HF-antennes en transmissielijnen

# Harold Plooijer, PA0QRB

Met dank aan:
JE3HHT, DL1PBD, DL2KQ (MMANA-GAL)
Walt Maxwell, W2DU ("Reflections")

MMana-GAL authors

Sinds 1974 gelicenseerd als PA0QRB

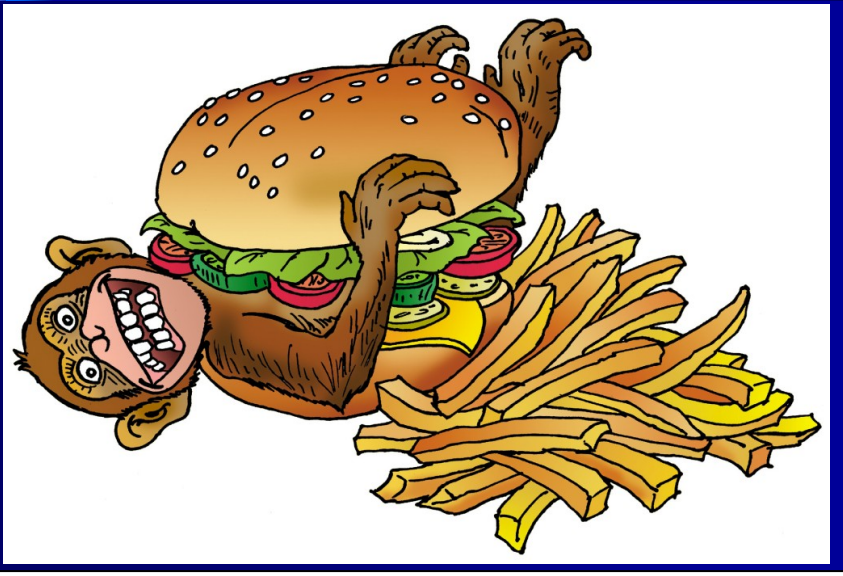
Marconist geweest (1975-1985)

Fervent DX'er (DXCC, WAZ etc.)

Tussen ca. 1980 en 2008 Q4 QRT op HF

Na opnieuw QRV: geëxperimenteerd met antennes, en daarover wil ik graag wat vertellen

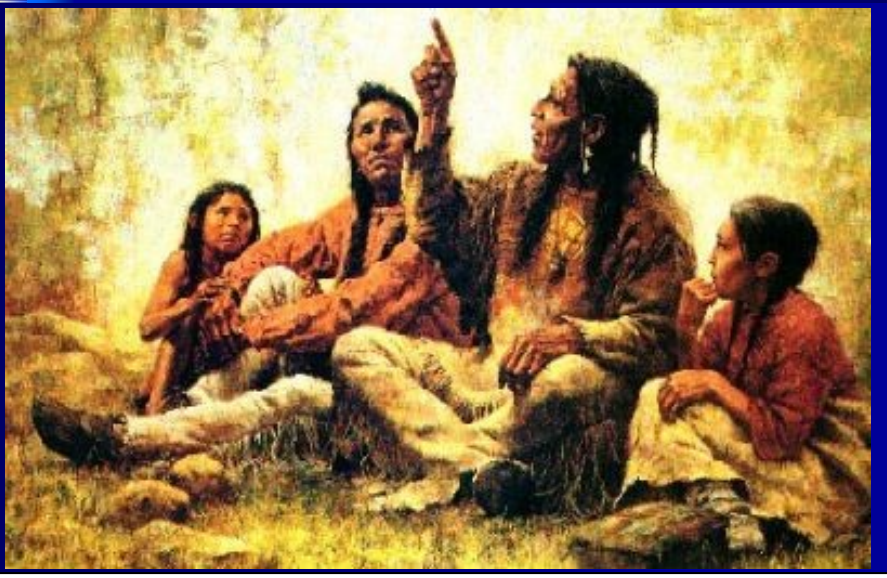
# Broodje aap verhalen



# Ongenuanceerde uitspraken



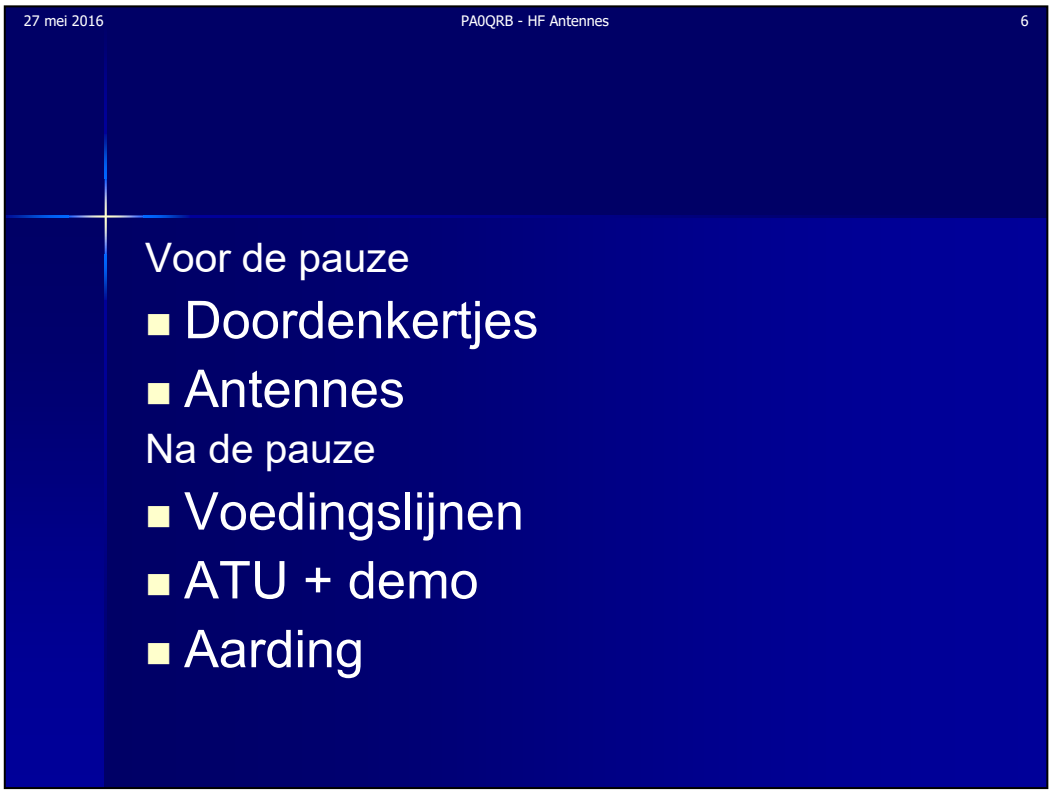
## Indianenverhalen



- Een dipool straalt niet in de lengterichting
- Een verticale antenne is de ideale DX-antenne
- Een 3 elements tribander is al een flinke (?) verbetering t.o.v. een dipool
- Als je gain specificeert in dBi dan til je de tent
- HF aarding in de shack is altijd noodzakelijk
- Twinlead is veel beter dan coax
- De SWR ***moet*** 1:1 zijn, want gereflecteerd vermogen ben je helemaal kwijt / is schadelijk voor je set
- Een ATU is een onding / “kassie belazer”
- Antenne X is véél beter dan antenne Y

# Koning SWR!






Ongenuanceerde uitspraken

Theorie

Isotrope straler

Draadantennes, dipool, magloop

De verticale rondstraler

Gerichte antenne-systemen (“beams”)

Wiskunde: blijft beperkt tot twee formules

Na de pauze

Voedingslijnen, baluns en matching

De ATU, demo

Hoogfrequent aarding

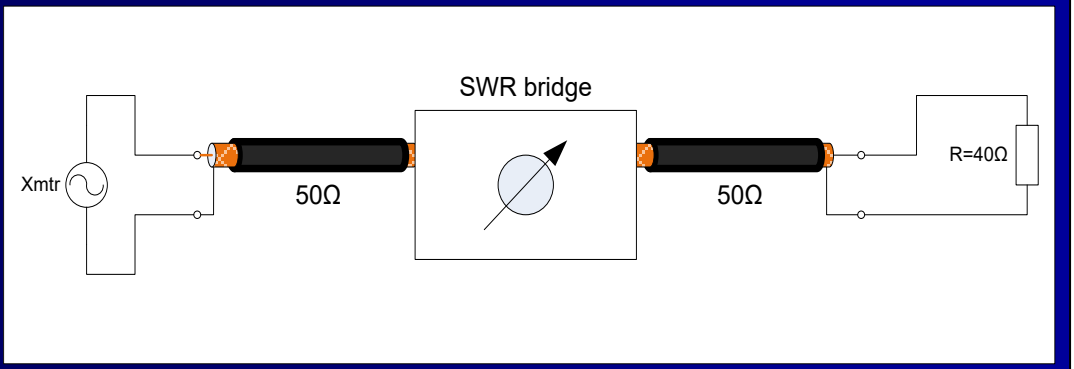
Praktijkvoorbeelden

Antwoorden op doordenkertjes

Discussie en vragen

# Ter overdenking

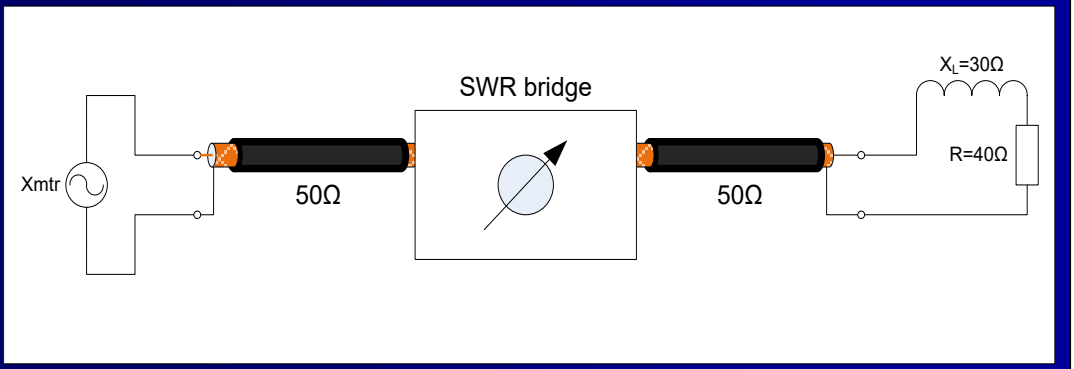
$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$




VSWR = 50/40 = 1.25

# Ter overdenking

$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$

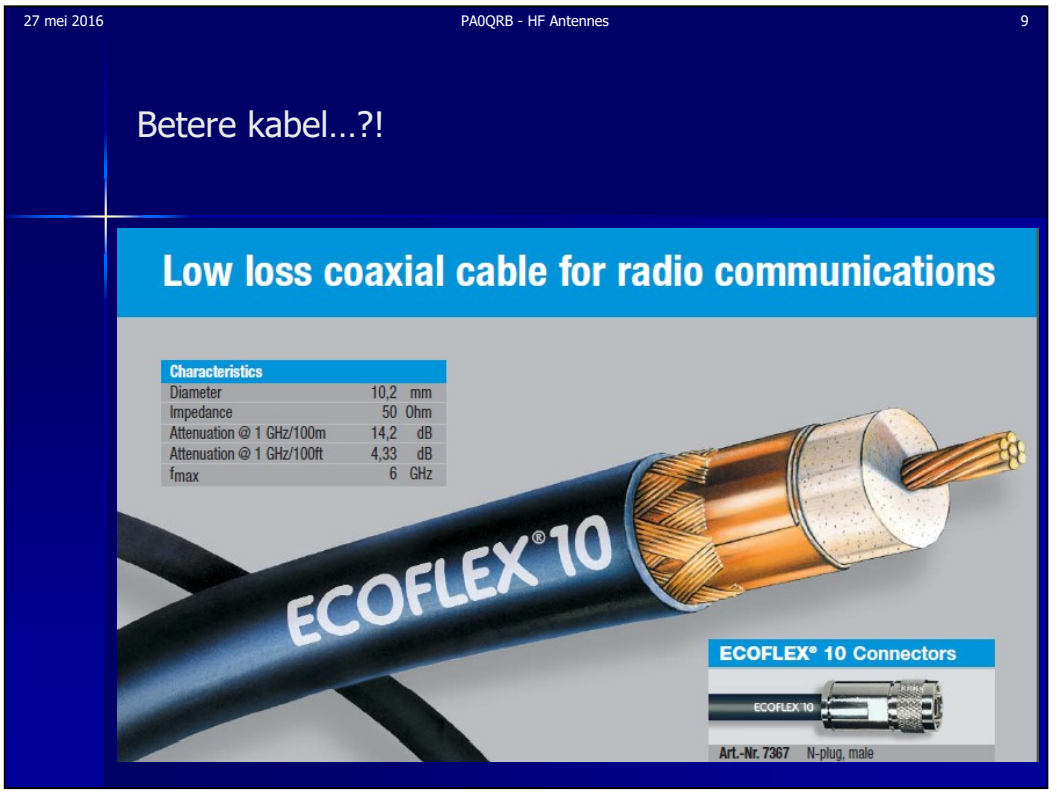



$$Z_L = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50\Omega$$

**VSWR = ???**

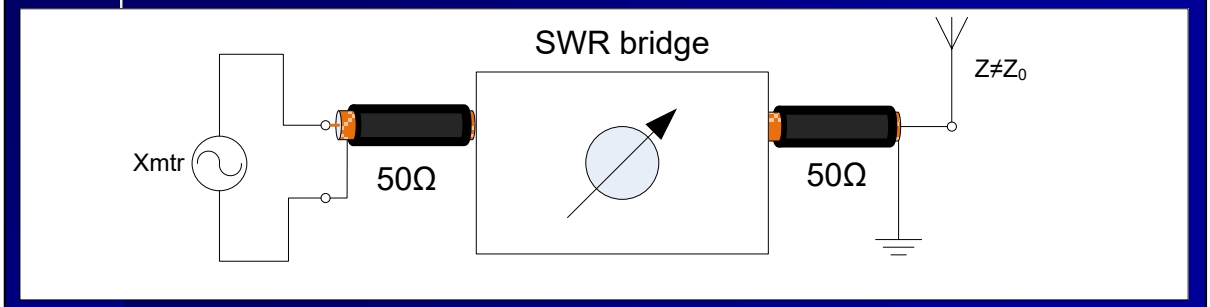
Spoeltje toegevoegd

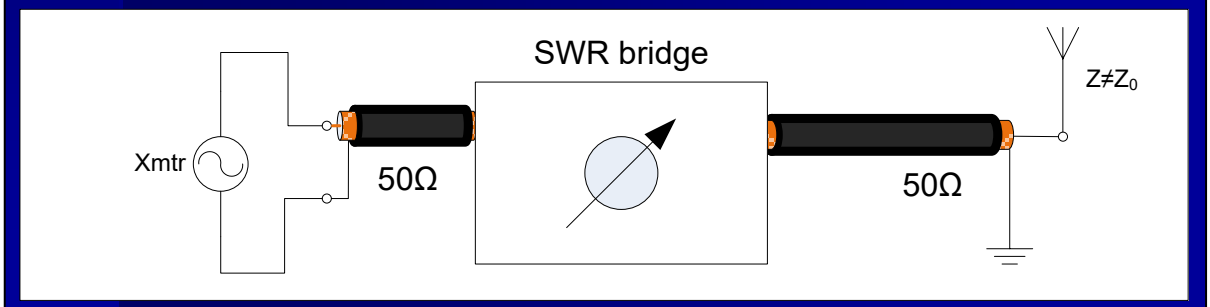
## Betere kabel...?!




- 50 MHz antenne
- flink stuk RG-58 coax
- SWR 1:1.2, vrijwel perfect
- Vervangen door Ecoflex-10
- SWR nu: 1:1.8 ?!?!

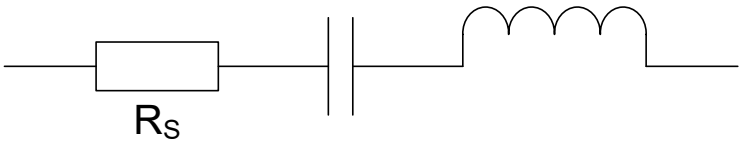
# SWR verandert met lengte kabel




Wat is hier aan de hand? (Oplossing: einde presentatie)

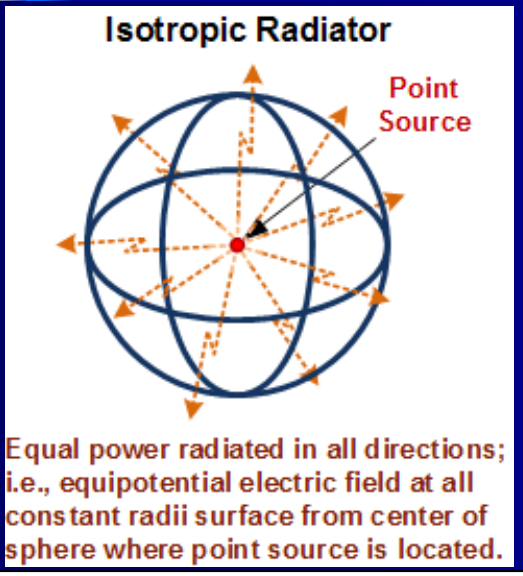
## De antenne in resonantie




- Vervangschema: gedempte seriekring (mits de frequentie niet teveel (< 20%) afwijkt van de basis resonantiefrequentie)
- De kringweerstand Rs is opgebouwd uit:
  - De stralingsweerstand
  - De verliesweerstand
- De kring is in resonantie, dus de L en de C kunnen we wegdenken
- Als de antenne niet resoneert heeft $Z_A$ een reactieve component (fasehoek):
  - Capacitief als $f < f_R$ ($\lambda > \lambda_R$ , antenne te kort)
  - Inductief als $f > f_R$ ($\lambda < \lambda_R$ , antenne te lang)

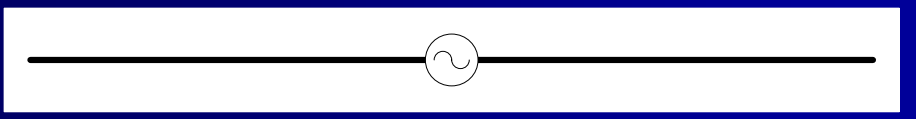
Let op: een dipool is bij resonantie iets korter dan een halve golf! (typisch ongeveer 0.47 golflengte)

## De isotrope straler



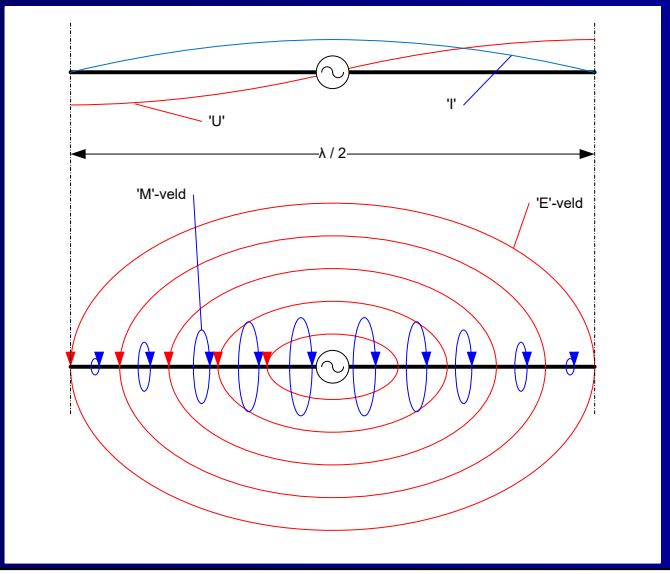

- Theoretisch geval
- Straalt per definitie in alle richtingen even sterk (bolsymmetrie)
- Wordt gebruikt als “standaardantenne” voor het vaststellen van gain (antennewinst)
  - Gain wordt dus uitgedrukt in dBi:
    dB t.o.v. een isotrope straler
  - Je tilt de tent alleen als je dat er niet bij zegt

## De (halvegolf) dipool

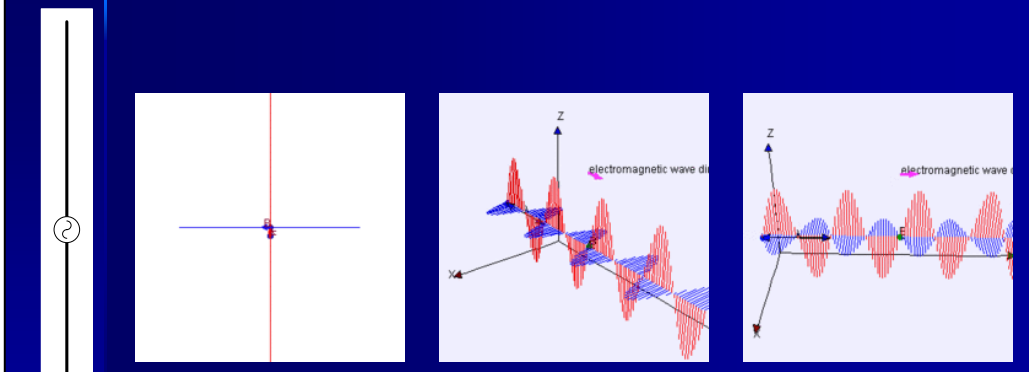


- Simpel, maar ja: wat is simpel?
- Eenvoudigste geval: vrije ruimte
- Dat hebben we niet als amateur, daarvoor geldt: reeël aardvlak
- Stralingsdiagrammen voor beide situaties

