te gebruiken, of meer draden op enige afstand van elkaar, neemt de karakteristieke impedantie van de antennegeleiders af hetgeen een hogere bandbreedte geeft en lagere impedantie. Vanuit een common mode perspectief is de lagere impedantie een nadeel, maar de impedantie komt wel in een gebied waarbij men niet in exotische componenten terecht komt (gangbaardere waarden en lagere optredende spanningen).

De methoden gebaseerd op LCR filter ontwerp resulteren bij hoge impedanties in componentwaarden welke onrealistisch zijn. Zelfs na serie/parallel transformatie blijven (bij impedantieniveaus in het Kohm gebied) componenten niet tot slecht realiseerbaar.

In veel gevallen ontkomt men niet aan dikkere geleiders indien er grote bandbreedte vereist is en er geen tijd is om te tunen (zoals in Frequency Agile en Frequency Hopping Spread Spectrum apparatuur en diverse radartoepassingen).

6. Tips ten aanzien van het ontwerp van antenne en componenten, met nadruk op HF gebruik.

Vanwege de aanmerkelijk hogere spanning in het voedingspunt van de antenne (t.o.v. halve golf dipool), zijn er een aantal zaken waar men op moet letten. Een aantal zaken komen in dit hoofdstuk aan bod.

De meeste aanpassingsnetwerken voor halve golf monopolen hebben een zekere Q-factor. Van LC en 0.25λ netwerken is de Q factor niet bijzonder veel lager dan de Q van de antenne zelf. Waarden variërend van 2 tot 10 komen voor.

Stel dat een spoel een $Q = 100$ heeft en het netwerk een $Q = 10$, dan gaat reeds $10/(10+100) = 0.091$ (9.1%) van het zendvermogen verloren in de spoel. En dan is er nog niet gesproken over verliezen in isolatiemateriaal en kruipstroomverlies.

Een 50 Ohm coaxiale kabel rechtstreeks verbonden aan een hoog impedante straler resulteert veelal in exceptioneel hoge verliezen in de kabel. Om hoge SWR in de coax te voorkomen, bevindt het aanpassingsnetwerk zich meestal direct bij de antenne (en daardoor vaak buiten).

6.1. *Isolatiematerialen en condensatoren.*

Bij isolatie spelen diverse aspecten:

1. doorslag van het dielectricum. Dit kan gebeuren bij dunne lagen (zoals draadisolatie), bij sterk verhit materiaal en na langdurige erosie/sputtering t.g.v. corona-effecten. Lucht op zeeniveau slaat door rond de 3kVp/mm.
2. Doorslag over het oppervlak (via de "kruipweg", "creepage"). Er vormt zich een geleidend pad via het oppervlak van het isolatiemateriaal (bijvoorbeeld t.g.v. vervuiling).
3. diëlectrische verliezen. Het is de bedoeling dat het vermogen de lucht in gaat en niet het isolatiemateriaal warm stookt.
4. mechanische sterkte. Meestal heeft een isolatiemateriaal ook een mechanisch dragende functie. Ten gevolge van inwerking van UV kan de sterkte na verloop van tijd sterk afnemen en kan een antenne naar beneden komen (helaas, ik heb er ervaring mee).

Relatief sterke materialen als nylon (PA, polyamide) en PVC (polyvinylchloride) hebben hoge diëlectrische verliezen (in orde van 0.1). Dit betekent dat je daarmee een condensator kan maken met een Q-factor van maximaal 10, tenzij je ervoor zorgt dat de meeste veldlijnen door lucht gaan.

PE (polyethyleen, witte snijplankjes, eenvoudige opbergmappen) heeft een lage verliesfactor en neemt aanzienlijk minder vocht op dan nylon.

PP (polypropyleen, emmers, cementkuipen) is vergelijkbaar met PE, doch mechanisch sterker. Zwart materiaal is, ondanks "carbon black" als pigment, meestal gewoon bruikbaar. Het pigment verhoogt de UV bestendigheid van het materiaal. Zowel PE als PP is niet betrouwbaar te lijmen.

PC (polycarbonaat, slagvaste vervanger voor glas in bijvoorbeeld bushokjes) geeft minder verliezen dan PA en PVC, maar is mechanisch sterk en taai.

Fiberglas stokken (FRP materiaal, vliegers, sportartikelen) zijn zeer goed bruikbaar om de halve golf straler op de voet te bevestigen. Door de afstand in orde van de stralerdiameter te houden, gaat een groot deel van de veldlijnen door lucht waardoor de Q-factor van de capaciteit tussen onderkant straler en voet meestal voldoende hoog is.

Regeneraat materiaal (= gerecycled materiaal, bijv RPC) is eveneens bruikbaar en ook goed voor het milieu.