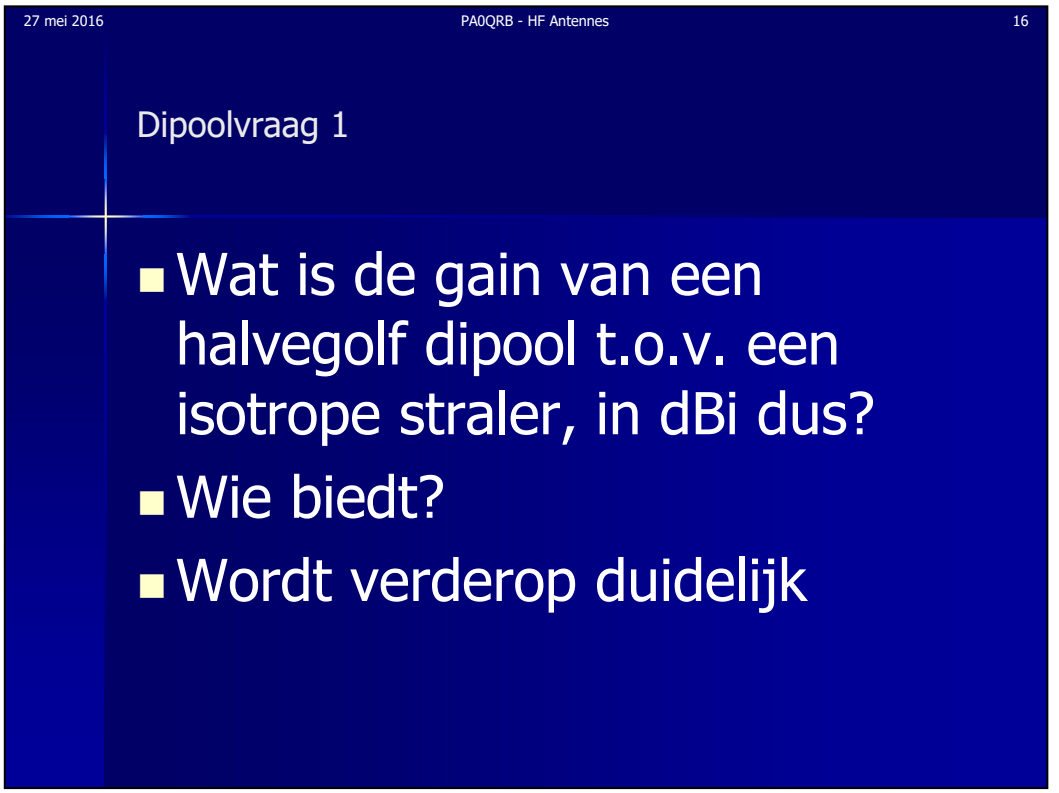
# EM straling van een dipool (1)



# EM straling van een dipool (2)

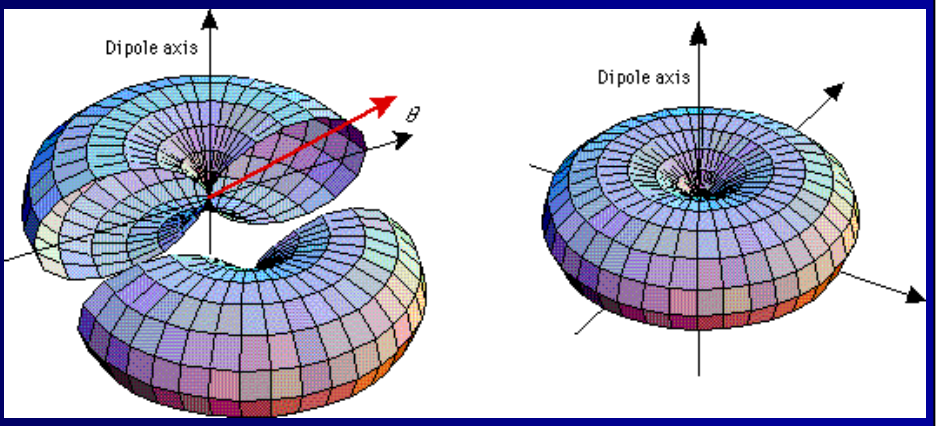



Bron: Wikipedia

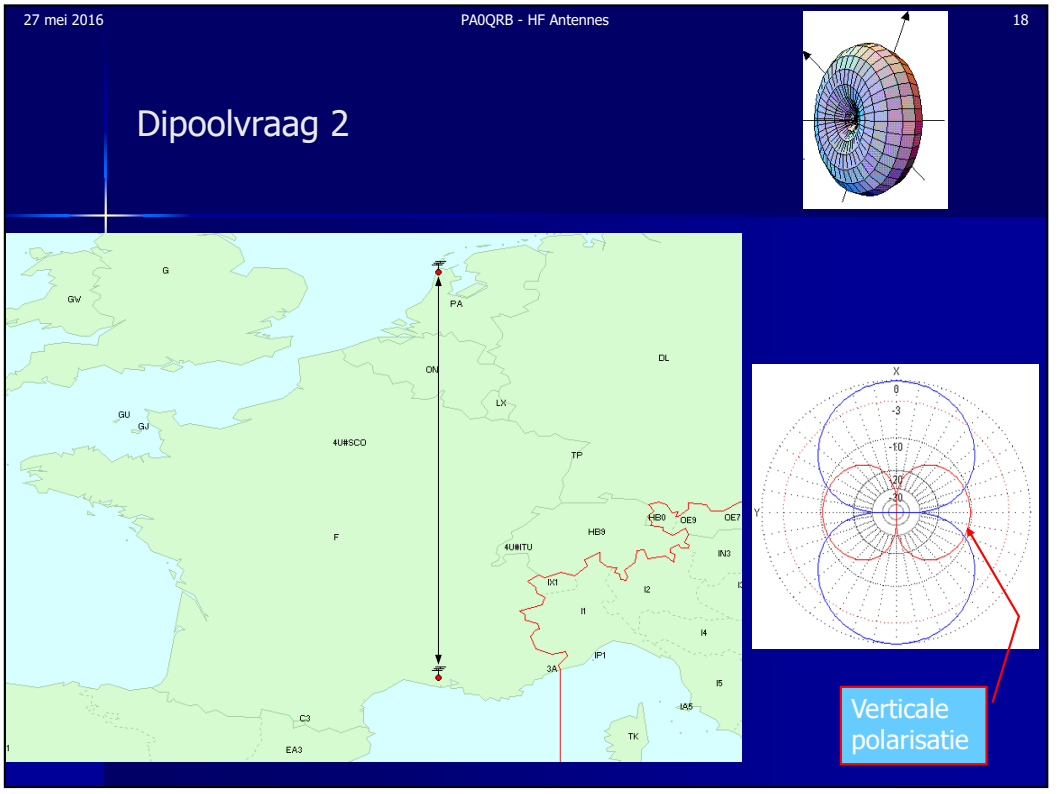



Mogelijke antwoorden: zo ongeveer alles tot 7 dBi is goed, afhankelijk van de context

## Dipool in de vrije ruimte




- Stralingspatroon heeft de vorm van een torus (“doughnut”) met de draad door het midden
- Gain: 2.1 dBi precies dwars op de antenne
- In de lengterichting geen veld
- Polarisatie = richting ‘E’-veld (draad)




- Amateur 1: Den Helder
- Amateur 2: Frankrijk, Golfe du Lion
- Allebei: halvegolf dipool, N-Z opgehangen (draden liggen in elkaars verlengde)
- Vraag: kunnen ze ‘s avonds QSO maken op 80 meter? Afstand ≈ 1000 km.
- ...
- Antwoord: UFB! Geen enkel probleem.

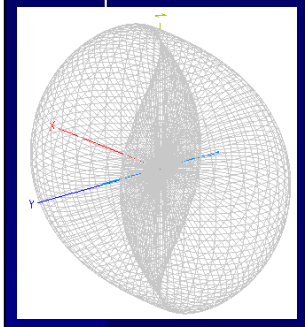
Opstraalhoek ongeveer 28 graden bij Hi = 300 km bij verwaarlozen kromming aardoppervlak

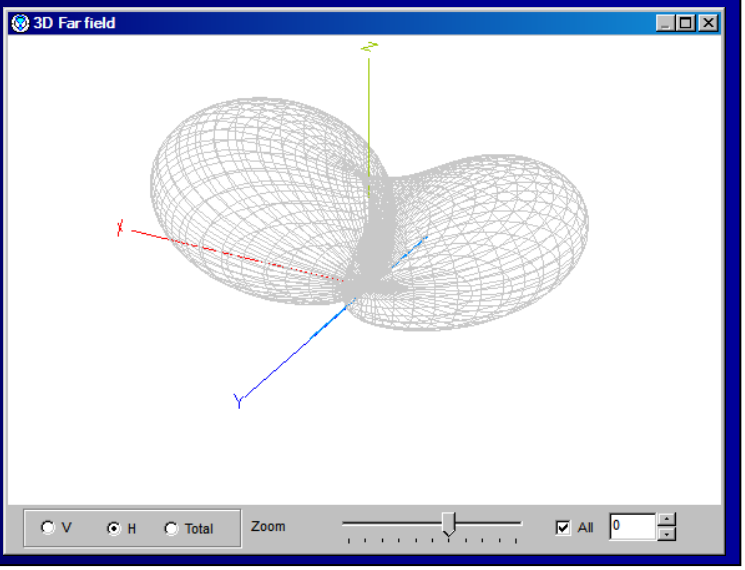
De horizontaal in beide QTH’s maakt een hoek van ca. 9 graden

De werkelijke elevatie is dus ongeveer 28 – 9/2 = 23.5 graden

“Waarom” komt in volgende slide

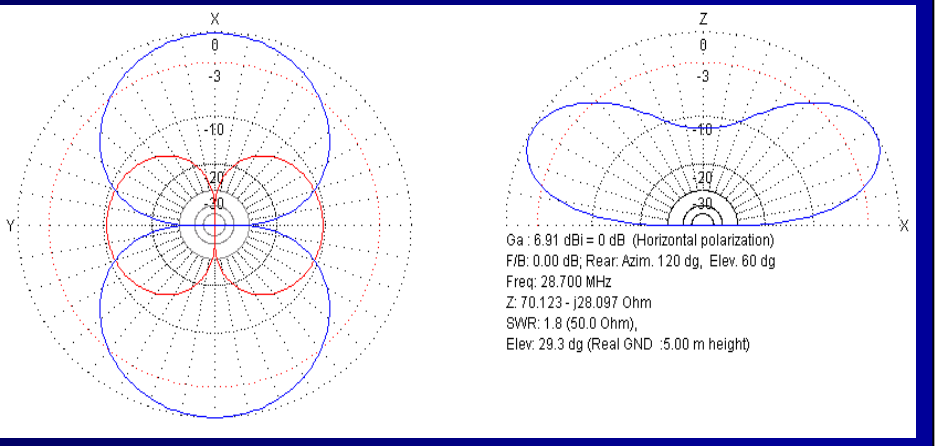
# Dipool boven echte aarde
# Horizontale polarisatie





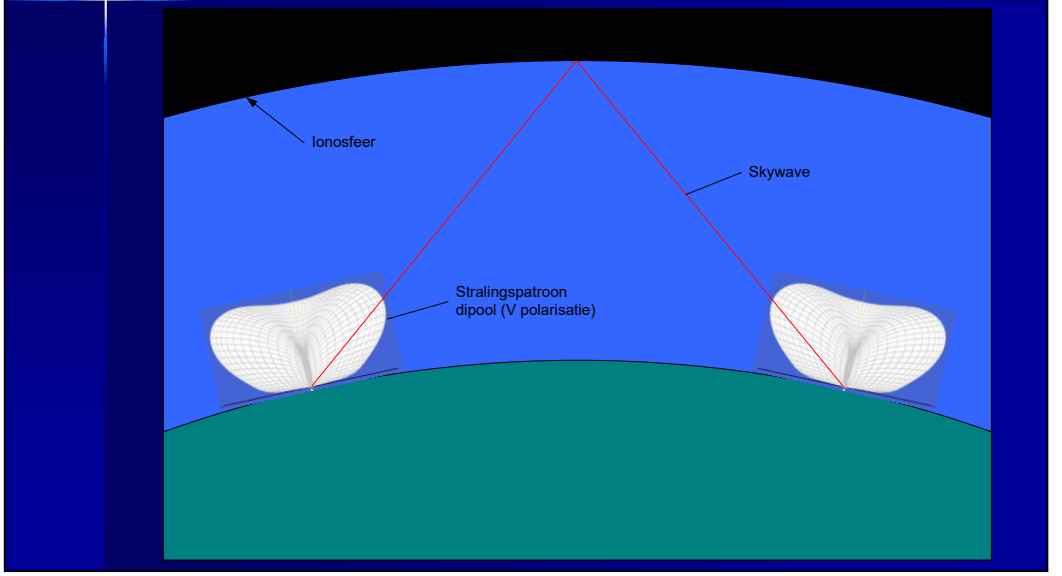

- Antenne is uitgespannen in de ‘Y’-richting
- Afhankelijk van de hoogte wordt het stralingspatroon meer of minder “plat gedrukt”. Verder wordt het deel onder het maaiveld omhoog gereflecteerd

# Dipool boven echte aarde




- Daardoor een gain die kan oplopen tot ca. 7 dBi bij 20 a 30 graden elevatie
  - Beruchte instinker bij opgave gain

## Dipool boven echte aarde

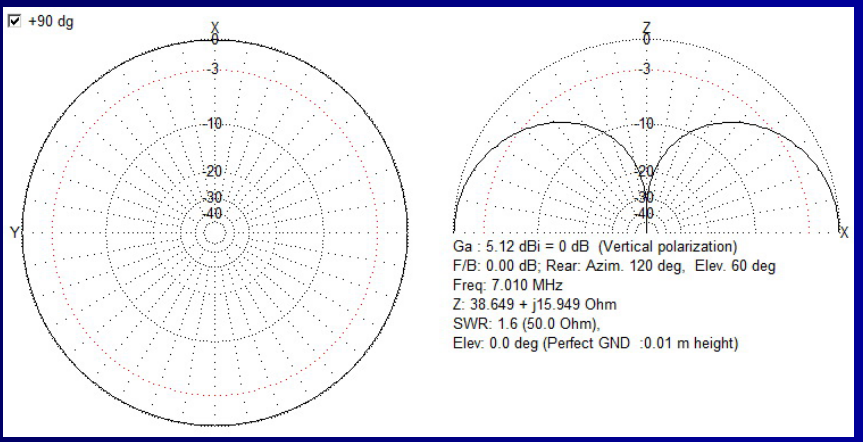



- Bij diezelfde elevatie straalt de dipool *wel* in de lengterichting (met verticale polarisatie)!
  - Vandaar dat dat Franse QSO toch mogelijk is
  - Kortom, een dipool is op HF een *rondstraler* waarvan de gain en het vlak van polarisatie variëren met de azimut en de elevatie
- Impedantie ≈ 75 ohm in het midden
  - Gevouwen dipool: ≈ 300 ohm

Als je een juichverhaal hoort over een antenne met “een gain van wel 10 dBi”, dan is die dus nog net een halve S-punt beter dan een dipool

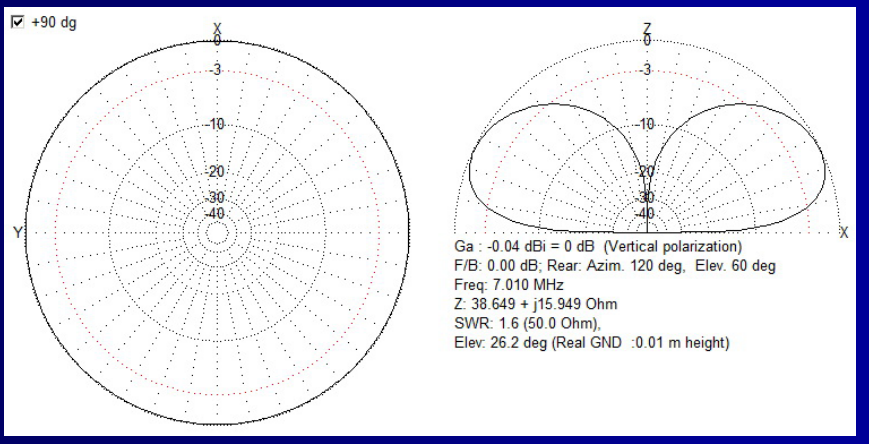
Gevouwen dipool: zie Wikipedia ($P = I^2.R$. Omdat in het voedingspunt voor hetzelfde vermogen nog slechts de halve stroom loopt (de andere helft loopt in de paralleldraad), moet R vier maal zo groot worden opdat P hetzelfde blijft).

# De ideale vertical




- Kwart golflengte hoog
- Boven een ideaal grondvlak lijkt het stralingsdiagram op dat van een dipool, 90 graden gekanteld
- Maximale straling dus in het horizontale vlak
- Rondstraler, verticale polarisatie
- Gain ca. 5 dBi

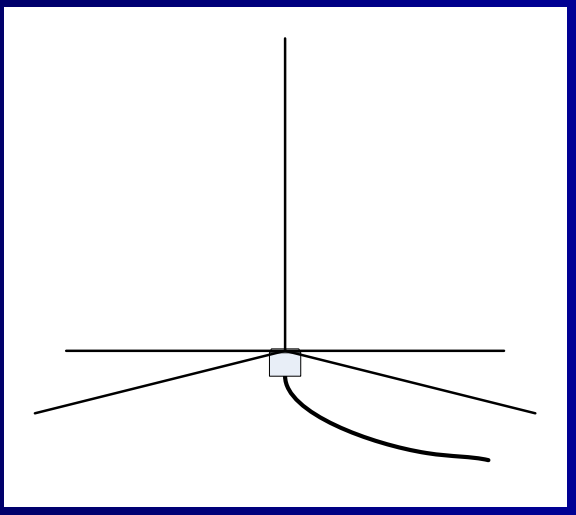
## Vertical boven echte aarde




- Boven een echt aardvlak wordt de situatie dramatisch anders
- In het horizontale vlak geen straling meer
- Maximum op 20 a 30 graden elevatie
- Antennewinst krimpt tot 0 dBi door aardverliezen
  - Radialen helpen alleen als je er heel veel van hebt tot minstens 0.4λ vanaf het voedingspunt
- Helemaal niet zo'n fantastische DX-antenne dus, tenzij je op zee zit
- En denk aan de buren…
- Kun je wat aan doen door er een GP van te maken

Radialen, bron: W2DU, "Reflections"

## De Groundplane (GP)

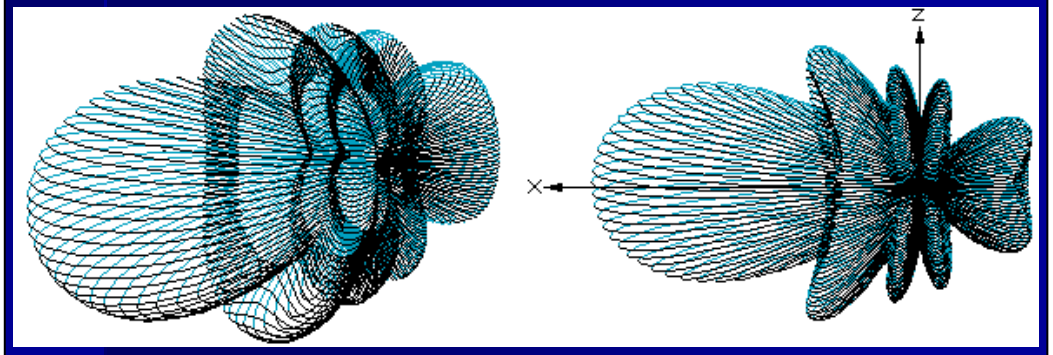


- Nog steeds een kwart golf vertical
- Kunstmatige aarde met (meestal) vier radialen, ook een kwart golf lang
- Als de radialen 30 graden onder de horizontaal aflopen, past een GP zonder verdere maatregelen aan op 50 ohm coax
  - Binnengeleider aan de straler
  - Afscherming aan de radialen
- Hoeft niet geaard te worden
- Tenminste op λ/2 hoog, anders heb je nog steeds last van de aarde

Bron: ARRL Antenna Handbook

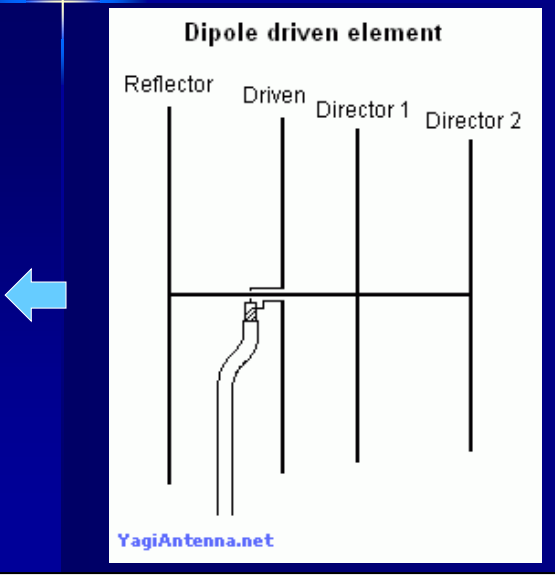
Extreem geval: verticale dipool

## Gerichte antennes ("beams")




- Bestaan uit een aantal elementen om bundelwerking te krijgen
- Diverse varianten: Yagi-Uda, Quad, en diverse varianten en combinaties daarvan
- Het principe is steeds hetzelfde (uitzondering: gerichte antennes met 100% aangedreven elementen zoals broadside arrays en collinears)

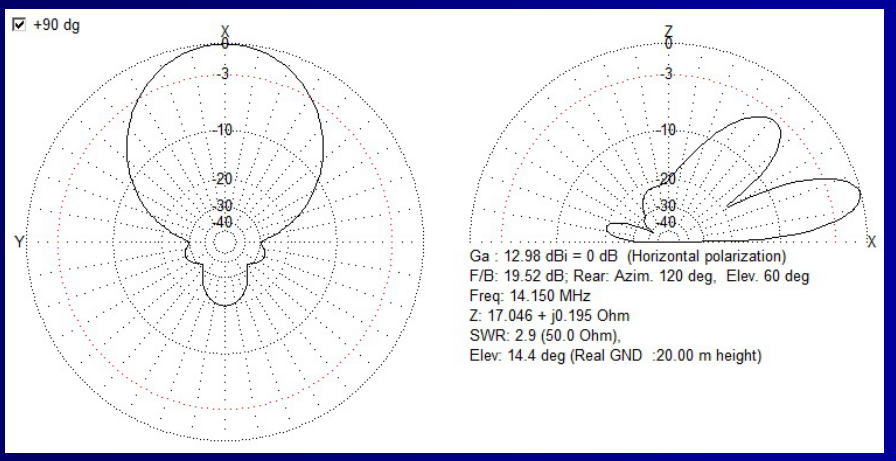
## De Yagi(-Uda)




- De bedoeling is om een stelsel van twee of meer elementen (waarvan er maar één wordt aangedreven) zodanig te dimensioneren dat richtwerking optreedt
- Bestaat uit:
  - De “straler”, het aangedreven element. Dit is meestal een halvegolf dipool
  - Een “reflector”, typisch ≈5% langer dan de straler. Stroom loopt achter op de straler (inductief gedrag).
  - Nul, één of meer “directoren”, korter dan de straler. Stroom loopt voor op de straler (capacitief gedrag).