Als u met zenders aan de gang gaat, houdt er rekening mee dat veel kunststoffen standaard niet vlamdovend zijn (lees: je huis brandt af als het heel slecht loopt).

Gebruik geen koolstof composiet materiaal, en zeker niet op plekken waar hoge spanning staat. Ik heb het zelf een keer een tandwiel gebruikt in een overbrenging. Ik pakte het beet tijdens een condensator doorslagtest (RF). Er steeg onmiddellijk rook op (van mijn vingers). Nu weet ik ook waarom het tandwielletje zo duur was, het was koolstof epoxy composiet.

Vaak kan men met een slimme constructie de belasting op de materialen beperken. De constructie in figuur 8B is een veel gebruikte. De antenne wordt door in metaal gevatte kunststof ringen of plaatjes opgesloten. Zelfs als een van de isolatiematerialen bezwijkt, komt de antenne niet naar beneden. Een andere fail-safe constructie is de straler met zijn einde in een andere pijp plaatsen door middel van enkele isolatieslagen. De capaciteit kan je gebruiken voor afstemming, en mocht het kunststof bezwijken, dan komt de antenne niet naar beneden.

Bereken de minimale dikte niet alleen op diëlectrische doorslag, maar ook op kruipafstand (creepage distance). Bij lange dunne stralers bereikt men reeds bij 100W een ingangsspanning in orde van 500Vrms (dus 710Vp). Zorg dat de weg van straler naar de mast/voet via kunststof voldoende groot is als met de antenne gezonden dient te worden (enkele cm is geen uitzondering). T.g.v. vervuiling kan over onverwacht grote kruipafstanden toch een vonk getrokken worden welke wat materiaal doet verkolen met sluiting tot gevolg. Als dit eenmaal gebeurd is, moet de antenne naar beneden. Zorg dat na verloop van tijd zich geen vuil op kan hopen (door bijvoorbeeld schuine kanten te gebruiken waar het water direct vanaf loopt).

Daar waar de afstand tussen spanningsvoerende delen klein is, moet je geen uitstekende puntige delen hebben. Hier kan corona ontlading optreden. Dit kun je in het donker zien bij zenden. Het is een uiterst ongewenst verschijnsel vanwege spectrumvervuiling (het geeft ruis) en vermogensverlies.

Op sites voor bouwers van "tesla coils" is veel over isolatiematerialen en doorslag te vinden. Zij werken met spanning $\gg 10\text{kV}$.

Condensatorformules.

Enkele condensator formules om een indruk te krijgen van wat je aan capaciteit kan verwachten (d = (binnen)diameter, D = hart-hart afstand, of buitendiameter, h = hoogte boven grondvlak, le = lengte, $\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m, C in Farad)

Plaatcondensator

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{D}$$

Dit is de meest bekende formule, maar ook degene die in de praktijk de grootste fout oplevert. Deze formule houdt alleen rekening met de veldlijnen die rechtstreeks van plaat tot plaat oversteken. Er steken echter ook veldlijnen over via kromme banen, in het bijzonder aan de rand van de plaat (4 stuks bij een rechthoek, in het engels "fringe", "fringing"). Deze randcapaciteit moet opgeteld worden bij de berekende waarde volgens de Plaatcondensator formule

Zelfs bij $D/d_{\text{plaat}} = 0.1$ (ronde platen, oneindig dun, $d_{\text{plaat}} = \text{plaatdiameter}$), is de werkelijke capaciteit (voor lucht) reeds 12% hoger dan volgens de formule. Voor $D/d_{\text{plaat}} = 1$ (ronde platen), is de daadwerkelijke capaciteit reeds 100% hoger (dus dubbele waarde). Voor rechthoekige platen is de daadwerkelijke capaciteit nog hoger, omdat je daar meer randlengte hebt.

Coaxiale condensator

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot le}{\ln(D/d)}$$

Voor een kort stuk coax, is het capacitieve eindeffect niet te verwaarlozen. De verlenging bedraagt in orde van $0.25(D-d)$.

Twee parallelle ronde geleiders (twin lead, D = hart op hart afstand).

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot le}{\cosh^{-1}(D/d)}$$

Ook voor een kort stuk twin lead is het capacitieve eindeffect niet te verwaarlozen. De verlenging bedraagt in orde van $0.25 \cdot D$. info: $\cosh^{-1}(x) \approx \ln(2 \cdot x)$ voor $x > 4$ (error < 0.8%)

Draad parallel aan grondvlak.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot le}{\cosh^{-1}(2h/d)}$$

Ook hier kan men een verlenging toepassen in orde van $0.5 \cdot h$, $\cosh^{-1}(x) \approx \ln(2 \cdot x)$ voor $x > 4$ (error < 0.8%)

De Bolcondensator:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_{\text{sphere}}$$

Hoewel theoretisch exact voor oneindige afstand tot andere objecten, is deze formule bruikbaar voor het inschatten van de capaciteit tussen een bol en een (grond)vlak. Indien $h > d_{\text{sphere}}$, bedraagt de fout ongeveer -5%. Voor $h = 0.75 \cdot d_{\text{sphere}}$, bedraagt de fout -10% (de formule komt dus met een te kleine capaciteit). h = hartafstand van bol tot grondvlak.

Deze formule is ook goed bruikbaar om de capaciteit in te schatten van objecten waarvan de grootste afmeting groter is dan de afstand tot, bijv, ground. Meestal rekent men dan met $d_{\text{sphere}} = (l+b+h)/3$. zie onderstaand voorbeeld.

Een praktijkgeval:

Stel we hebben een plaatcondensator met twee ronde platen met $\text{diam} = 1\text{m}$ en $D = 1\text{m}$.

Volgens de plaatcondensatorformule heeft deze constructie een capaciteit van 7.0pF. Uit de begeleidende tekst blijkt dat de daadwerkelijke capaciteit 2 keer zo hoog is (dus 14 pF).

Stel dat we de platen opvatten als bollen met gemiddelde diameter van $(1+1+0)/3 = 0.666$. De bollen staan 1.5 keer hun diameter uit elkaar (dus 0.75 keer hun diameter ten opzichte van een grondvlak). De twee bollen staan in serie, dus de totale capaciteit is dan de helft van een van de bollen. Dit resulteert in $0.5 \cdot 37\text{p} = 18.5\text{ pF}$. Nu zie je dat procentueel gezien, de vlakke plaat formule er meer naast zit (zeker relatief gezien) ten opzichte van de bolformule.

Met behulp van bovenstaande formules kan men een inschatting maken van de capaciteit van een mechanische constructie.

6.2. Spoelen.

De spoel is vaak de "slechtste" component. Condensatoren kunnen Q-factoren hebben van >1000 , voor gewikkelde luchtspoelen houdt het bij $Q=200$ op.

Gebruik bij voorkeur luchtspoelen met één wikkellaag. De antennespanning komt dan nooit in zijn geheel over de draadisolatie te staan en de spoelcapaciteit is in de hand te houden.

Het is aan te raden de windingen niet tegen elkaar te wikkelen (vermindering proximity effect), een separatie van ongeveer $0.5 \dots 1 \cdot d_{\text{wire}}$ wordt veelal gebruikt. Bovendien is de kans dat er vuil tussen gaat zitten, aanmerkelijk kleiner. Als de isolatie relatief dik is, kan men wel tegen elkaar wikkelen. De invloed van vervuiling is dan wel iets dan groter.

De eerste resonatiefrequentie (spoel gedraagt zich dan als parallelkring) treedt op bij een draadlengte van rond de 0.25λ . Als je draadlengte pakweg beneden 0.15λ blijft, zijn resonantie-effecten voor een eerste inschatting te verwaarlozen. Je draadlengte

mag best meer zijn, maar dan moet je rekening houden met transmissielijneffecten in de spoel en wordt het ontwerp van het aanpassingsnetwerk aanzienlijk lastiger.

Voor enkellaag spoelen wordt de Wheeler formule veel gebruikt (stamt uit ongeveer 1928), nauwkeurigheid is beter dan 1% voor $le/D > 0.4$.

Zelfinductie Enkellaagspoel, Wheeler formule:

$$L = 2.5 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{D^2 \cdot n^2}{4.5 \cdot D + 10 \cdot le} \quad le > 0.4 \cdot D \quad [H, Vs/A]$$

D = gemiddelde spoeldiameter, in m, n = aantal windingen, le = lengte, in m, $\mu_0 \approx 1.2566 \cdot 10^{-6}$ H/m. Voor $le/D = 0.2$ bedraagt de fout ongeveer = -4% (dus resultaat formule is te laag).

Als de separatie tussen de windingen groot is (ten opzichte van de draaddiameter), is de daadwerkelijke inductie wat hoger dan berekend m.b.v. deze formule.

Door de spoel wat uit te rekken, kun je de zelfinductie verlagen zonder het aantal windingen te verminderen.

Geleidend materiaal in de spoel, leidt tot afname van de zelfinductie en de Q-factor.

Indien u formules voor andere geometrie gebruikt (bijv t.b.v. een "ringo" spoel), gebruik dan de formule voor de "HF" of "transient" inductie. Formules voor "DC" inductie geven bij spoelen van zeer dikke draad of strip een te hoog resultaat voor de zelfinductie.