  Daardoor treedt een voorkeursrichting op waar deze faseverschillen met elkaar meewerken.
- Reflector en director(en) worden “parasitaire elementen” genoemd
- Een yagi is een end fire array

## Stralingsdiagram 3-element Yagi

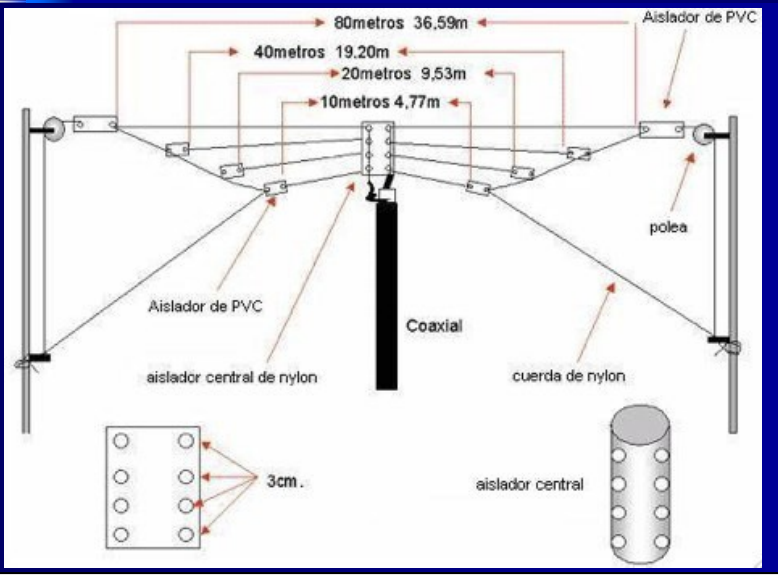



- Gain: 13 – 7 = 6 dBd (1 S-punt dus)

Gain is 13 dBi, maar dat is dus maar 6 dB (1 S-punt) boven een dipool (7 dBi)

Maar: F/B = 19.5 dB! Dat is meestal veel belangrijker, vooral voor ontvangst

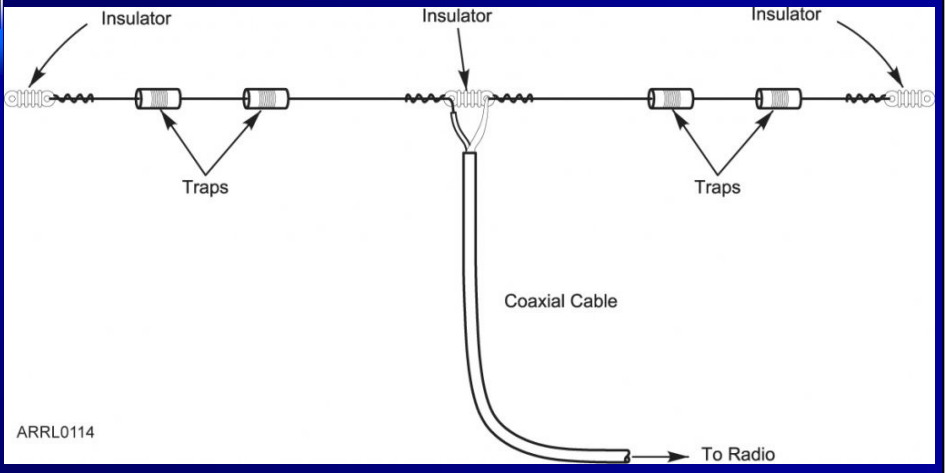
# Multiband antennes




- Handig! Hebben we maar 1 antenne nodig voor alle amateurbanden (nou ja, bijna alle)
- Nadeel: minder rendement, door compromissen

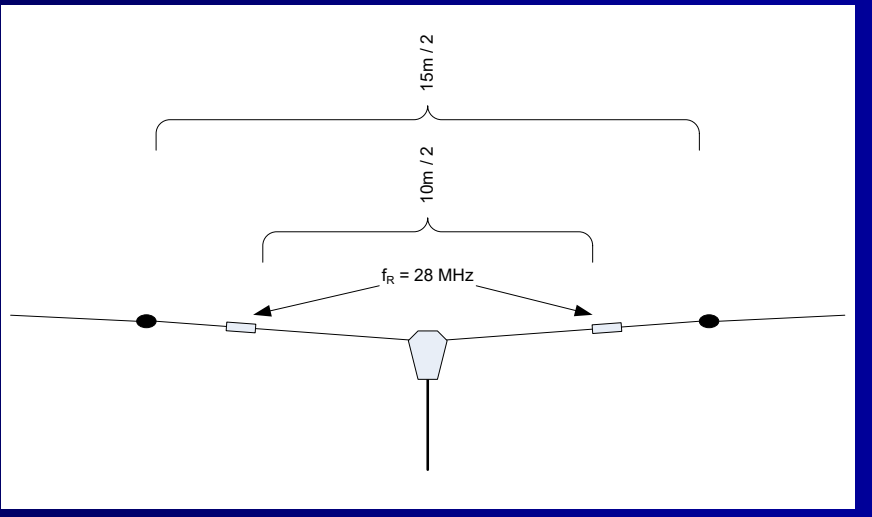
- Traps
  - NU3E
  - W3DZZ
- “Slimme lengtes”
  - G5RV / ZS6BKW
  - Windom en andere Off Center Fed (“OCF”) antennes
  - Zepp / J-pole
- Ja en er bestaat nog een type, wat ik de “dummyload met aftakking” noem

## Multiband antennes: Traps



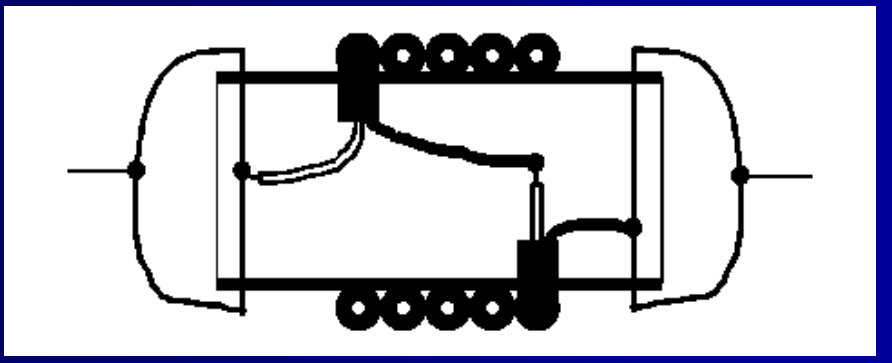

- Traps
  - NU3E
  - W3DZZ

# Traps




- Een “trap” is een parallelkring
- In resonantie vormt die een isolator (“sperkring”)
- Beneden resonantie werkt een trap als verlengspoel
- Kunnen we gebruiken om een antenne op meer dan één band te gebruiken

## Traps



- Simpel te maken: coax op PVC pijp wikkelen
- Ontwerpsoftware op Internet
- Kan bij dipolen, beams en verticals (GP: ook de rad.)
- Nadeel:
  - Traps geven wat verlies (≈ ½ dB)
    Kan worden beperkt door Teflon of schuimcoax te nemen
  - Smalbandig
- Bij buitengebruik goed insealen

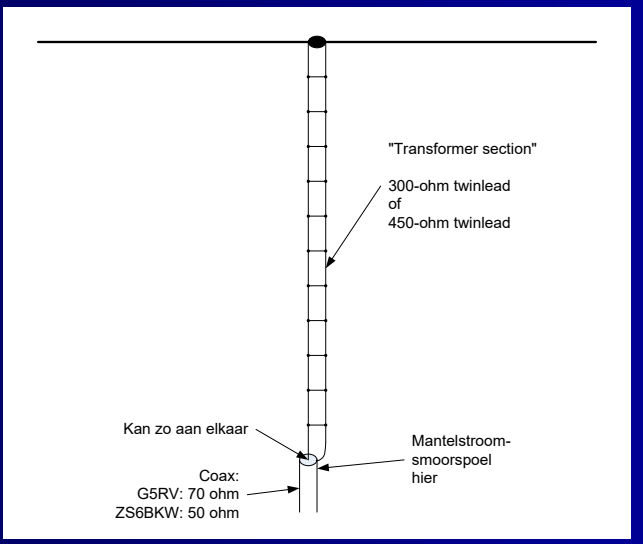
Op f < resonantie: inductief gedrag. Daarboven: capacitief gedrag (komt niet voor).
Publieksvraag: waarom niet?

## Traps



- Simpel te maken: coax op PVC pijp wikkelen

# Multiband antennes: De G5RV en afgeleiden




- De twinlead sectie werkt als multiband trafo naar 70 ohm. Door de “slimme lengte” werkt dit op een aantal banden (niet allemaal!)
- Op de laagste band is het een verkorte halvegolf dipool
- Daarboven: veelvoud daarvan
  - Daardoor werkt de G5RV op de hogere banden als een collinear array
  - Voordeel: de gain kan in de maxima oplopen tot 10 dB!
  - Nadeel: de dips zijn erg diep...
- Wel conform de gebruiksaanwijzing dimensioneren en ophangen, anders is de “G5” een ramp
- ATU gebruiken (wie zegt dat? G5RV zelf!)
- De ZS6BKW is een geoptimaliseerde versie voor 50 ohm
- Maten (ZS6BKW, 80-6m ex. 30 en 15m): 2 x 13.75m horizontaal, 12.2m ladderlijn. Overige versies: zie de literatuur.

Multiband met weinig poespas

Veelal onbegrepen, daardoor mishandeld, daardoor verguisd

G5RV is voor 10, 20 en 40m zonder tuner (dwz, VSWR < 2. G5RV zelf zegt: tuner nodig op alle banden behalve 20m)

De ZS6BKW doet het op 40, 20, 17, 12, 10 en 6 m zonder tuner

Beide antennes doen het *met* tuner op alle HF-banden behalve op 30 en 15 m (sterk reactief, hoogohmig gedrag)

Eigen onderzoek is consistent met bovenstaande, maar *sterk inconsistent* met de website van ON9CVD!

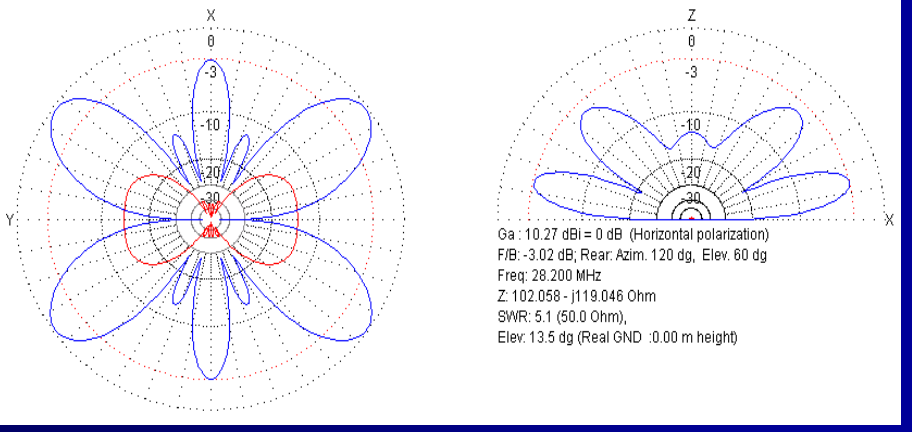
Het grootste probleem t.a.v. rendement van de G5RV-achtigen is SWR-verlies in de transformer section, niet in de coax

Bij  natte 450 ohm twinlead kan het op 20 m (VSWR, transformer section, =10) 1.6 dB bedragen (droog: 0.345 dB).

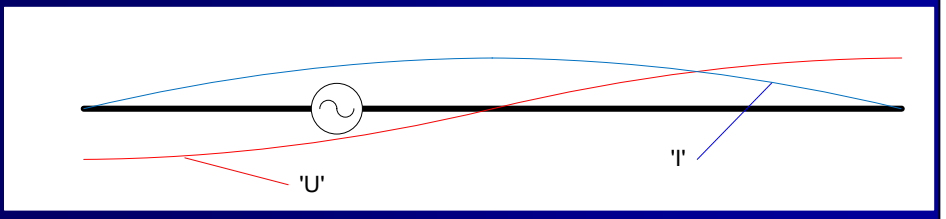
Oplossing daarvoor: kippenladder lijn en herberekenen voor 600 ohm

De antenne is kort voor 40 meter en heeft daardoor een relatief kleine apertuur. Ook dit geeft EIRP-verlies.

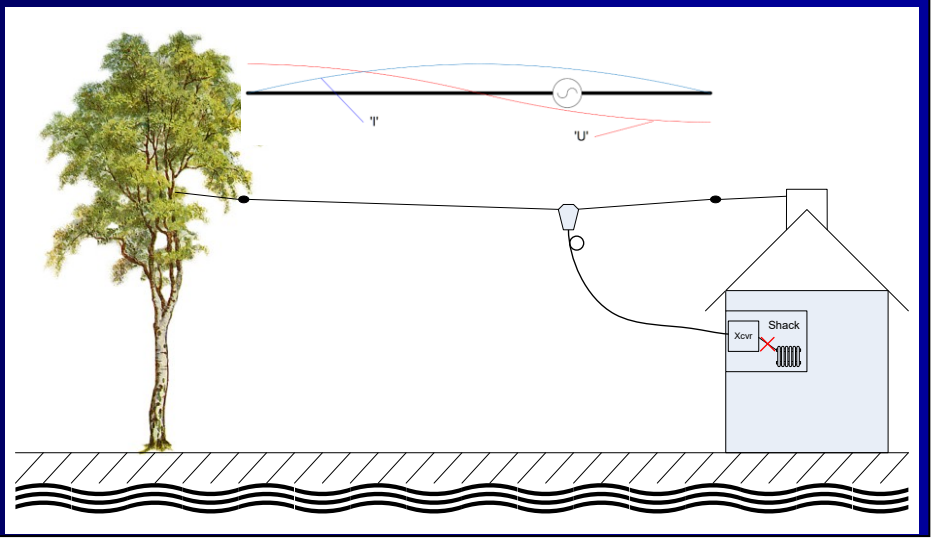
# Stralingsdiagram ZS6BKW op 10m



# De "Windom" of OCF dipool



## De Windom of OCF dipool

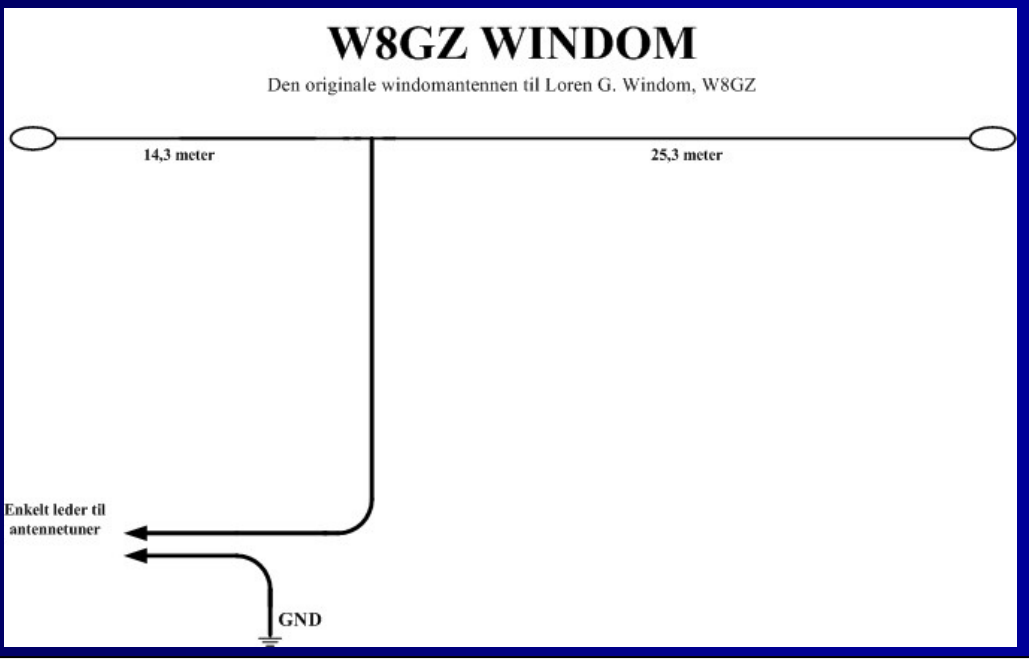



Wat gebeurt er als we een dipool *niet* in het midden gaan voeden?
Btw, de originele Windom antenne is geen OCF dipool, maar een halve golf horizontale draad met een enkele neerdraad naar een tuner! Zie volgende dia.

- Zoek een punt op een halvegolf straler waarvoor de impedantie op een aantal banden (80-40-20-10, 15 geeft stroomknoop) (min of meer) gelijk is
- Ga de straler op dat punt voeden. Je komt daarbij op ongeveer 1/3 uit
- Z in dat punt: ca. 300 ohm. Speciale trafo's verkrijgbaar (o.a. Fritzel)
- Omdat de antenne niet symmetrisch is, is een stroombalun verplicht
- Afstraalgedrag lijkt op G5RV
- Maten: zie literatuur

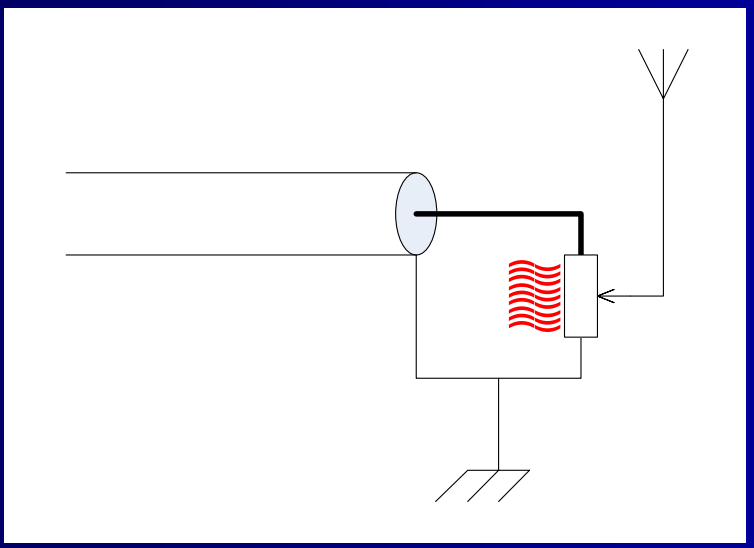
Bron: VE2CV, VE3KLO (QST, aug. 1990)

# De originele Windom antenne (1920)



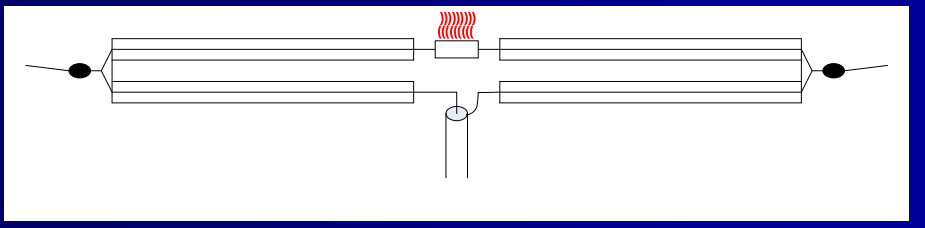

Uitleg: https://radiodx.com/articles/technical/antennas/the-windom-antenna/

## De “ultieme” multiband...



... Is de dummyload-met-aftakking ;-)

## De “ultieme” multiband...



- Vaagtaal zoals “Terminated Folded Dipole”
- Past altijd goed aan (SWR ≈ 1:1)
- Meestal 5.0/5 reviews op eHAM.net
- En het kost je zo maar de helft van je TPO, nog meer als je pech hebt
- Ultiem? Mwah...