Enkele andere formules (D = hart-hart afstand, d = diameter, $\mu_0 \approx 1.2566 \cdot 10^{-6}$ H/m)

Één winding van ronde draad.

$$L = 0.5 \cdot \mu_0 \cdot D \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot D}{d} \right) - 2 \right)$$

Rondgebogen brede strip.

Gebruik zelfinductieformule voor enkellaagspoel met le = breedte van strip en neem n=1. Indien niet binnen geldigheidsbereik formule voor enkellaagspoel, gebruik bovenstaande formule met d = 0.67·stripbreedte.

Parallel geleiders (ronde doorsnede).

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot le \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right)$$

Indien slechts één draad boven een grondvlak (retourgeleider) gebruikt wordt, is de zelfinductie de helft bij $D = 2h$ (h=hart-hoogte boven grondvlak).

Zoektermen om meer over zelfinductie te vinden: Medhurst, Corum, Nagaoka, Wheeler.

6.3. Gebruik van de formules.

In veel gevallen, vind je geen formule voor jouw specifieke probleem. Indien je beschikt over een EM simulator, kun je zelfinductie en capaciteit bepalen aan de hand van het simulatieresultaat.

Vaak kun je de structuur opdelen in brokjes en worst case formules pakken, zodat je weet tussen welke waarden de zelfinductie of capaciteit zich bevindt. Door te experimenteren en enig inzicht in de materie kom je toch met relatief weinig ontwerpelingen tot een naar wens werkende antenne.

Naast de hier genoemde formules zijn er nog veel meer formules voor diverse geometrie. Ook kan je uitgaande van formules voor karakteristieke impedantie de zelfinductie en capaciteit per meter van een geometrie berekenen.

In veel formules zie je een "ln", "cosh⁻¹" [voor x>3] of "log". Deze bewerkingen hebben het effect om grote getallen naar elkaar toe te brengen (log10=1, log100=2, log 1000=3). Het eindresultaat is daardoor meestal niet sterk afhankelijk van waarop, deze bewerkingen losgelaten wordt.

7. Hoogspanningsaspecten.

7.1. Parallele platen condensator.

Het punt doorslag is al eerder kort aan bod gekomen. In deze paragraaf wordt er iets dieper op ingegaan.

In geval van een homogeen veld (bijvoorbeeld tussen twee parallelle, zeer goed gepolijste platen) bedraagt de doorslagspanning van lucht op zeeniveau in orde van 3000 V/mm. Dit neemt op grote hoogte sterk af! Isolatiematerialen hebben een aanzienlijk hogere doorslagsterkte.

Indien de oppervlakken niet goed bewerkt zijn dient men een correctiefactor toe te passen. Deze correctie is nodig omdat bij slechte oppervlaktegesteldheid reeds bij rond 1.5kV/mm ionisatie op kan treden.

Men zou denken, stop kunststof diëlectricum tussen de platen van een condensator en mijn condensator kan meer spanning hebben. Helaas, die vlieger gaat niet op.....

Voor het magnetisch veld geldt:

$$B = \mu \cdot H \quad [Vs/m^2, T, Wb/m^2]$$

B, de magnetische fluxdichtheid gedraagt zich wiskundig gezien als een (tijdelijke) stroming (flow) zodra het veld in sterkte verandert.

Voor het elektrisch veld bestaat een soortgelijke relatie:

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad [As/m^2, C/m^2]$$

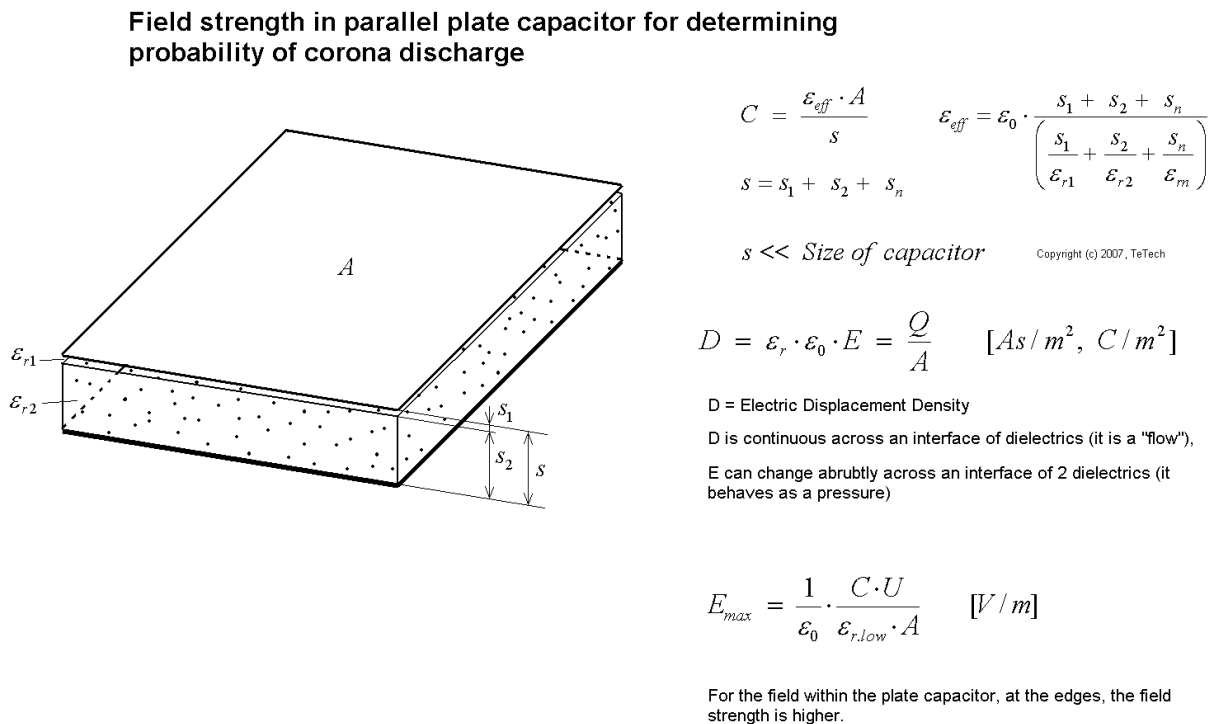
D = diëlectrische verplaatsing (doorschuiving, dielectric displacement), bij metalen ladingsdichtheid. Wiskundig gezien gedraagt D zich als een tijdelijke stroming als de sterkte verandert. D kan dus niet stapvormig veranderen indien D van het ene naar het andere materiaal gaat (net als bij elektrische stroom).

Voor een vlakke plaat condensator is de lading bij benadering gelijkmatig over het plaatoppervlak verdeeld en geldt:

$$D = \frac{Q}{A} \quad [As/m^2, C/m^2]$$

Q = lading, in As, Coulomb (C), $Q = C \cdot U$, A = plaatoppervlak (één zijde van één plaat), in m².

Zie ook figuur 11.



Figuur 11: Veldsterkte in parallelle platen condensator t.b.v bepaling kans op corona-ontlading.

Als we D en ε kennen, kunnen we E uitrekenen met:

$$E = \frac{D}{\varepsilon} \quad [V/m]$$

Als je zelf een condensator maakt met isolatiemateriaal ertussen, zal het meestal niet lukken om overal goed contact tussen metaal en diëlectricum te krijgen (tenzij je

het ding in de olie zet of sterk invet). Een deel van de veldlijnen gaat dus door lucht. In figuur 11 is dit weergegeven. Vanaf de bovenste plaat gaan de veldlijnen eerst door een dunne luchtlaag, dan door het vaste diëlectricum en vervolgens eindigen zij op de onderste plaat.

Bij de figuur staat tevens de formule om de effectieve epsilon uit te rekenen op basis van de laagdikten.

Als we de capaciteit, en werkspanning kennen (dus kennen we ook de lading) en het plaatoppervlak, kan de veldsterkte in eventuele luchtinsluitingen uitgerekend worden met:

$$E_{max} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{C \cdot U}{\epsilon_{r,low} \cdot A} \quad [V/m] \quad \text{HV_A}$$

E_{max} = elektrische veldsterkte in materiaal met laagste relatieve permittiviteit (V/m),

C = capaciteit in F (As/V),

A = plaatoppervlak in m^2 ,

$\epsilon_{r,low}$ = relatieve permittiviteit van laag met laagste relatieve permittiviteit.

Omwerken een invullen van epsilon voor lucht geeft:

$$A > 112 \cdot 10^9 \cdot \frac{C \cdot U}{E_{max}} \quad [m^2] \quad \text{HV_B}$$

Met bovenstaande formule kun je in geval van plaatcondensatoren de minimaal benodigde oppervlakte uitrekenen indien zich ergens lucht tussen de platen bevindt. Zie ook randeffect (Edge effect).

Voor de volledigheid nog even de formule voor het veld ruimschoots binnen de platen voor een luchtcondensator:

$$E = \frac{U}{h} \quad \text{HV_C}$$

h = afstand tussen platen.

Wat kies je voor E_{max} ? In ieder geval niet 3kV/mm. Tussen de platen bij een plaatcondensator is het veld behoorlijk homogeen, waardoor als er ergens ionisatie optreedt, dit direct de veldsterkte doet verhogen op andere plekken met doorslag (eventueel naar een vast dielectricum) tot gevolg. Ga voor lucht uit van $E_{max} = 1 \text{ kV/mm}$.