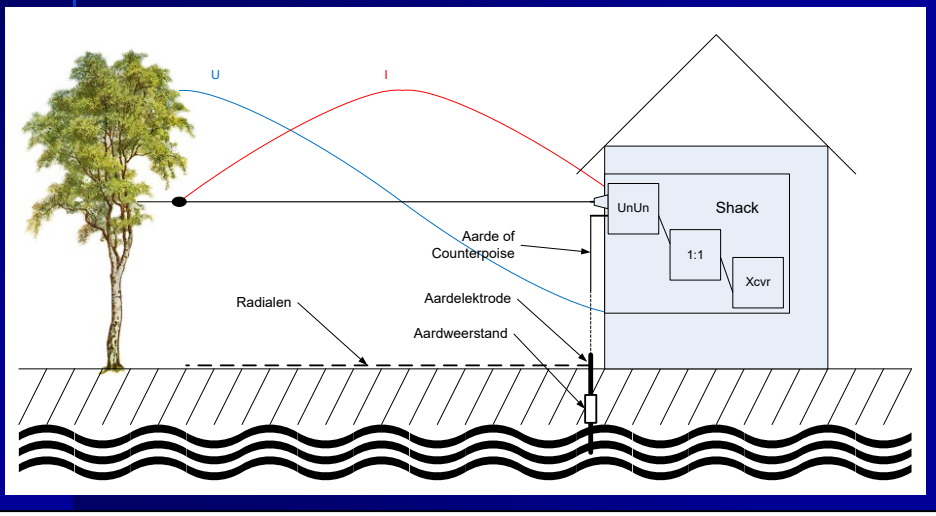
## De echte multiband...



- Er bestaan echte broadbands. Prijs en ruimtebeslag buiten amateurbereik
- Gordijnantenne

## Long (Random) wire en UnUn: Draad is *niet* resonant




De lengte van de antennedraad mag op *geen enkele werkfrequentie* resonant zijn. Zorgvuldig kiezen van de draadlengte kan een echte multiband antenne opleveren, met zeer acceptabel rendement.

Er wordt doorgaans een 1:9 unun gebruikt (men rekent op een belastingsimpedantie in de orde van 450 ohm).

De lengte van de counterpoise is typisch één tot anderhalve meter. Eventueel kan een stuk van de coaxiale voedingslijn als counterpoise worden gebruikt, MITS deze op de lengte die de counterpoise moet hebben is afgesloten met een 1:1 unun.

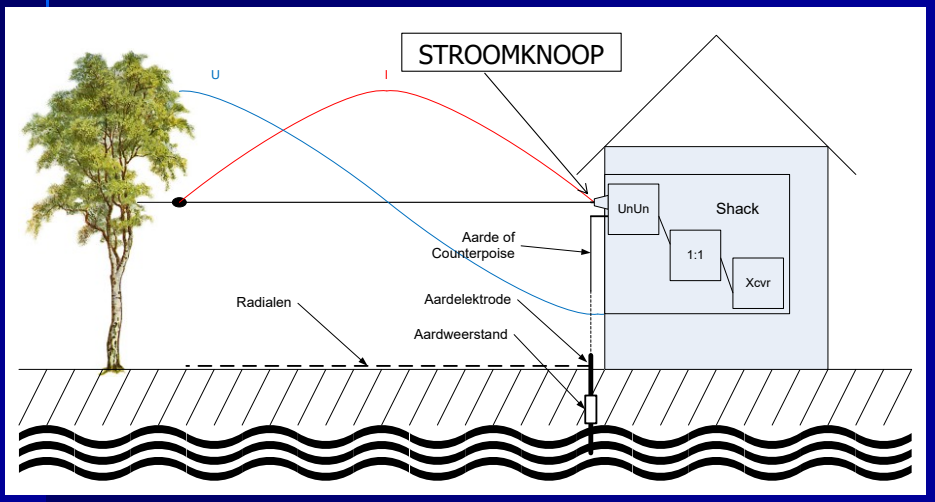
Gebruik alleen een HF aardaansluiting (hiervoor niet de veiligheidsaarde gebruiken) als het met een counterpoise niet lukt om een goede aanpassing te krijgen. Via een aarde kunnen stoorsignalen de shack binnendringen. (Zie de whitepaper van K9YC hierover.)

De 1:1 unun is sowieso verplicht. Als er een counterpoise is aangebracht komt de 1:1 unun direct achter de 1:9 UnUn.

Er is vrijwel altijd een transmatch nodig om de aanpassing bij de set op 50 ohm te krijgen.

## EndFed en UnUn:
## Draad is *wel* resonant






De antennedraad moet op *alle werkfrequenties* resonant zijn en wel zodanig dat zich in het voedingspunt een stroomknoop (punt met hoge impedantie) bevindt.

Er wordt doorgaans een 1:49 unun gebruikt (immers, resonante end fed antennes hebben in het voedingspunt een zeer hoge impedantie).

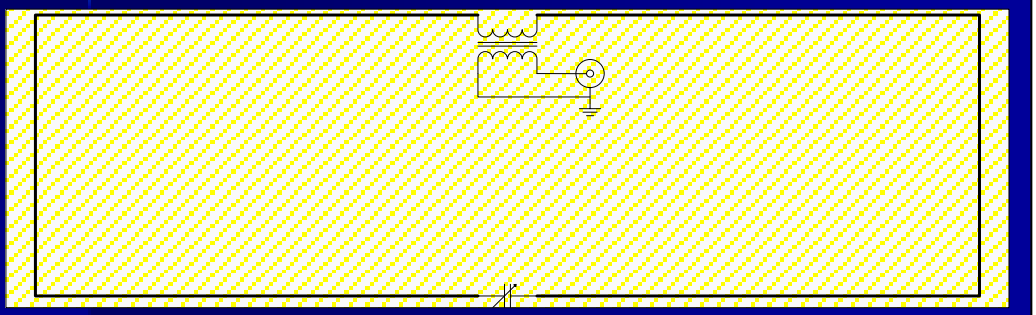
De lengte van de counterpoise is typisch één tot anderhalve meter. Eventueel kan een stuk van de coaxiale voedingslijn als counterpoise worden gebruikt, MITS deze op de lengte die de counterpoise moet hebben is afgesloten met een 1:1 unun.

Gebruik alleen een HF aardaansluiting (hiervoor niet de veiligheidsaarde gebruiken) als het met een counterpoise niet lukt om een goede aanpassing te krijgen. Via een aarde kunnen stoorsignalen de shack binnendringen. (Zie de whitepaper van K9YC hierover.)

De 1:1 unun is sowieso verplicht. Als er een counterpoise is aangebracht komt de 1:1 unun direct achter de 1:49 UnUn.

Er is vrijwel altijd een transmatch nodig om de aanpassing bij de set op 50 ohm te krijgen.

## De STL ("Small Transmitting Loop")
## a.k.a. de Magnetic Loop



- Pro: stralingsdiagram als van vertical
- Pro: kan op kleine hoogte boven de aarde
- Con: laag rendement (afhankelijk van draaddikte: ohmse verliezen)
- Dik draad of buis: hoge Q kleine BW en vice-versa voor dun draad
- Moet afstembaar zijn
- Inkoppelen: (breedband) trafo of lus. Ook wel: Gamma match
- Hoge spanning (kV!) over de C
    - Grote plaatafstand of vacuüm C
    - Kan je verdelen over vaste C (keramische schijf) en kleinere variabele C
    - Bij multiband: vaste C omschakelen

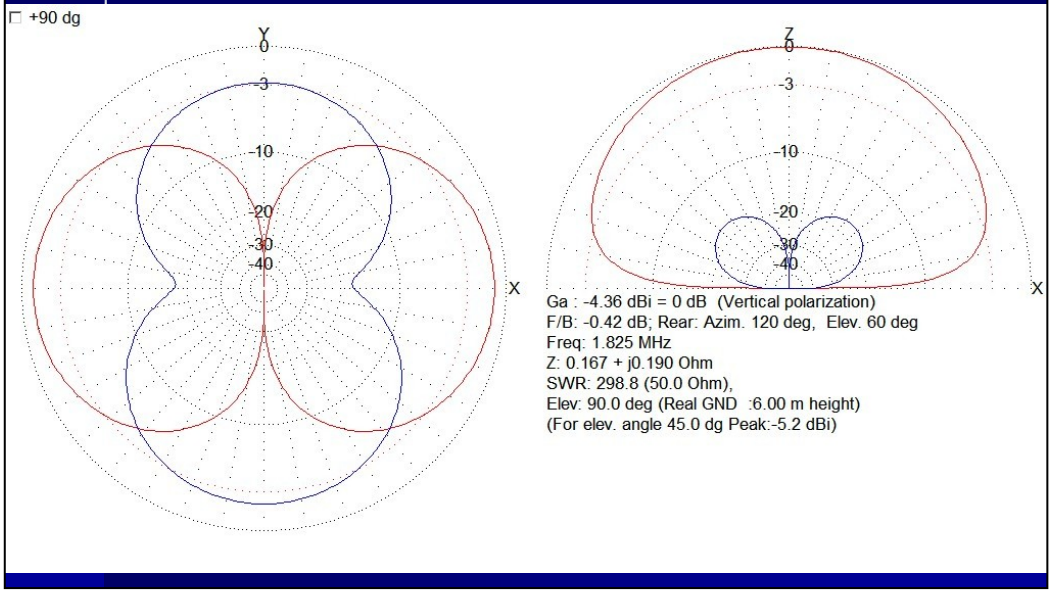
PA0QRB gebruikt  oor 160m: 21 meter 2.5 qmm draad (soepel), uitgespannen als rechthoek




Schijfcondensator 200 pF

Vacuum condensator 5 – 75 pF

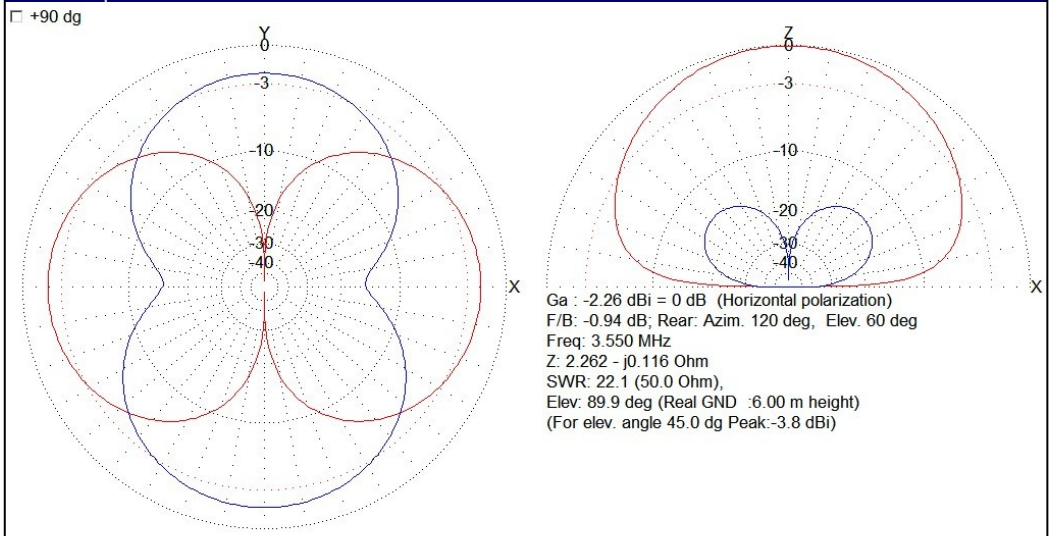
# STL op 160 meter




Bij oplopende lengte/golflengte verhouding:

- Meer energie in horizontale polarisatievlak
- Hoger rendement
- Gaat steeds meer als een dipool werken

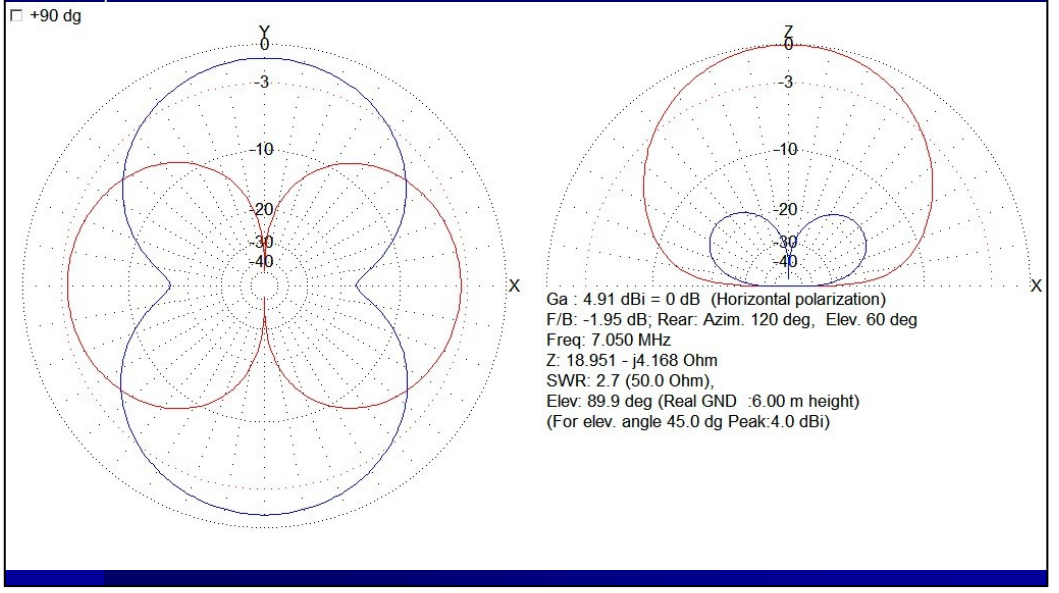
# STL op 80 meter




Bij oplopende lengte/golflengte verhouding:

- Meer energie in horizontale polarisatievlak
- Hoger rendement
- Gaat steeds meer als een dipool werken

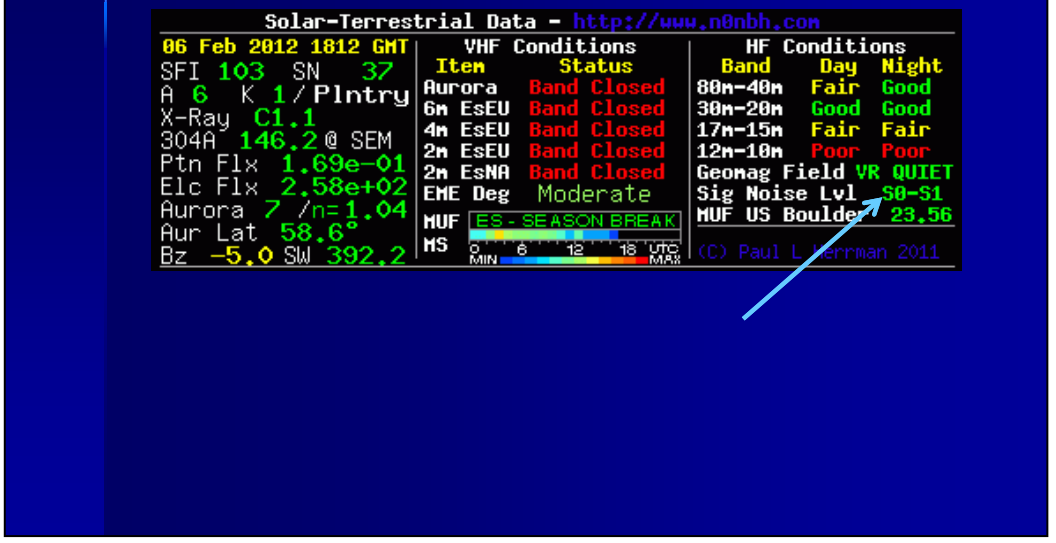
# STL op 40 meter




Scherpe piek op vertikaal, maar erg smal dus weinig energie

Weinig energie in horizontale polarisatievlak

## Antenneruis




- Ook antennes produceren ruis
- Kun je niets aan doen: komt voor een groot deel van de zon en uit de ruimte, rest is thermisch
- Vandaar dat het ruisniveau altijd toeneemt (eh, toe *hoort* te nemen) als je een antenne aankoppelt, ook als het verder stil is op de band

Hoor je geen toename, dan zijn er twee mogelijkheden:

- Het ruisniveau van je ontvanger ligt boven de antenneruis of

- Je ontvanger is doof

“Sig noise lvl” slaat op

- Hoeveel last kun je verwachten? Kijk op website “Propagation Solar Data” bij “Signal Noise Level”, daar staat het in S-punten voor een isotrope antenne
  - Metergolven (10 m), maar kan ook op lagere frequenties

## Antennes: de praktijk

- Het mes van een goede antenne snijdt aan twee kanten: **zenden en ontvangen**
- Kijk naar je situatie, ruimte en middelen!
- Een vertical lijkt handig maar denk aan de radialen, de aarding en **EMI**
- Een langdraad is het ook niet echt
- Dan ben je al gauw op een GP, een dipool-achtige of op een beam aangewezen
- MF: magnetic loop

Dipool, GP of beam doen het zonder RF aarding!

Waarom is de vertical dan toch zo populair?

Mogelijkerwijs omdat het ophangen van een (inverted-V) dipool voor 80 of 160m op tenminste een halve golf hoog een immense mast vereist...

## De vertical in de praktijk



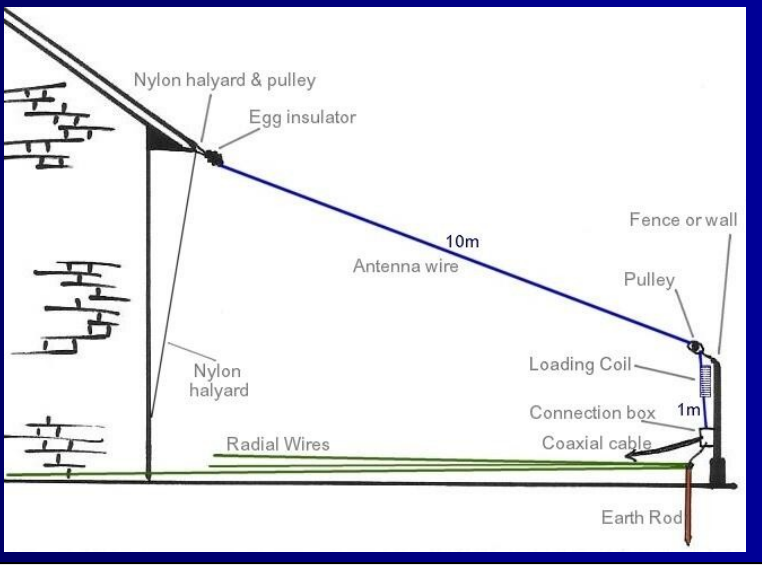

- Over het algemeen goed op de lage banden. Hogere banden worden bij een multiband snel minder (steeds lager – steeds meer last van obstakels)
- De aarde is een helft van je antenne:
  - dit geeft EMI: ruimte nodig!
  - Aardverliezen! Je stookt een deel van je zendenergie op in de aardweerstand
- Besteed aandacht aan het radialennet
- Probeer er een GP of een J-pole van te maken:
  - Hoger = beter. Merk je vooral op de hoge banden
  - Een GP geeft ook minder EMI dan een gewone vertical
  - Minder (J-pole: geen) radialen nodig

Uiteraard zijn er verbeteringen en optimalisaties (bijv. Butternut), waarbij op de hogere banden toch de hele paal wordt benut.

Er bestaan ook halvegolf verticals (zie de end fed half wave). Daarbij heeft de aardverbinding veel minder invloed vanwege de lage stroomsterkte. Echter, de gain blijft mager (1.4 dBi). Opstraalhoek is wel gunstig: 13.6 graden.

De 5/8 λ is weinig beter.

# De langdraad in de praktijk




- Wordt vaak gezien als “laatste redmiddel” bij plaatsingsproblemen
  - Maar: een goede LW geeft meer problemen dan je lief is
- Hou de lengte in de gaten: als een spanningsbuik optreedt bij de ATU, risico op flashover
- Als je geen goede RF aarde hebt, heb je een probleem
- Aardverliezen (zie vertical)
- Soms is een balustrade bruikbaar als “aarde”
- Bij aarden aan de veiligheidsaarde is QRPp de limiet i.v.m. EMI
- Denk eventueel aan een end fed multiband!

Laatste bullet: de Hy End Fed dus. Denk aan 100 a 200 euri.

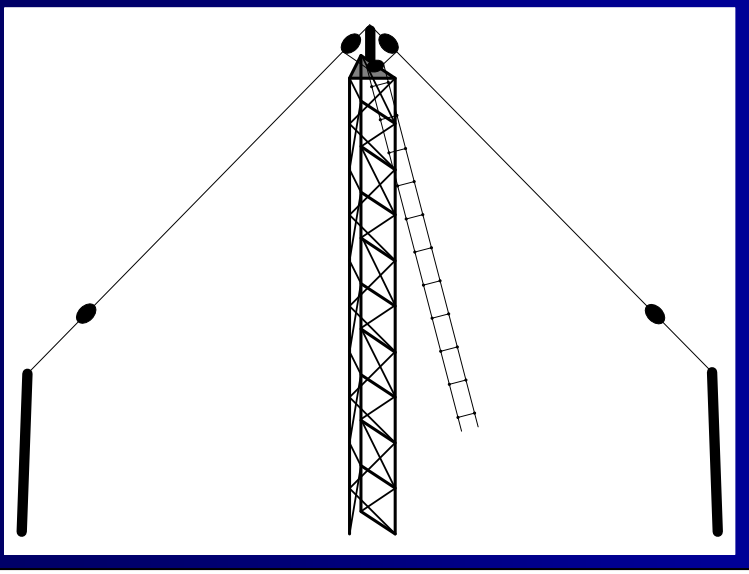
# De endfed in de praktijk




Denk eventueel aan een end fed multiband!

De Hy End Fed dus. Denk aan 100 a 200 euri.

## De dipool in de praktijk



- Kan lastig op te hangen zijn i.v.m. het voedingspunt in het midden
- OCF (Windom) kan dit oplossen
- Inverted-Vee opstelling heeft wat minder ruimte nodig (en 1 mast!)
- Denk aan de hoogte
- Symmetrisch t.o.v. aarde: minder EMI
- Geen RF aarde nodig, indien goed gebalanceerd (balun)
- Kan ook binnen!

# De dipool in de praktijk



Dipool in het wild

# Beams




- Behalve meer gain, vooral ook minder last van QRM uit richtingen waarin je niet geïnteresseerd bent
- Tenzij je je op een bepaald gebied wil concentreren, moeten ze altijd draaibaar zijn
- Dus: mast en rotor nodig
- Zeer slechte “Neighborhood Acceptance Factor”
- Denk aan de bouwvergunning, welstandscommissie
- Denk aan aanprakelijkheid bij schade
- Wil je al die ellende voor ≈ 1 S-punt? Okay, life’s too short for QRP (als je #1 HR DXCC wil behalen)
- Daarentegen: kun je het plaatsen, doen!
- Afstembare beams: SteppIR (duur!)

# Binnenhuisantennes



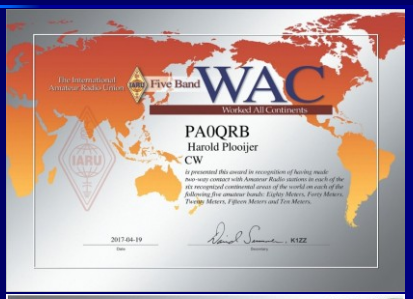
- Antenneverboden en zo
- Geen slapende honden wakker maken
- Een trapdipool kan prima op zolder
  - Mits geen metaal in de dakisolatie!
- Je kan er altijd bij: geen “antenneweer” nodig
- Vrijwel geen corrosie
- Uiteinden opvouwen en/of voorzien van een top cap

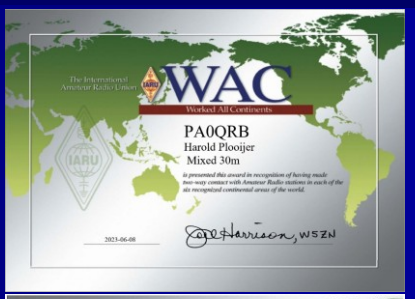
## Binnenhuisantennes: lichtnet ontstoren

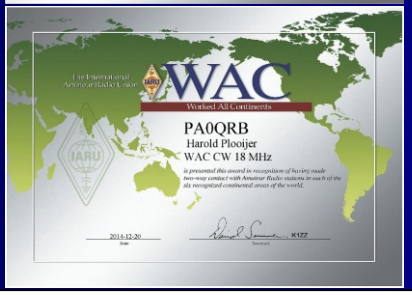


Eventuele elektra bedrading voorzien van RF smoorspoelen op intervallen < $\lambda/2$ (voor de hoogste frequentie)

# Binnenhuisantennes







Alles behaald met binnenhuisantennes!

# Binnenhuisantennes



The Editors of

CQ

The Radio Amateur's Journal

take pleasure in Certifying that

**Harold Plooijer - PAØQRB**

has submitted satisfactory evidence of two-way communication on five amateur radio bands with amateur radio stations in each of the forty zones as shown on the official CQ DX Zone Map of the World. This certifies that the recipient has made 152 contacts in forty zones on five bands and is hereby authorized to include the letters

**5 Band WAZ**

on all correspondence originating from the recipient's amateur radio station. In witness whereof the editors of CQ have affixed their seal and caused this certificate to be signed by two of their number this 15th day of February 2025

Award No. 2633

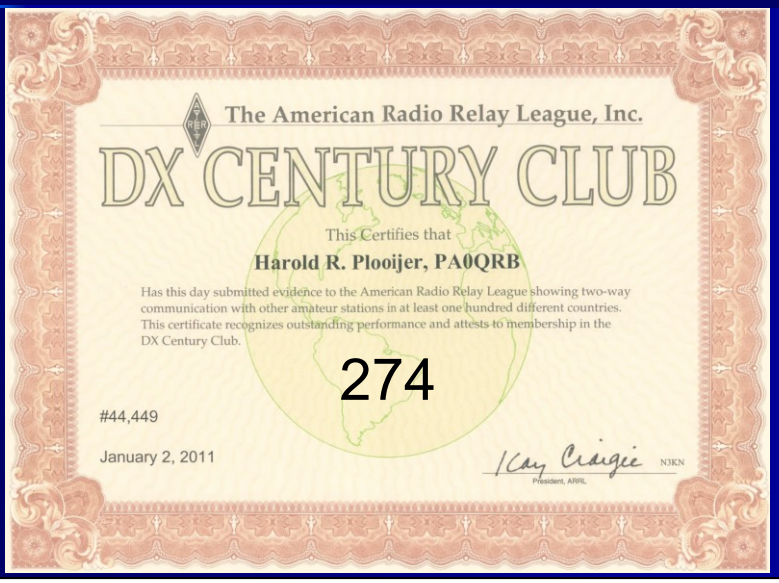
BB Schenck N2OO
DX EDITOR

N4BAA
EDITOR & WAZ MANAGER

CQ

200 ZONE ENDORSEMENT

# Binnenhuisantennes




Standings per 2025-06-12 (inclusief nog niet geclaimde kaarten voor Ogasawara en Centraalafrikaanse Republiek).

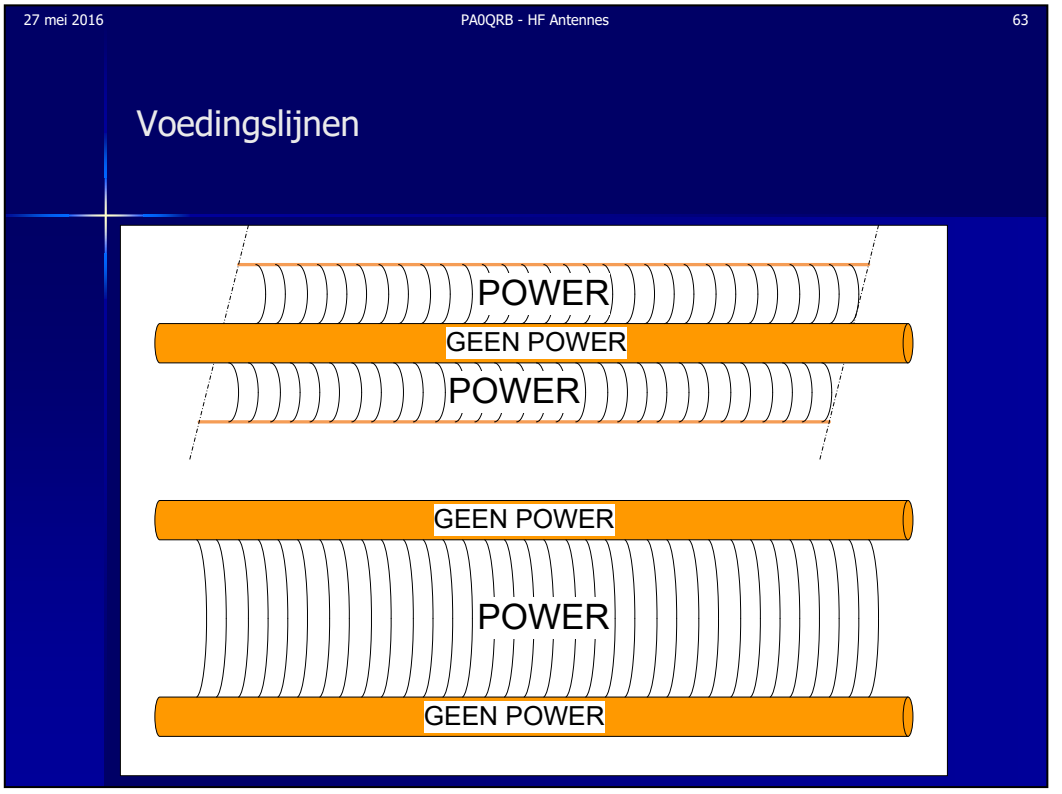
Inclusief deleted entities wordt het 274. Deleted entities: DDR, Tsjechoslowakije, Nederlandse Antillen.



## Na de pauze

- Voedingslijnen, baluns en matching
- De ATU, demo
- Hoogfrequent aarding
- Praktijkvoorbeelden
- Discussie en vragen

## Voedingslijnen



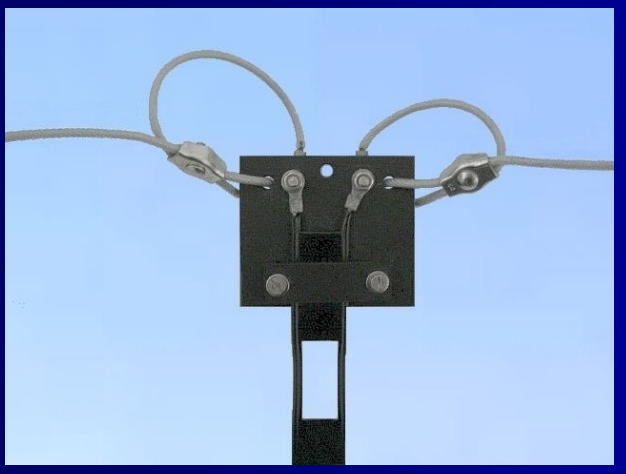

- Is te modelleren als een verzameling van LC-secties achter elkaar (met verlies R)
- Het veld plant zich voort tussen de geleiders
- Het veld induceert gelijke doch tegenfase stromen in de geleiders. Bij coax alleen op de kern en aan de binnenkant van de afscherming (skineffect), waardoor aan de buitenkant geen of nauwelijks E-, H- of EM-veld te meten is bij afwezigheid van mantelstromen. Uiteraard geldt dit alleen voor kabels met deugdelijke afscherming.
- Kabelverliezen bestaan uit:
  - Geleiderverliezen (skin effect!)
  - Diëlektrische verliezen (isolatiemateriaal. Bij lucht verwaarloosbaar)
- Zk: ladder 600, twinlead 300-450, coax 50-70 Ω
  [ $\sqrt{(C_P/L_S)}$ ]
- VF (velocity factor, "verkortingsfactor"): ladderlijn ≈ 95%, hi-end coax: ≈85%, RG-213, -58: ≈ 66%
  [ $1 / \sqrt{(C_P \times L_S)}$ ]

## Voedingslijnen

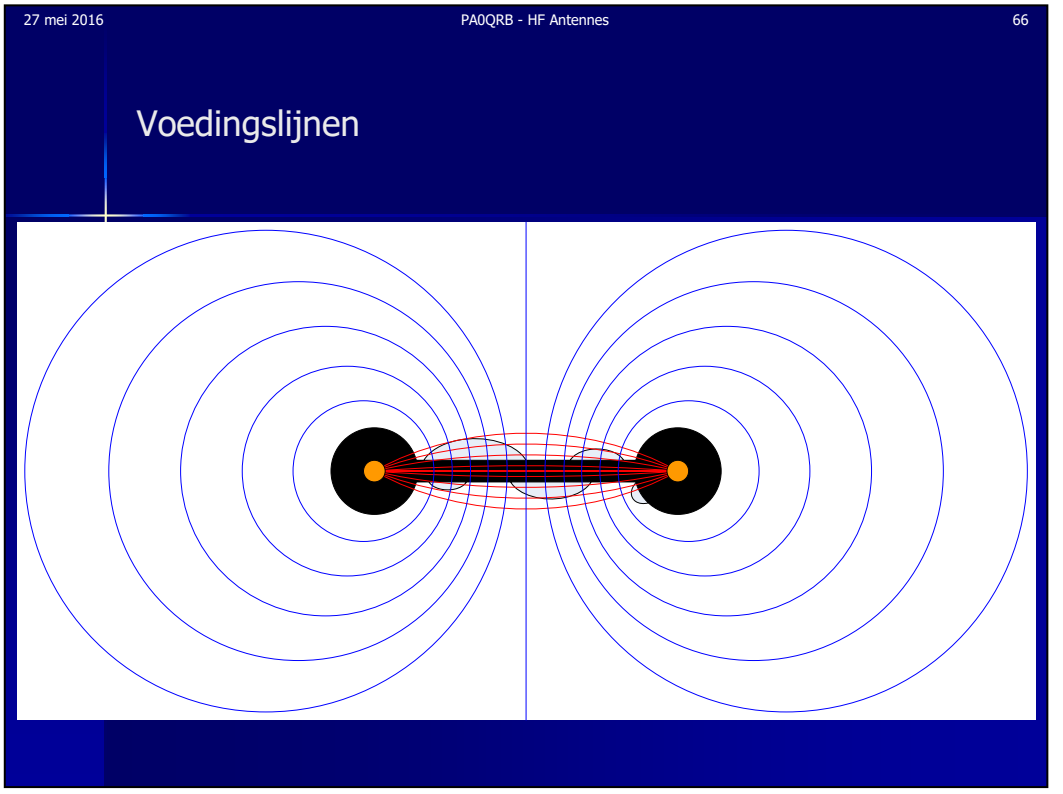


Bij een dipool is een ladderlijn het beste, maar vaak onpraktisch.
Isolatoren ("spreaders") kunnen verliezen introduceren als ze niet schoon zijn.

## Voedingslijnen



- Dit heet “twinlead”
- Ladderlijn en twinlead geeft ook bij hoge SWR de minste verliezen (voor twinlead geldt: mits schoon en droog!)
- Dat is een van de redenen dat de G5RV/ZS6BKW het liefst met ladderlijn wordt gemaakt. Immers, op de transformer section is de SWR sky-high




Natte of smerige twinlead is slechter dan goede kwaliteit coax
Diëlektrische verliezen nemen toe

## Voedingslijnen




- Coax heeft weinig of geen last van weersinvloeden, en er zijn soorten met zeer lage verliezen
  - Aircom+, Ecoflex-10, H-2000: allemaal met lucht- of schuimisolatie
    Bij 10 mm diameter allemaal ongeveer 2 dB verlies per 100m @ 30 MHz, dat is ca. 1 dB beter dan RG-213
  - Aircom heeft de kleinste verliezen, m.n. op de hogere banden
- Nadeel: je ziet niet meteen aan de buitenkant of er sprake is van corrosie e.d.

Het begint pas echt wat uit te maken bij polsdikke (1-5/8”) Heliax kabels: 0.36 dB/100m @ 30 MHz!

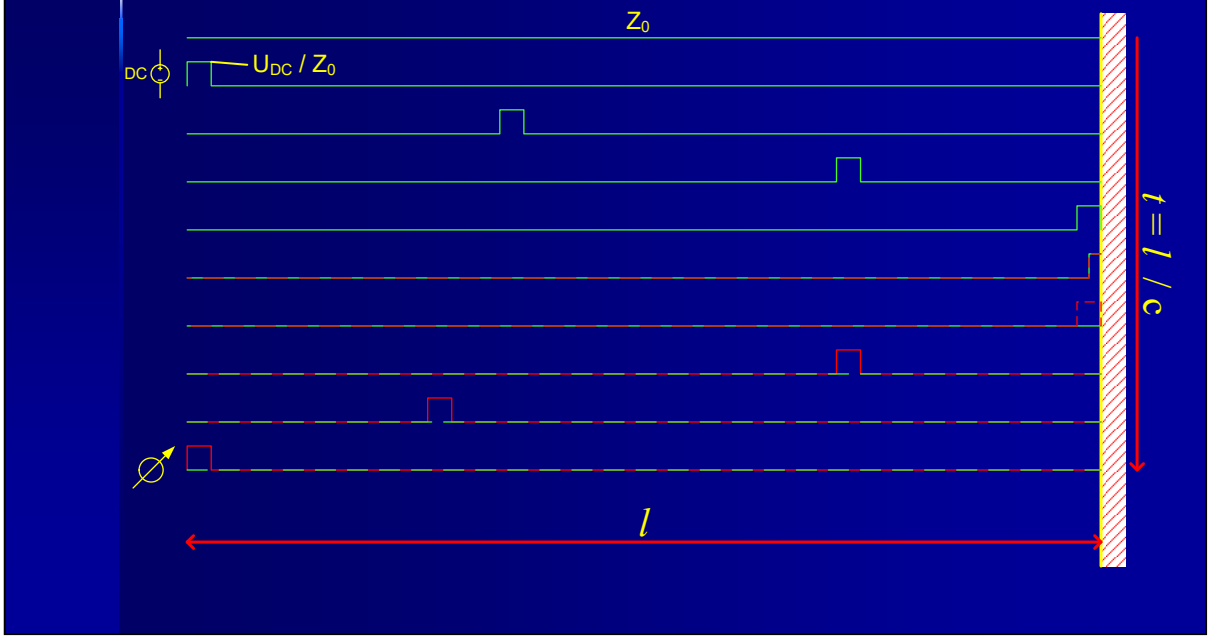
## Voedingslijnen



Solec Kujawski longwave (225 kHz, 1333m) antenna feeder: open coax!

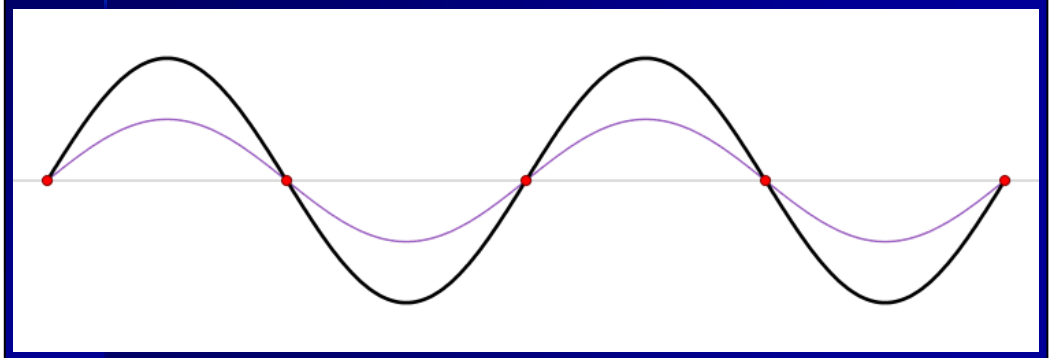
OD : ID verhouding wijst op Zk = 50 ohm.

# Reflectie




Velocity factor is op 1 gesteld

## Aanpassing en SWR



- Aanpassing moet in eerste instantie gebeuren tussen antenne en voedingslijn
- De antenne is aangepast als $Z_A$ ohms is en even groot als $Z_K$
- Misaanpassing op dat punt leidt tot reflecties en SWR > 1
- Wat je meter aangeeft, is VSWR, maar eigenlijk meet hij de absolute reflectiecoëfficient $|\rho|$
- Gereflecteerd vermogen:
  $\rho(p) = |\rho|^2 = \{(VSWR-1) / (VSWR+1)\}^2$
- Zie ook: Antenna Tuning Unit, verderop

Je bent wel het gereflecteerde vermogen kwijt (wordt opgestookt in de eindtrap als warmte) als de set 1:1 op de lijn is aangepast.

Vraag: Hoeveel vermogen krijg je nu terug bij VSWR = 3?

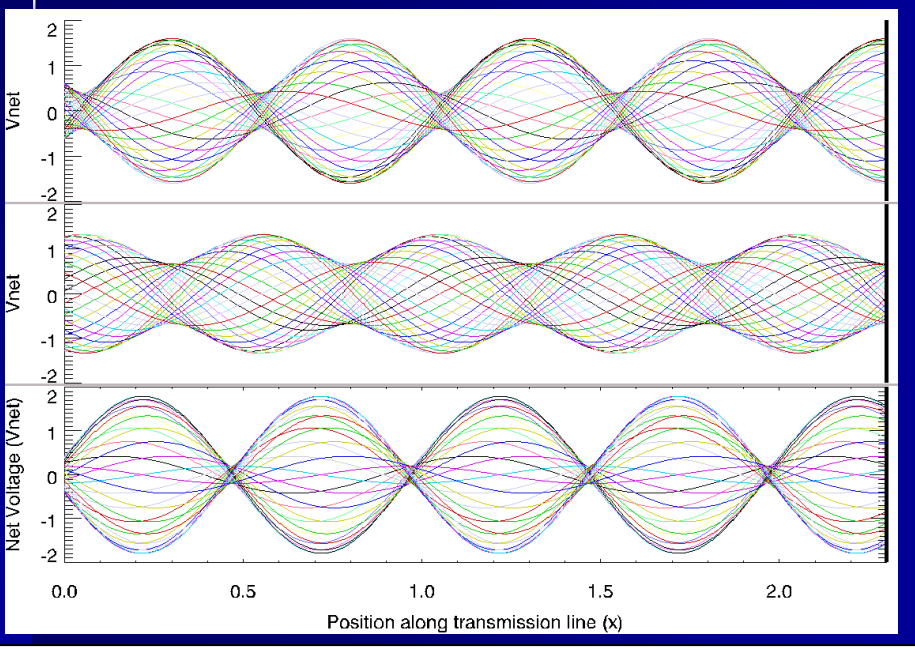
(Instinker! Omdat er een pingpong-spel plaatsvindt tussen tuner en antenne, kom je uit op 133W forward en 33 W reflected power.)

Dus toevoegen: *zonder* maatregelen (tuner) bij de zender.