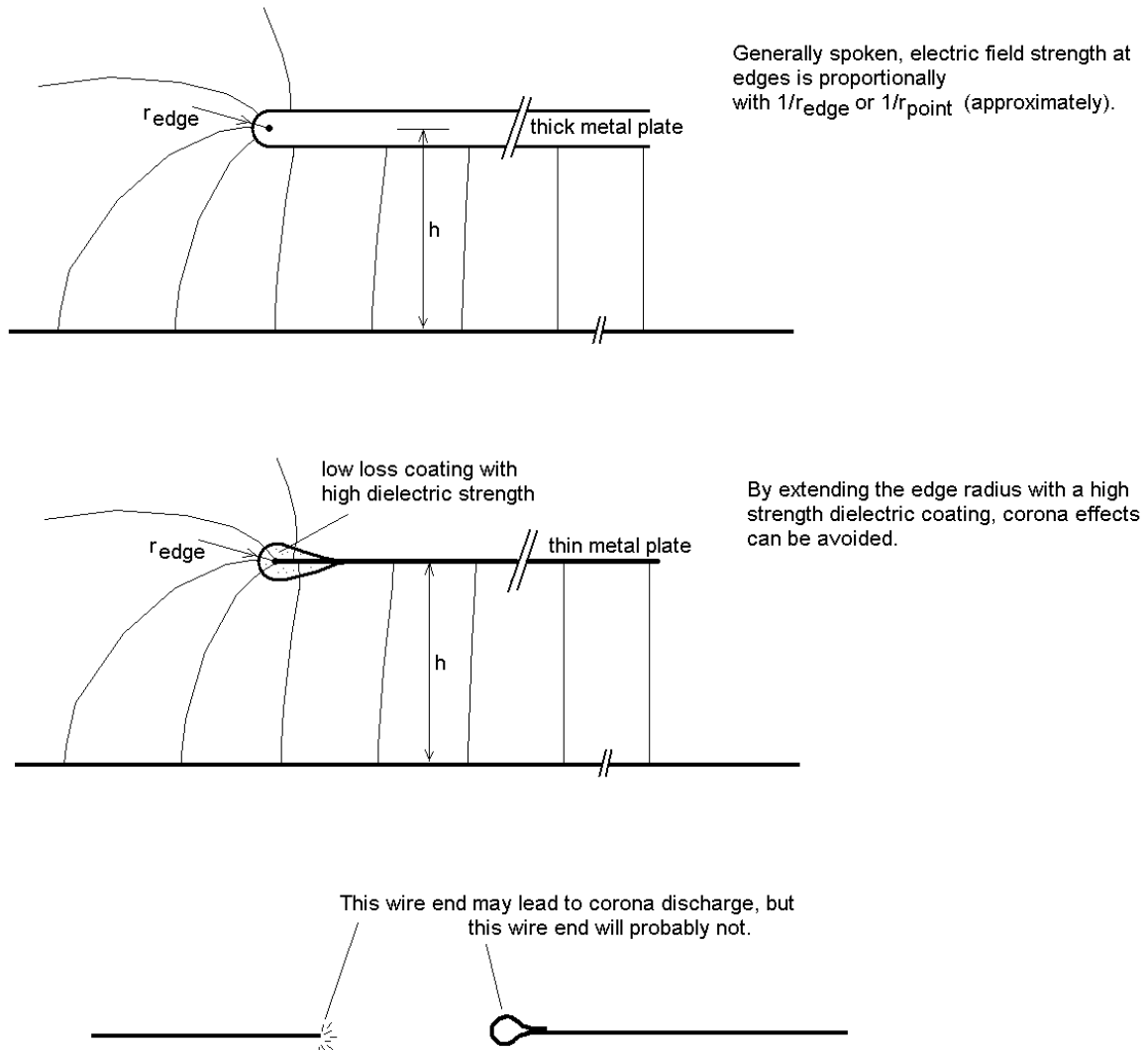
7.2. Randeffect (Edge effect).

Op randen en uitstekende delen verzamelt zich meer lading (dus de ladingsdichtheid (D) is daar hoger dan op vlakke oppervlakken). Dit is ook te zien aan het veldlijnenverloop, veldlijnen komen samen op randen (zie figuur 12).

De elektrische veldsterkte op de overgang metaal-lucht (of overgang metaal-diëlectricum) is daardoor aanzienlijk hoger. Hoe kleiner de buigradius van de rand,

hoe hoger de elektrische veldsterkte. Alleen van simpele structuren is de veldsterkte exact te berekenen (coax, evenwijdige platen, bol, bol in bol, etc). Voor de meeste structuren zullen we met EM simulatie aan de gang moeten, of benaderingsformules toe moeten passen. Voor een grove inschatting kunnen de formules uit dit hoofdstuk gebruikt worden.