VSWR = $(1+|\rho|)/(1-|\rho|)$

# Verschillende mate van reflectie (reflectiecoëfficiënt)

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$




ρ = 0.6
VSWR = 4

ρ = -0.333
VSWR = 2

ρ = 0.8 ∠ 60°
VSWR = 9

De VSWR is de verhouding tussen de maximale amplitude en de minimale amplitude van de staande golf

## SWR-vraag (1)

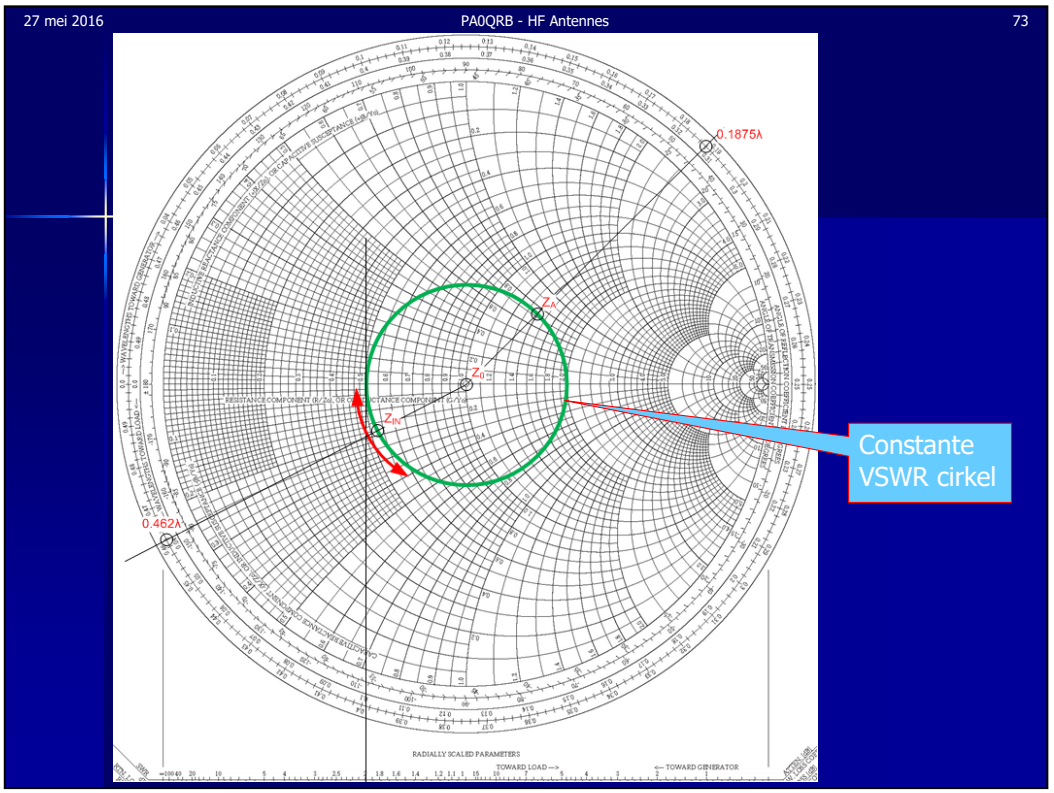
- Je meet de SWR van je antenne op 80m in de shack, en die blijkt 2 te zijn
- Je meet de SWR nogmaals, nu bij de antenne. Er zat 20 meter low-loss coax tussen. Wat meet je nu?
- …
- Precies hetzelfde!
- Maar... hoe zit het met de impedantie?

Maar: als je in de shack de complexe impedantie meet, bijvoorbeeld met een antenna analyzer, meet je wel een andere impedantie

Daarom moet je de tuner verstemmen als de kabellengte verandert

Kabelverliezen verwaarloosbaar.

Zie ook: Reflections, W2DU




Stel:

- Zo = 50 ohm
- VF = 0.85
- VSWR = 2
- f = 3.5 MHz
- Z(A) = 70 + j37.5 ohm
- fysieke kabellengte = 20 m

20m kabel toevoegen vanaf de antenne (= Z(A) = load), dus toward generator

Normaliseer: Z(A) = 1.4 + j0.75 chart ohm

Golflengte $\lambda = c / f = 85.7$ m

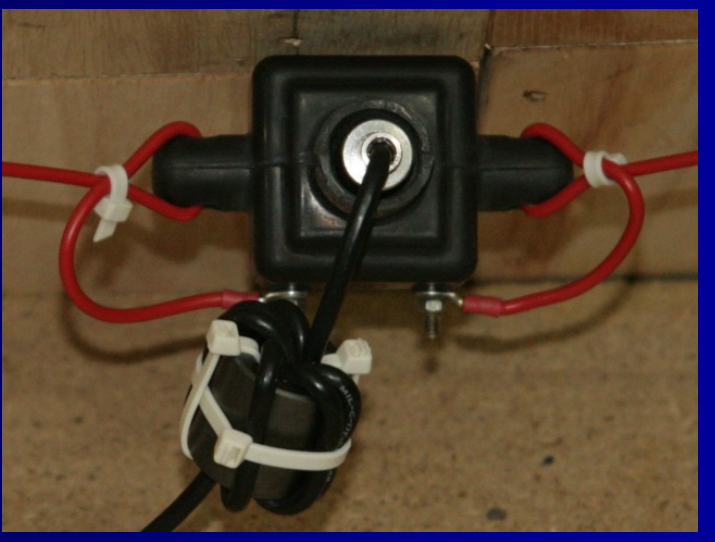
Elektrische lengte = 20 m / 0.85 = 23.53 m

In golflengten: $EL / \lambda = 23.53 / 85.7 = 0.2745 \cdot \lambda + k \cdot \lambda / 2, k \in \mathbb{Z}$

Z(IN) komt dus op 0.1875 + 0.2745 = 0.462 λ

Z(IN) = (0.525 – j0.18) · 50 = 26.3 – j9 ohm

## Kabel aanpassen op de antenne: Breedbandig



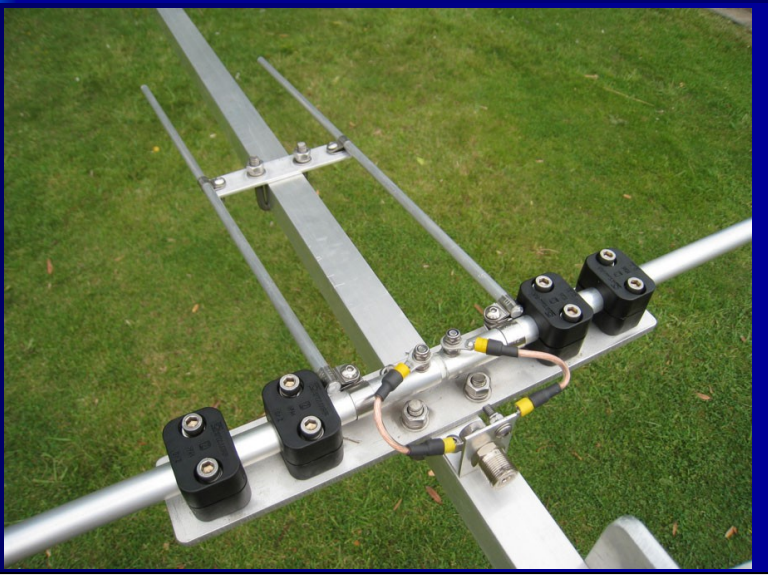
- Dan heeft je set het wat makkelijker en minimaliseer je kabelverliezen

- Transmissielijn trafo's
  - Breedband (aperiodisch), b.v. met ringkernen
    - Combineren met balun functie

Extreme mismatch kan vonkoverslag en uitgebrande componenten geven

Zie ook Reflections, W2DU

# Beta ("Hairpin") match



- Is een kortgesloten stub, lengte < $\lambda/4$
  - Inductief dus
- Toepassing: antennes met (te) lage $Z_A$
- Verkort de antenne ("driven element")
  - Re($Z_A$) blijft min of meer gelijk
  - Er ontstaat een serie $X_C$
- Hairpin parallel
  - De serie $X_C$ wordt uitgestemd
  - $Z_A$ neemt toe
- Kan je uitrekenen, maar de S.C. is makkelijker

Hoe gaat het?

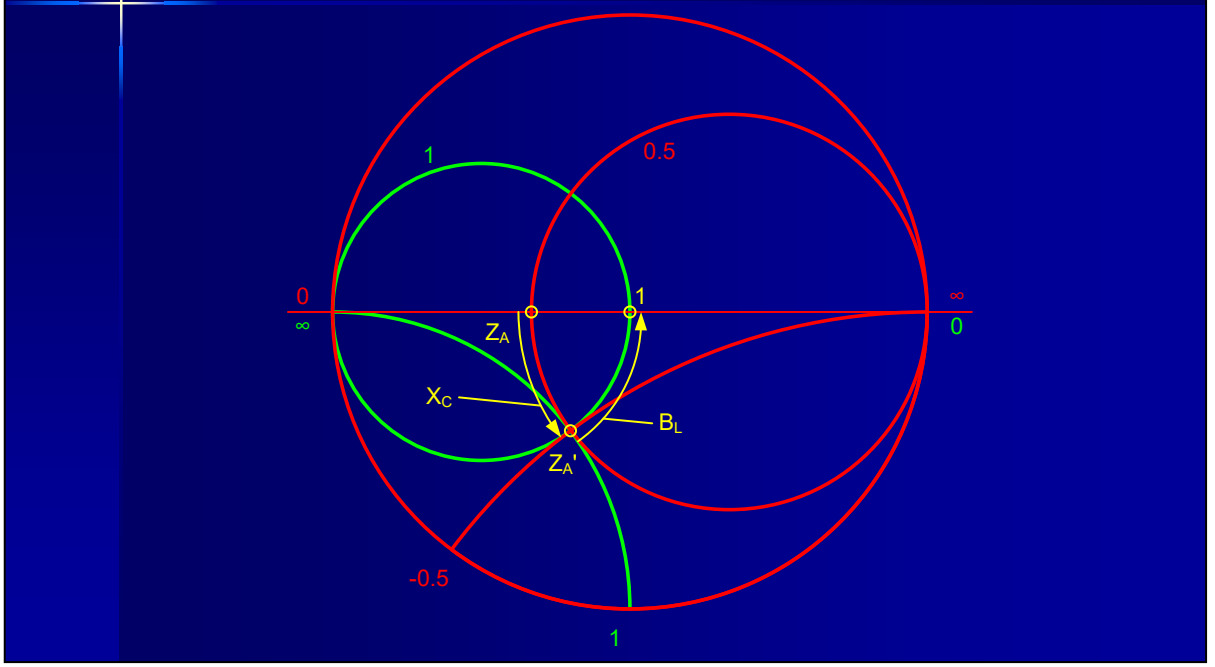
- Gebruik een antenne simulatieprogramma, bijvoorbeeld MMANA-GAL;
- Ontwerp de antenne;
- Maak de straler resonant;
- Kort vervolgens met kleine stapjes de straler in, zodanig dat op de Smith Immittance chart de gesimuleerde impedantie op de B=1 cirkel komt te liggen. 1% inkorten heeft al veel invloed;
- De lengte van de hairpin kan worden bepaald met een admittance/immittance Smith chart, genormaliseerd voor de Zk van de transmissielijn waarvan de hairpin gemaakt is.

Kost het inkorten van de antenne gain? Ja! Maarre... heel weinig, enkele promille, 0.02 dB, 0.004 S-punt.

Lekkâh belangrèk...

Dit voorbeeld: gebruik 12EL430mod.MAA (ingekort) en 12EL430mod_res.MAA (resonant).

# Hairpin Match: Smith chart



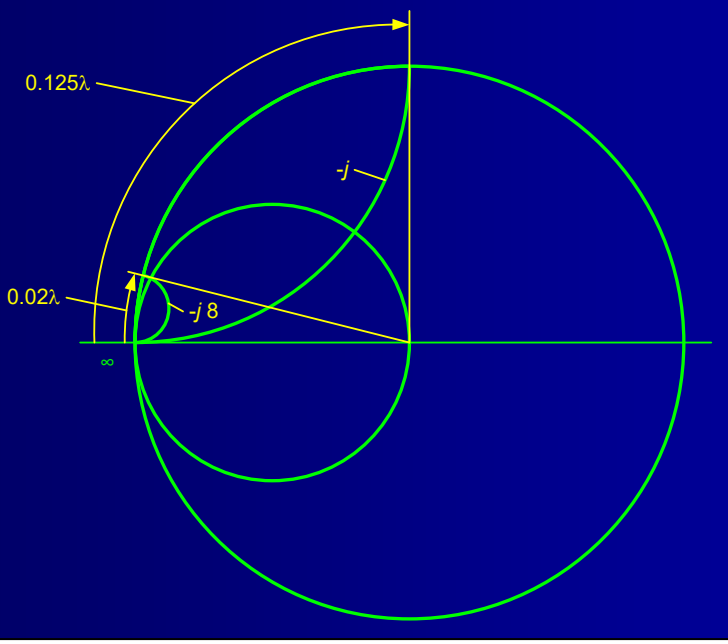

- Yagi antenne, straler (dipool) $Z_A$ = 25 Ω (zuiver ohms)
- Aanpassen m.b.v. parallel zelfinductie op $Z_0$ = 50 Ω
- Vragen:
  - Hoeveel $X_C$ is nodig (door verkorten straler)?
  - Hoeveel $X_L$ is nodig?

Uitwerking:

- Normaliseer: $Z_A$ = 25 / 50 = 0.5 Ω
- $X_C$ = -*j* 0.5 chart Ω = -*j* 25 Ω
- $B_L$ = -*j* 1 chart S = -*j* 0.02 S
  $X_L$ = 1 / $B_L$ = *j* 50 Ω

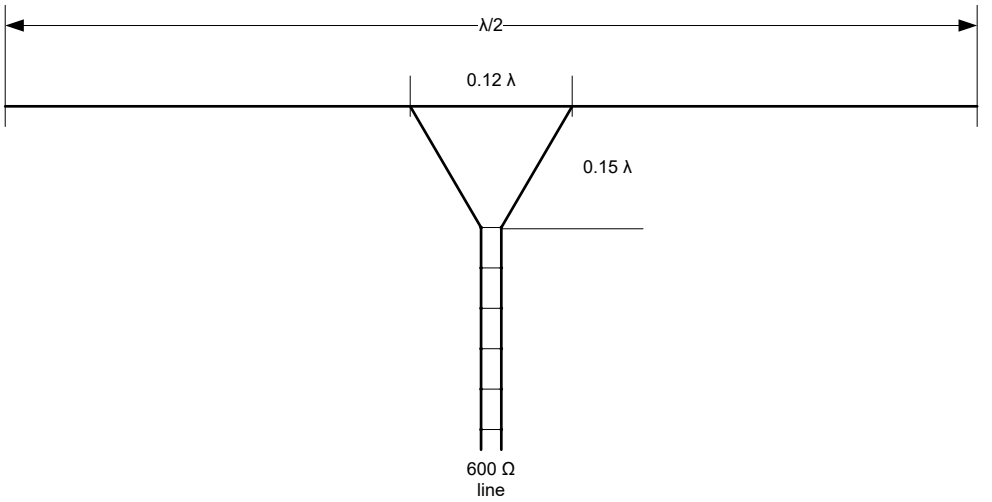
# Hairpin lengte: Smith chart

## Verschillende stub $Z_0$



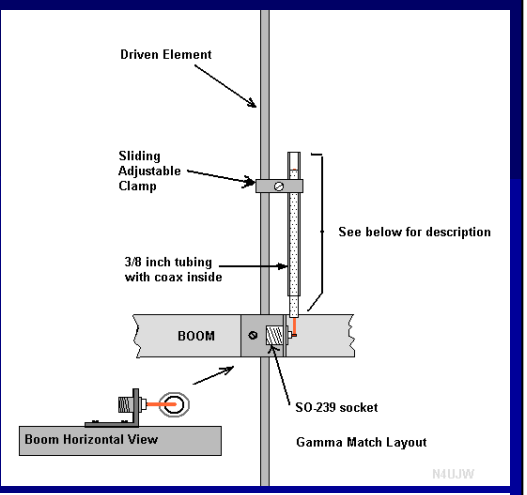

- Normaliseer: $Z_A$ = 25 / 50 = 0.5 Ω
- $X_C$ = -*j* 0.5 chart Ω = -*j* 25 Ω
- $B_L$ = -*j* 1 chart S = -*j* 0.02 S
  $X_L$ = 1 / $B_L$ = *j* 50 Ω

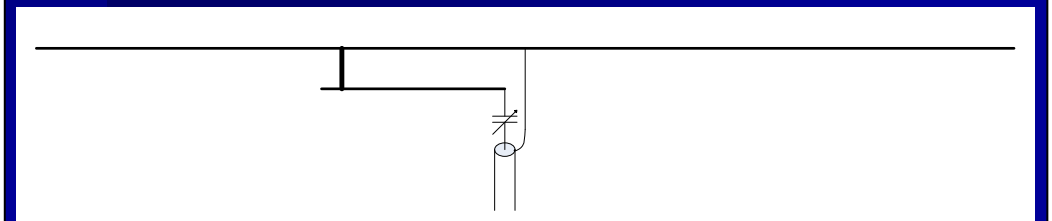
# De Delta Match




- Voor 600 Ω symmetrische lijn
- Tak de antenne symmetrisch ter weerszijden van het midden af
- Aftakkingen lopen taps toe naar de voedingslijn

# De Gamma match



- Midden van de antenne verbinden met de afscherming van de (coax)kabel
- Aftakking naast het midden met de juiste impedantie (b.v., 50 ohm)
- Stem de zelfinductie van de aftakking uit met een (variabele) condensator in serie
- Smalbandig door de afgestemde kring
- Ook geschikt voor verticals
- Is al asymmetrisch: geen balun nodig
- De T-match is een symmetrische versie

## Wat te doen bij slechte match




VSWR = 1

VSWR = 2

- Weinig antennes passen met SWR = 1 aan over de hele band
- Op 80m kan de SWR aan de bandgrenzen oplopen tot 6 ($\rho_p$ = 0.51), zelfs als in het midden 1 wordt gehaald
- Je set kan het moeilijk krijgen (als je geen maatregelen neemt)
- Maar dat hoeft niet te betekenen dat je meer dan de helft aan vermogen kwijt bent
  - 20 meter RG213 geeft op 80m slechts 0.47 dB (≈ 1/13 S-punt) extra verlies bij SWR = 6
  - Maar, als je set perfect is aanpast op de *lijn* (d.w.z., $R_G = Z_K$), dan ziet je eindtrap de verkeerde belasting. In extreme gevallen...
- Als je de hele band wil gebruiken, ontkom je niet aan een ATU

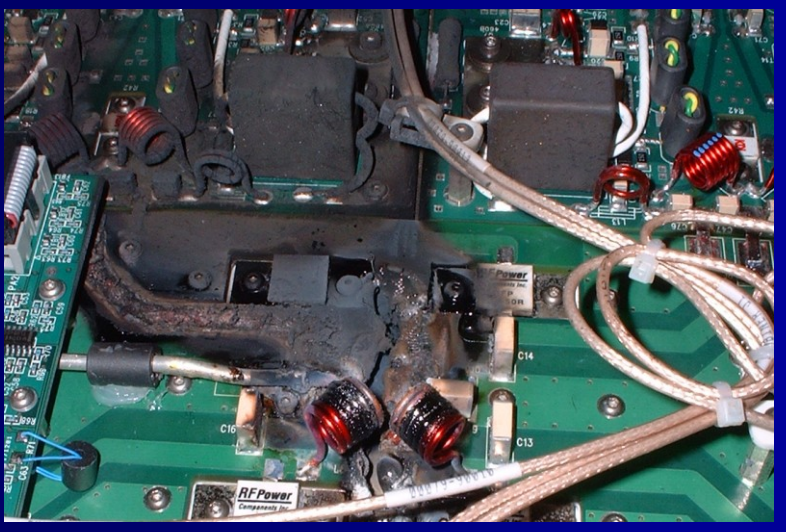
Btw, is aanpassing waarbij maximale vermogensoverdracht (van Tx naar belasting) plaatsvindt ook de aanpassing waarbij het maximale rendement wordt gehaald?

80 meter is worst case v.w.b. bandbreedte als functie van centerfrequentie

Antenne aanpassen: bij SWR < 2 heeft het op HF weinig zin meer

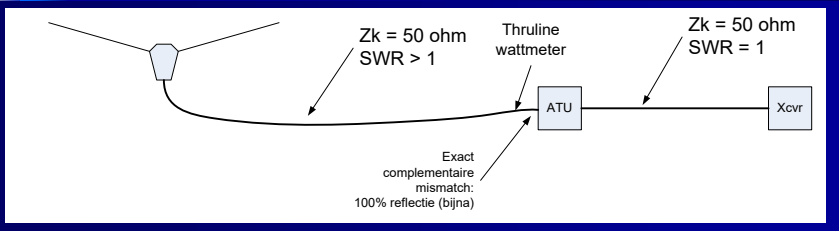
Wel: je balun doet het beter bij goede aanpassing op de antenne (is pas belangrijk bij extreme gevallen, SWR >> 10)

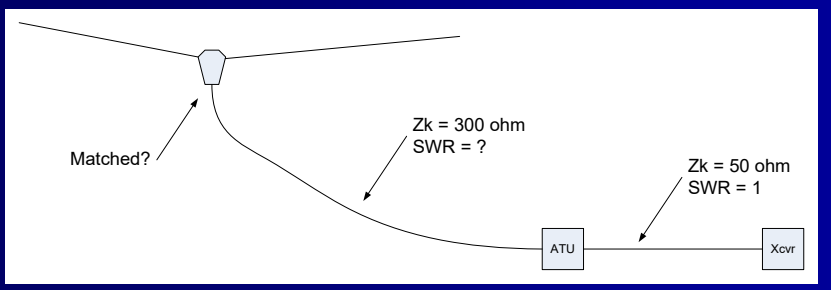
## Wat te doen bij slechte match




Als er geen beveiliging aanwezig is

# De Antenna Tuning Unit (ATU)




- Is geen antenne-afstemmer! Betere naam: “Transmatch”
  - Past antenne + voedingslijn + match aan op je set
- Vaak denigrerend “kassie belazer” genoemd.
  Dit is onterecht
- Als je de mismatch bij de set uitstemt dan hou je alleen de verliezen in de kabel en in de ATU (<0.5 dB) over
- Zorgt ervoor dat het meeste van het gereflecteerde vermogen toch nuttig wordt gebruikt.
  Kun je meten met een thruline:
  **PA = $P_{FWD} - P_{REF}$** * (allebei meten, met hetzelfde instrument!)
- Bij buizeneindtrappen en matige SWR (< ≈2) niet nodig: de misaanpassing zit binnen het afstembereik van de eindtrap
- Bij transistoreindtrappen voorkomt een ATU oververhitting en het ingrijpen van de beveiliging
  - Zit tegenwoordig meestal ingebouwd in de set

- Ook bij overgaan op ander lijntype (b.v. G5RV)

0.5 dB is ongeveer 12%.

0.7 dB is ongeveer 17.5%.

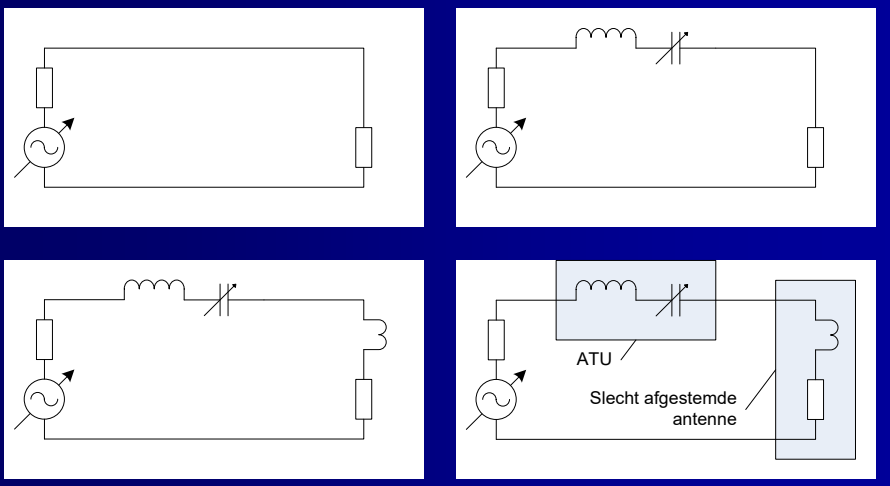
*: Kabelverliezen buiten beschouwing gelaten

Met de ATU creëer je een complementaire misaanpassing aan de kant van de set. Gecombineerd met interferentie tussen het voorwaartse en het gereflecteerde signaal zorgt dit dat het gereflecteerde vermogen weer terug gereflecteerd wordt naar de antenne (“Droste-effect”).

Scenario 1: alle kabels 50 ohm, antenne niet aangepast aan de kabel

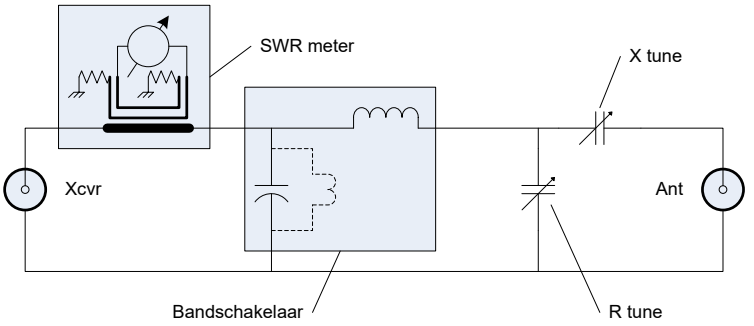
Scenario 2: Verschillende kabel $Z_K$, wellicht is de antenne goed aangepast, maar de kabel $Z_K$ past niet aan op de set

# Stripverhaal ATU



# Stripverhaal ATU




AT-130 (Kenwood)

## SWR-vraag (2)

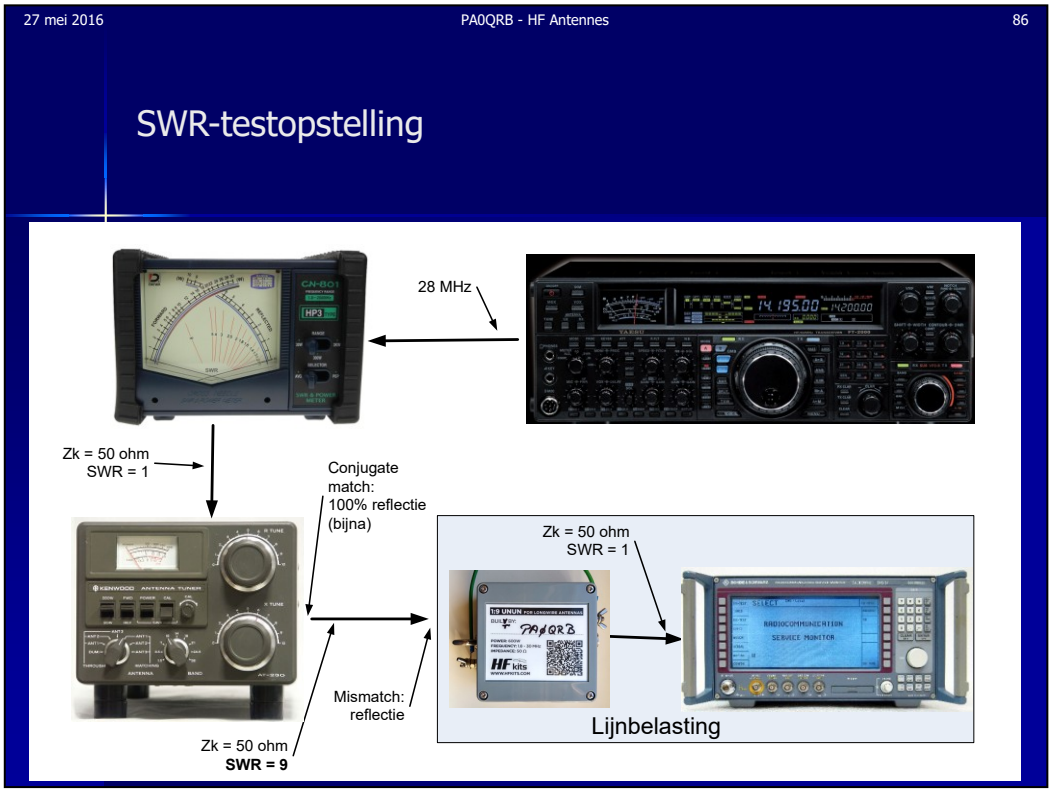
- Mismatch: SWR=3 (ρ = 0.5) op 80m.
  - TPO = 100W
  - Afstembaar (tuner in de set)
  - Kabel: 20m RG-213 (verlies = 0.23 dB @ 3.5 MHz).
  - Verliezen nemen bij SWR=3 met ca. 66% toe (tot 0.38 dB)
- Door gerommel met de antenne en bloed, zweet en tranen weet ik de SWR op 1:1 te krijgen.
- Wat levert me dit op aan extra effectief uitgestraald zendvermogen (ERP)? (Mag ook in dB of in S-punten)
- …
- Nog geen vier watt (0.15 dB, 1/40 S-punt).

≈ 3.5 W (afhankelijk van waar je de kabelverliezen opvraagt).

Bij een SWR van 2 krimpt dit al tot 1.3W, 1/106 S-punt

Aan de randen van de band, bij SWR=6, is het nog steeds niet meer dan 1/10 S-punt

Alleen als je zeer hoge SWR moet toelaten is ladderlijn onverslaanbaar (Zie G5RV e.a. Geldt dus niet voor twinlead, zeker als het nat is!)




De 1:9 unun geeft een mismatch met VSWR=9 op de antenne-uitgang, indien deze wordt aangesloten op kabel met $Z_K$ = 50 ohm en de coax-aansluiting wordt belast met 50 ohm.

De antenne-uitgang van de unun wordt rechtstreeks aangesloten op de antenne-uitgang van de AT-230. De coax-aansluiting wordt aangesloten op de R&S CMS-52 (als powermeter).

De FT-2000 laten we een 28 MHz signaal maken op minimaal vermogen, dit blijkt 5.19W te zijn. Met de AT-230 regelen we het gereflecteerd vermogen (aflezen op de CN-801) zorgvuldig af op nul.

Vervolgens het resterende vermogen aflezen op de CMS-52: dat blijkt 4.093 W te zijn. Er is dus 1.1W gedissipeerd in de keten.

Het transmissieverlies in de keten is dus: 10 x $^{10}$log($P_{OUT}/P_{IN}$) = 10 x $^{10}$log(4.093 / 5.19) = -1.03 dB, ofwel 21%.

"Gezond boerenverstand" suggereert dat het bij VSWR=9 64% zou moeten zijn. Immers, dat is het gereflecteerde deel van het uitgangsvermogen. Het boerenverstand is dus toch niet zo gezond in dit geval...

Hierbij is geen rekening gehouden met het vermogensverlies in de unun. Dit is ca. 0.2 dB op 28 MHz. De tuner en de bekabeling nemen dus het restant (0.83 dB) voor hun rekening.

Als de verbinding tussen de AT-230 en de unun wordt vervangen door een lang stuk kabel dan nemen de verliezen wel flink toe als die kabel relatief grote verliezen heeft (bijvoorbeeld RG-58C/U): die worden verergerd door de slechte VSWR.

Zelfde test, nu met een stuk coax tussen de AT-230 en de unun:
Met 11.5m RG-213: $P_{IN}$ = 5W, $P_{OUT}$ = 2.44W. S21 = 10 x $^{10}$log(2.44/5) = -3.1 dB.
Met 14.1m (= 2λ @ 28.026 MHz & VF = 0.66) RG-58C/U: $P_{IN}$ = 5.18W, $P_{OUT}$ = 1.38W. S21 = 10 x $^{10}$log(1.38/5.18) = -5.74 dB.

Deze resultaten komen binnen 1 dB overeen met de uitkomsten van de KV5R Coax Loss Calculator (https://kv5r.com/ham-radio/coax-loss-calculator/), als de resultaten van de nulmeting hiermee worden verrekend.

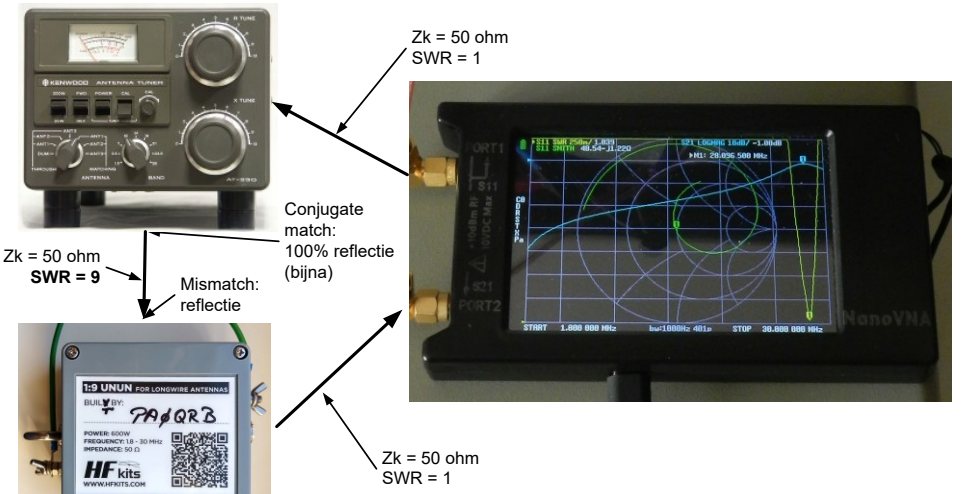
Interessant om te weten: als een bidirectionele powermeter zoals de hier gebruikte CN-801 in de verbinding tussen de tuner en de unun wordt opgenomen (de kabel met de hoge SWR dus), dan blijkt het uitgezonden vermogen verhoogd te zijn met het gereflecteerde vermogen! In de situatie zoals hierboven omschreven maar dan met 10W uitgangsvermogen lezen we af: 6.4W gereflecteerd en 16.4W uitgezonden. Walt Maxwell W2DU noemt dit verschijnsel "Reflection Gain".

Valkuil (zelf van binnen gezien ;-): de nulmeting door de tuner heen doen, met de antenneschakelaar op

"Through". Op die manier introduceert de tuner toch nog enkele tienden dB aan verlies, 0.2 tot 0.25 dB op 28 MHz!

Deze meetopstelling is niet erg transportabel door de zware transceiver en een nog zwaarder meetinstrument. Daarom wordt voor demonstraties elders dan thuis een NanoVNA ingezet.

## SWR-testopstelling met VNA




Cascadeschakeling tussen Port1 en Port2 van de NanoVNA:

Port1 → AT230 → 1:9 unun → Port2

De unun "vertaalt" de ingangsimpedantie van Port2 naar 450 ohm. De AT230 moet dat weer terugvertalen naar 50 ohm om zo de return loss maximaal te maken. Ook in dit geval moet de AT230 weer zorgvuldig worden afgeregeld op minimale SWR. Dit kan worden afgelezen op de VNA.

Resultaten:

De unun geeft een misaanpassing met SWR = 9. Dat houdt in dat 64% van het uitgezonden vermogen wordt gereflecteerd.

De bekabeling geeft 0.1 dB verlies

De unun geeft 0.2 dB verlies

De tuner, met de unun aan de 450 ohm kant aan ANT3 (IL = netto insertion loss van de AT230):

1.8 MHz: IL = 0.3 dB, 6.7% dissipatie in de tuner

14 MHz: IL = 0.37 dB, 8.2% dissipatie in de tuner

28 MHz: IL = 0.54 dB, 11.7% dissipatie in de tuner

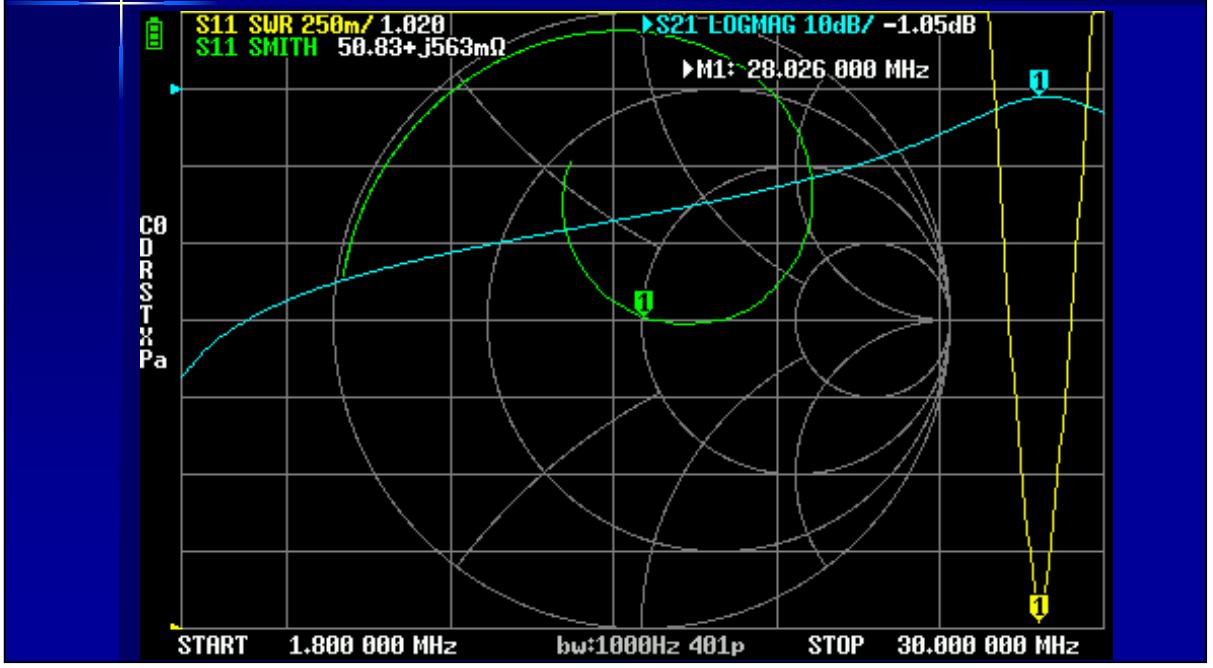
Het is wel duidelijk dat de tuner het gereflecteerde vermogen slechts (zeer) ten dele

dissipeert en voor de rest terug reflecteert naar de belasting.

Hiermee is in feite aangetoond dat hetgeen de fabrikant beweert in de specificaties van de tuner ook daadwerkelijk klopt. Alleen op 28 MHz gaat de IL er iets overheen (0.54 dB i.p.v. 0.5 dB).

Het verlies in de AT-230 op 28 MHz in de stand "Through" is met de VNA gemeten 0.19 dB.

# NanoVNA screenshot: 28.026 MHz, 20 cm RG-58C/U




Hier is het totale verlies op 28.026 te zien. S21 (transmissieverlies) over de hele lus is -1.05 dB.

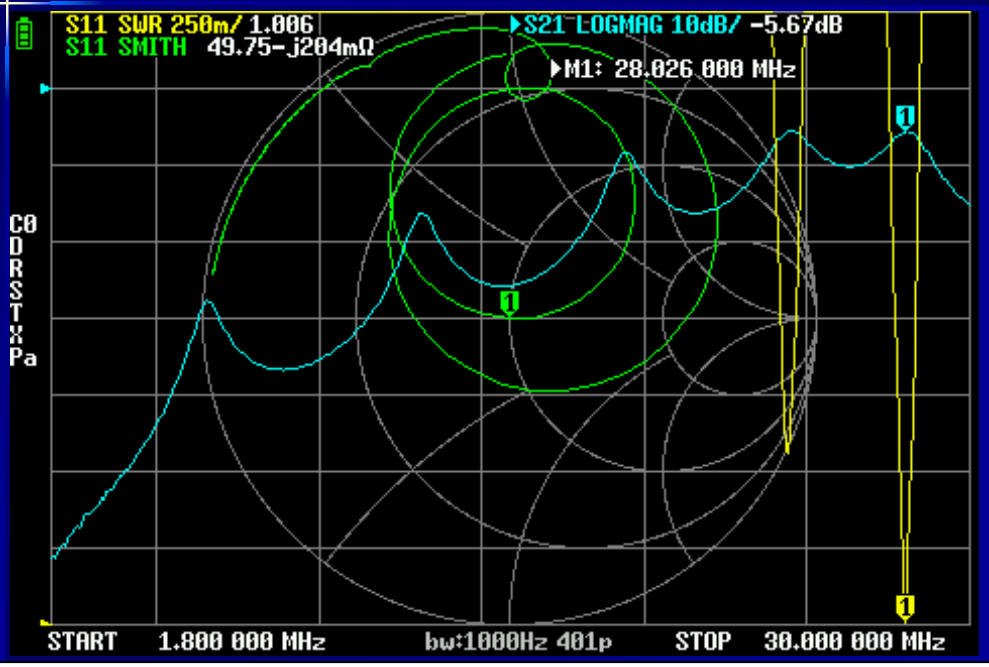
Nulmeting (kabelverliezen plus verliezen in de unun): 0.4 dB

Daar gaan de verliezen in de unun en de bekabeling vanaf, blijft –(1.05 – 0.4) = -0.61 dB. Dat komt overeen met 13.1 % verlies in de tuner.

Omdat de unun vrijwel rechtstreeks met de tuner verbonden is, zijn er geen meetbare kabelverliezen. Zit er 100 meter RG174 tussen dan krijgen we te maken met de verliezen in die kabel: volgens de KV5R coax loss calculator zijn we dan in totaal 18.5 dB aan vermogen kwijt (99%), waarvan 4.5 dB SWR verlies is.

Met de VNA worden vergelijkbare verliezen gemeten t.o.v. de conventionele meetopstelling (transceiver en powermeter).

# NanoVNA screenshot:
# 28.026 MHz, 14.1 meter RG-58C/U (2·λ·0.66)




Dezelfde testopstelling, maar nu met 2 hele elektrische golflengtes (@28.026 MHz = 14.13 meter fysiek) RG-58C/U tussen de unun en de tuner. Behalve de "intrinsieke" verliezen in deze kabel (1.28 dB) komt er ook nog SWR-verlies bij.

Bij 2λ zou de impedantie die de tuner "ziet" gelijk moeten zijn aan de impedantie zonder de extra kabellengte (indien de kabel verliesvrij zou zijn). Uiteraard zijn er wel kabelverliezen, waardoor de impedantie in de richting van het midden van de Smith chart getrokken wordt. Het argument van de complexe reflectiecoëfficiënt blijft zo echter onveranderd. De impedantie in het voedingspunt is nu ongelijk aan die in het eerste voorbeeld (vorige dia), maar dichter bij het middelpunt van de Smith chart, waardoor de tuner er minder moeite mee heeft.

Als we de vorige dia beschouwen als nulmeting dan wordt het door de kabel geïntroduceerde verlies –(5.67-1.05) = -4.62 dB.