Expected field strength at edges and sharp objects



Figuur 10: Elektrische veldsterkte op randen en puntige uitsteeksels.

Onderstaande formule geeft een indicatie voor de elektrische veldsterkte op de rand van een condensator (zie ook figuur 12):

$$E_{edge} \approx \frac{U}{r_{edge} \cdot \ln(h/r_{edge})} \quad [V/m] \quad \text{HV_D}$$

E_{edge} = veldsterkte op metaal-dielectricum overgang op de rand van de condensatorplaat, in V/m,
 r_{edge} = minimale buigradius van rand, in m, U is spanning tussen de twee platen, in V
h = gemiddelde afstand tussen plaat en andere plaat of grondvlak, in m.

Opmerkingen:

Formule is exact voor de coaxiale structuur. Formule geldt voor rechte randen, Indien de rand zelf ook rond loopt, heeft men te maken met een dubbelgekromd oppervlak (net als bij een bol). Bij dubbelgekromde randen, is de veldsterkte (E) hoger.

Formule geeft waarde welke hoger ligt dan in de praktijk. Als de platen gelijke afmetingen hebben (randen recht tegen over elkaar), zal de veldsterkte in werkelijkheid nog wat lager uitvallen.

Voor een sterk uitstekende punt kan men als indicatie gebruiken:

$$E_{point} \approx \frac{U}{r_{point} \cdot \left(1 - \frac{r_{point}}{h}\right)} \quad [V/m] \quad \text{HV_E}$$

$$E_{point} \approx \frac{U}{r_{point}} \quad [V/m] \quad \text{voor } h \gg r_{point} \quad \text{HV_F}$$

Opmerkingen:

Formule is exact voor bol-in-bol structuur. Formule geeft voor uitsteeksels waarden welke hoger liggen dan in de praktijk. Zeker indien het uitsteeksel zich nog dicht bij de constructie bevindt waar het elektrisch aan vast zit.

Wat is een veilige waarde voor E_{max} ? De situatie is anders dan bij het veld tussen een vlakke plaat condensator. Indien r_{edge} of $r_{point} \ll h$ is, neemt het veld op enige afstand van de rand of punt snel af. Als het oppervlak van de rand of puntig uitsteeksel mooi glad is (en dat tijdens bedrijf blijft), kan je richting $E_{max}=2kV/mm$ gaan (droge lucht, zeeniveau). Indien door een transiënt of tijdelijke vervuiling toch ionisatie ontstaat, zal het corona effect dicht bij de rand of punt blijven en niet leiden tot een volledige doorslag. Ook dien je te kijken naar de gevolgen, mocht het onverhoopt toch misgaan.

In een tijdelijke (amateur)opstelling, waarbij je kan detecteren dat het mis is en waarbij je de condensatoren snel kunt vervangen, kan je wat meer risico nemen.

7.3. Een rekenvoorbeeld 30pF/1kV condensator.

Vereist is een vlakke plaat condensator van 30pF welke 1kVp werkspanning dient te hebben. Bij de beoogde constructie kan lucht tussen kunststof dielectricum en metaal aanwezig zijn. Als dielectricum wordt PE (Polyethyleen) gebruikt.

We stellen voor homogeen veld $E_{\max}=1$ kV/mm (1MV/m).

Uit formule HV_B volgt dat $A > 0.0034$ m² (cirkel met $D = 66$ mm).

Als we lucht als dielectricum zouden nemen, hebben we een plaatafstand van 1mm nodig hebben. Dit zal in werkelijkheid iets meer zijn vanwege het randeffect (fringing).

Het plan is om gebruik te maken van 2.5mm dik materiaal dat netjes afgerond is (dus $r_{\text{edge}} = 1.25$ mm)

Hoe groot bedraagt de veldsterkte aan de randen. Voor h moeten we niet s invullen, vanwege de 2mm plaatdikte (zie figuur 12). $h = 2.25$ mm en $r_{\text{edge}} = 1.25$ mm.

Invulling in formule HV_D geeft: $E_{\text{edge}} = 1.36$ MV/m (1.36kV/mm). Als de randen van de platen netjes tegenover elkaar liggen (platen even groot en goed uitgelijnd), zal de veldsterkte aan de randen lager uitvallen.

Door tussenplaatsing van materiaal met $\epsilon_{\text{eff}}=2$, kan de plaatafstand minimaal verdubbeld worden tot 2mm. Hiermee is dit een praktisch realiseerbare condensator geworden.

Stel nu dat je alleen zeer dun blik tot je beschikking hebt? Je kunt je voorstellen dat de randveldsterkte dan teveel oploopt en corona ontlading optreedt. Wat is daar aan te doen?

Coat de randen met een kunststof welke niet doorslaat op de kunststof-metaal overgang. Maak de coating zo dik dat de radius zo groot is, dat bij de kunststof-lucht overgang de veldsterkte beneden bijvoorbeeld 2kV/m blijft. Zie figuur 12.

7.4. Eindeffect bij draden (end-effects).

Dit is van toepassing op de einden van antennegeleiders (waar meestal hoge spanning staat) of open einden van resonatoren (waar door de opslinging zeer hoge spanningen op kunnen treden). Ook hier kan men de bol in bol benadering gebruiken welke eerder genoemd is:

Als grove benadering geldt:

$$E_{wire.end} \approx \frac{U}{r_{point} \cdot \left(1 - \frac{r_{wire.end}}{h}\right)} \quad [V/m] \quad \text{HV_G}$$

h = afstand tot dichtbij groot vlak.

Ook indien er geen vlak dichtbij is, blijft de veldsterkte op het draadeinde hoog.

Bang voor discharge bij 1kW input (niet legaal in NL) in uw vertical of dipole antenna?

Dat is niet geheel onterecht, want eindimpedantie kan bij lage opstelling en zeer goede grondgeleiding richting 10 kOhm gaan en dat resulteert in eindspanning in orde van 4kVpiek (bij 1 kW inputvermogen).

Gelukkig hoeft dit geen probleem te zijn. Door het draadeindje terug te vouwen tegen de geleider aan (in feite een lusje), gaat het "punt"probleem over in een "rand/coaxiaal" probleem en neemt de veldsterkte sterk af. Voorwaarde is dat de buigradius van het lusje aanmerkelijk groter is dan de straal (halve diameter) van de (antenne)draad. Zie figuur 12

Eventueel kunt u de einden van een siliconen balletje voorzien.

7.5. Samenvatting:

Het lijkt aantrekkelijk om een extra diëlectricum toe te voegen om de werkspanning van een condensator te verhogen, helaas gaat dit meestal niet goed. Alleen als luchtinsluiting vermeden kan worden, kan een hogere werkspanning verkregen worden. In andere gevallen zal door corona ontlading van metaal naar diëlectricum (en omgekeerd) het diëlectricum uiteindelijk bezwijken.

De hoogste veldsterkten treden op bij randen en scherpe uitstekende delen. Bij grove benadering is de veldsterkte op randen en punten omgekeerd evenredig met de kleinste buigradius (bijvoorbeeld halve plaatdikte). Puntige uitstekende delen (denken aan lange schroeven aan randen van condensatorstructuren) veroorzaken de hoogste veldsterkte.

Indien puntige of dunne constructies onvermijdelijk zijn, kan een coating met materiaal met hoge doorslagsterkte uitkomst bieden.

Hoewel niet behandeld, vacuüm condensatoren kunnen uitkomst bieden, deze zijn echter wel prijzig.

Op sites voor Tesla Coil bouwers is ook veel info te vinden over hoogspanningszaken. Zij werken immers met echt hoge spanning.

8. Slot.

U bent aangekomen bij het eind van het document. De reden om dit document te schrijven is voortgekomen uit de vele vragen met betrekking tot halve golf eindgevoede antennes. Het lijkt erop of dat de halve golf monopool minder bekend is.

De inhoud is gebaseerd op antenneontwerpen waarin halve golf monopolen en hele golf dipolen werden gebruikt (zowel professioneel als hobbymatig, in het frequentiegebied van HF tot 2.45 GHz). Diverse gegevens en methoden zijn afkomstig uit Antennecursussen van TeTech.

TeTech heeft twee antenneontwerp cursussen beschikbaar: "Praktisch Ontwerp van "kleine" RF Antennes" en "Praktisch Ontwerp van RF Antennes" (<http://www.tetech.nl/cursussen.htm>).

These courses are also available in English (lectures and course material): "Practical design of small RF antennas" and "Practical RF Antenna Design" (<http://www.tetech.nl/courses.htm>).

Er zijn op dit moment geen plannen om het document te vertalen naar, bijvoorbeeld, het Engels.

Opmerkingen om de bruikbaarheid van dit document te verbeteren zijn zéér welkom. Bedrijven en instellingen kunnen rechtstreeks contact opnemen met TeTech.

Niet commerciële gebruikers (hobbyisten, studenten) kunnen hun vragen sturen naar divers@tetech.nl. Afhankelijk van de beschikbare tijd worden vragen beantwoord (dit is tot nu altijd binnen redelijke tijd gelukt). Probeer ook eens nieuwsgroepen. Ik ben geregeld te vinden op nieuwsgroepen met betrekking tot antennes (UK, NL, ES).

Wim Telkamp.
TeTech