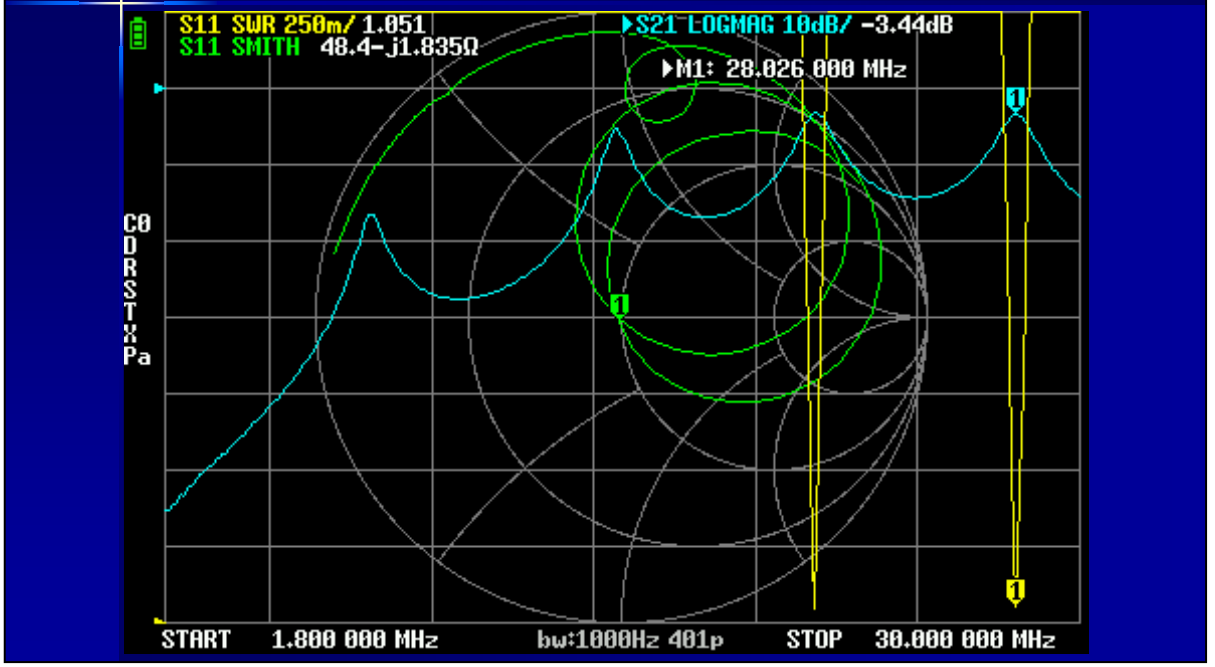
De gemeten verliezen zijn groter dan blijkt uit de ARRL-formule (ik had uit moeten komen op 3.83 dB, waarvan 2.54 dB SWR-verlies). Die zijn mogelijk toe te schrijven aan extra verliezen in koppelstukjes e.d., maar ook aan de (kleine) verschillen tussen metingen met de NanoVNA en die met de CMS-52. Het punt is dat hiermee wordt aangetoond dat de kabelverliezen worden "opgehoogd" met SWR-verliezen.

Dit is een voorbeeld voor 10 meter golflengte. Op VHF en hoger kunnen de gevolgen van misaanpassing dramatisch zijn bij kabel met grote verliezen (RG58, RG174 etc.).

Hoe meet je het "intrinsieke" verlies van de kabel (als je geen VNA maar wel een

"antenna analyzer" hebt)? Meet met de analyzer de return loss bij open (of kortgesloten) uiteinde. Deel het aantal gemeten dB door twee en je hebt het intrinsieke verlies. Op die manier kom je er achter of er iets mis is met de kabel, als de gemeten waarde sterk afwijkt van de specificaties.

# NanoVNA screenshot, 28 MHz, 11.5 meter RG213

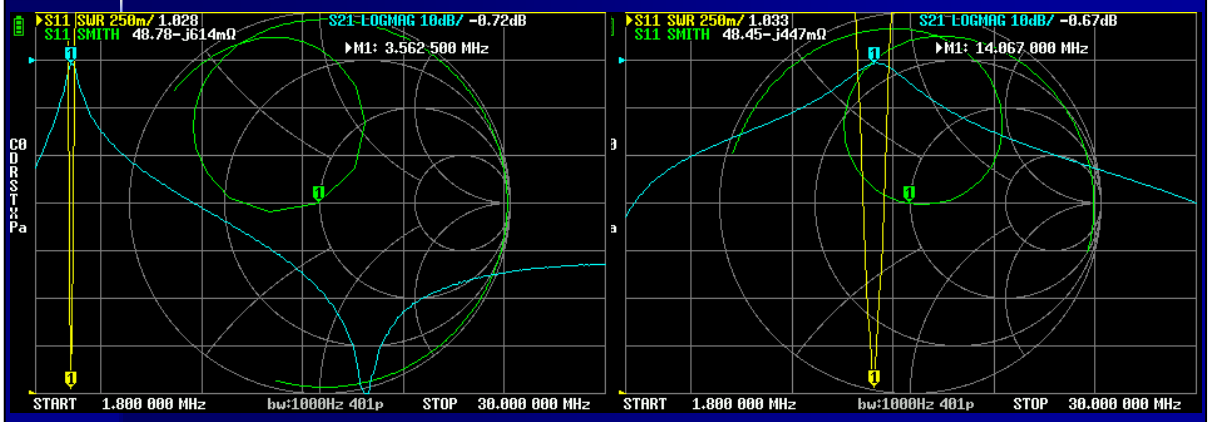



Dezelfde testopstelling, maar nu met 11.5 fysieke meters (17.4 m elektrisch) RG-213 tussen de unun en de tuner. Behalve de "intrinsieke" verliezen in deze kabel (gemeten 0.5dB, KV5R 0.4dB) komt er ook nog SWR-verlies bij.

De gemeten verliezen zijn groter dan blijkt uit de ARRL-formule (ik had uit moeten komen op 1.543 dB, waarvan 1.141 dB SWR-verlies). Die zijn waarschijnlijk toe te schrijven aan extra verliezen in koppelstukjes e.d. Bovendien is de impedantie in het voedingspunt nu ongelijk aan die in het eerste voorbeeld. Het verschil (3.44 – 1 – 1.543 = 0.897 dB) is kleiner dan 1 dB en dus maak ik me er niet druk over: het punt is dat hiermee wordt aangetoond dat de kabelverliezen worden "opgehoogd" met SWR-verliezen.

Niet gemeten met Ecoflex-10, maar de berekende SWR-verliezen zijn bij dat kabeltype en die lengte op 28 MHz 0.776 dB.

# NanoVNA screenshots, 3.5 en 14 MHz




De plaatjes betreffen een test met 20 cm RG-142.

Met 12.6 meter RG-58C:

80 meter: S21 = -2.26 dB;

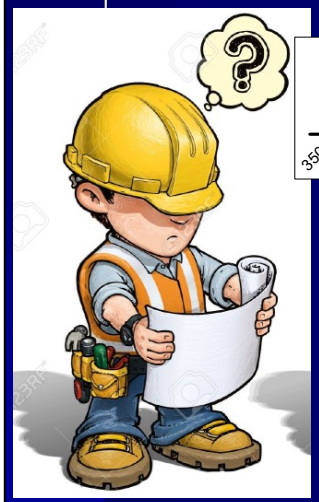
20 meter: S21 = -3.61 dB (bandschakelaar op 18 MHz!).

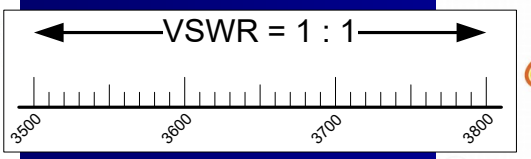
De verliezen nemen dus duidelijk af met de frequentie.

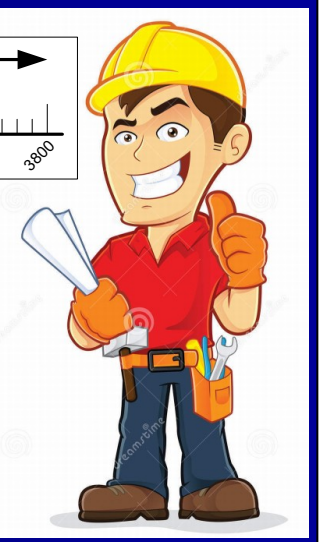
## ATU voor- en nadelen

- Con:
  - Tuners geven wat verlies
    - Hoeveel hangt af van het ontwerp
  - **SWR verlies in de kabel**
  - Bij TV, data bij hoge bitrates (> ≈1 Mb/s) enz. kan de dispersie ontoelaatbaar worden
- Pro:
  - Aanpassen op een plek waar je er altijd bij kan: je hoeft niet de mast in
  - Grotere operationele bandbreedte
- Bottom line: het verlies is niet nul, maar een stuk minder dan wel beweerd wordt
- Ook een matcher bij de antenne geeft demping!

## Wat te doen bij 1:1 SWR?

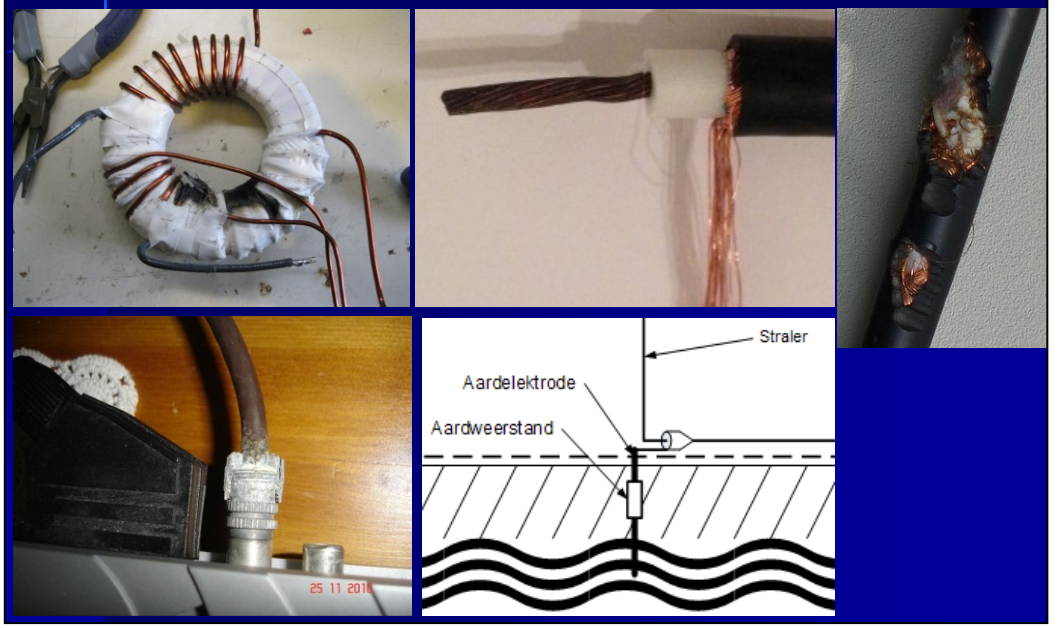




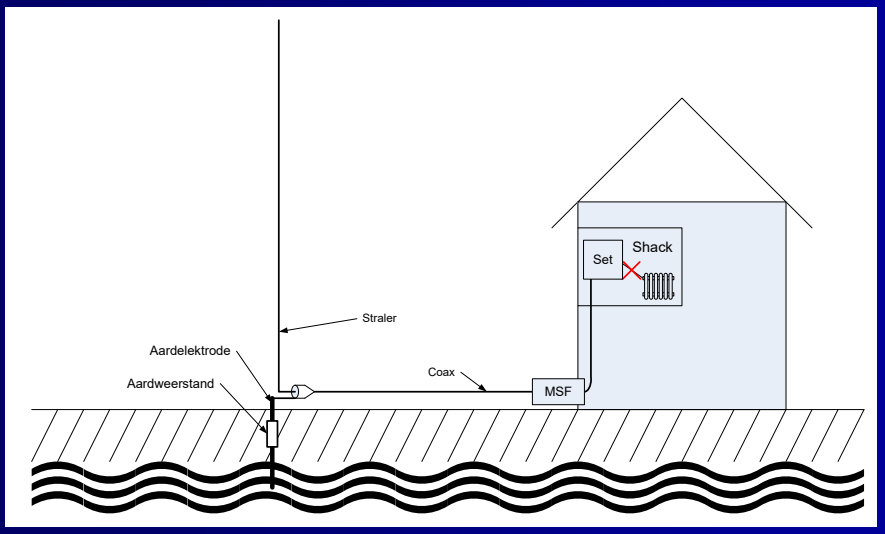
- 1:1 SWR betekent niet per se een goede antenne of aanpassing
- 1:1 SWR over een grote bandbreedte duidt heel vaak op een probleem!
- Ziet er uit als ohmse verliezen
- Een vertical met aardelektrode maar zonder radialen kan zich zo gedragen
- Kapotte spanningsbalun (of verkeerd kernmateriaal), water in je coax, …

## Wat te doen bij 1:1 SWR?




- 1:1 SWR over een grote bandbreedte duidt heel vaak op een probleem!
- Ziet er uit als ohmse verliezen
- Een vertical met aardelektrode maar zonder radialen kan zich zo gedragen
- Kapotte balun (of verkeerd kernmateriaal), water in je coax, …

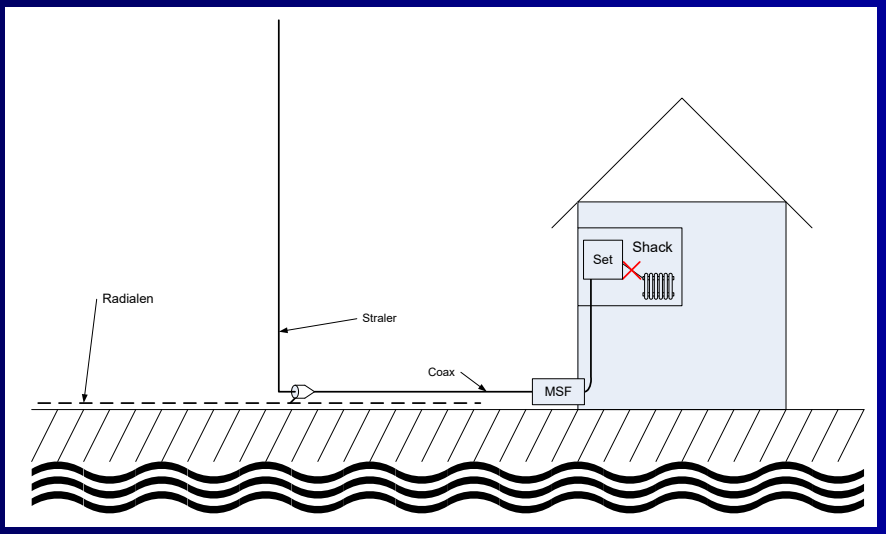
# Voorbeeld 1:1 SWR



## Voorbeeld 1:1 SWR

- 30 + 20 ohm = 50 ohm
- Perfecte match op RG-213 e.d.
- Verlies in aardweerstand = **2.2 dB**

# Voorbeeld 1:1 SWR

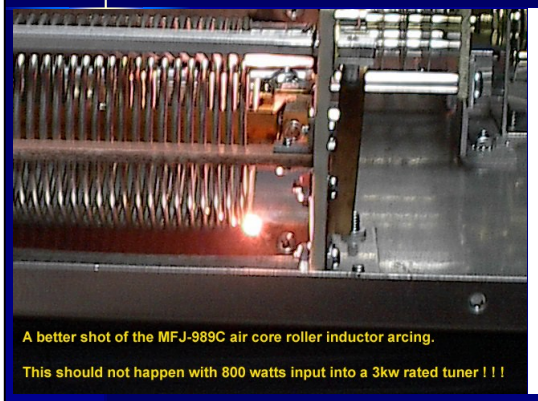


## Voorbeeld 1:1 SWR

- 30 + 20 ohm = 50 ohm
- Perfecte match op RG-213 e.d.
- Verlies in aardweerstand = **2.2 dB**

- 30 ohm
- 1.67 SWR op RG-213
- Extra kabelverlies bij 100m lengte op 80m: < **0.12 dB**
- Er is nu een tuner nodig. Reken op een extra verlies van 0.5 dB max.

## Juiste redenen voor lage SWR

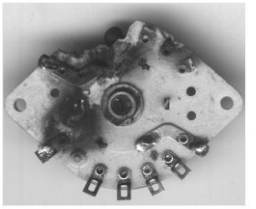


A better shot of the MFJ-989C air core roller inductor arcing.

This should not happen with 800 watts input into a 3kw rated tuner ! ! !

**ARCing (the end result)**

Figure 8: The Final Result (Output Tank Bandswitch on the Measure's Website)



Persistent ARCing can lead to serious consequences

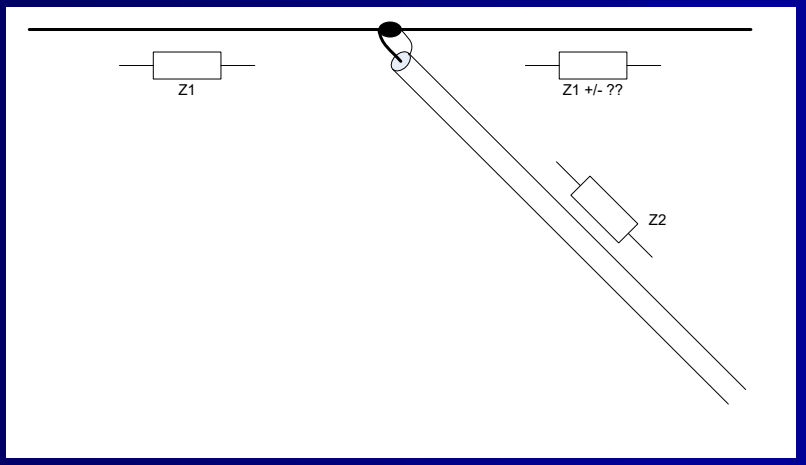
- Vanwege hoge(re) kabelverliezen, vooral op VHF en hoger. Even rekenen dus
- Vanwege mogelijke flashover / meltdown in de tuner bij combinatie "moeilijke" belastingsimpedanties en QRO
- Systeemrendement is het sleutelwoord

Er zijn online calculators om kabelverliezen te berekenen, bijvoorbeeld die van KV5R (ook voor twinlead en ladderlijn!).

Bij het plaatje: mijn inschatting is dat deze tuner buiten de specificaties wordt bedreven voor wat betreft maximum SWR.

Tunerverliezen zijn over het algemeen te verwaarlozen, *mits* de tuner wordt gebruikt binnen het gespecificeerde impedantiegebied. Dit kan een dingetje zijn bij zelfbouw tuners. Immers, die hebben geen specificatieblad... Vuistregel bij zelfbouw: gebruik luchtspoelen op keramische isolatoren en condensatoren met luchtisolatie of – nog beter – vacuumcondensatoren, als je eraan kunt komen. Uiteraard ook keramische schakelaars toepassen.

## Mantelstromen en onbalans




- Geen enkel antennesysteem is perfect symmetrisch
- Vooral coax gevoede dipolen zijn problematisch
  - Stromen op binnen- en buitenkant afscherming zien elkaar niet (skin effect)
  - Buitenkant staat dus parallel met één dipoolarm (“derde geleider”-probleem)
  - En daar gaat dus stroom lopen! (als de belasting niet perfect symmetrisch is)
  - Als je daar niets aan doet komt die in de shack terecht

Een dipool geeft geen mantelstromen als:-

• Perfect symmetrisch

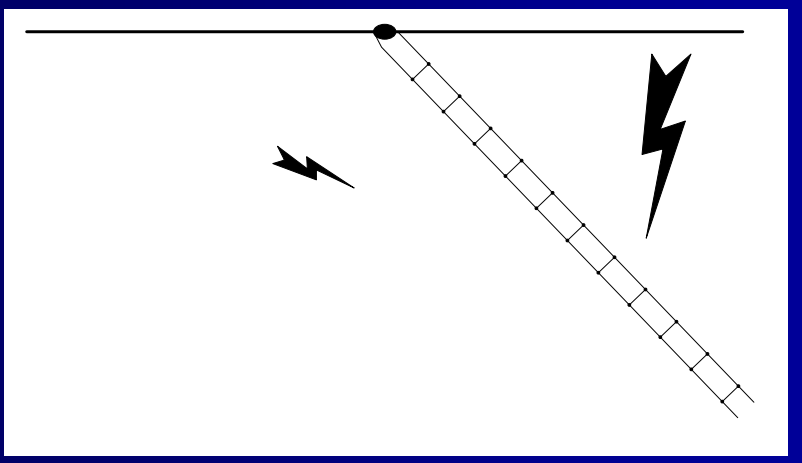
• Perfect horizontaal

• Perfect resonant op de werkfrequentie

• De voedingslijn perfect loodrecht op de antenne is afgespannen

In alle andere gevallen zijn er *wel* mantelstromen!

## Mantelstromen en onbalans



- Geen enkel antennesysteem is perfect symmetrisch
- Bij open lijnen is er geen “derde geleider”! Toch kunnen er common mode stromen optreden
  - Door onbalans in de omgeving
  - Probleem ontstaat dus onderweg
    - Kan ook bij coax optreden

Een dipool geeft geen mantelstromen als:-

• Perfect symmetrisch

• Perfect horizontaal

• Perfect resonant op de werkfrequentie

• De voedingslijn perfect loodrecht op de antenne is afgespannen

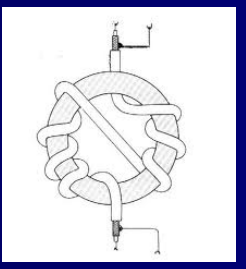
In alle andere gevallen zijn er *wel* mantelstromen!

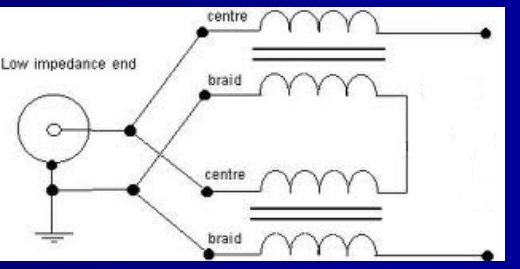
# Baluns



- Wat we niet willen, is RF in de shack!
- Een stralende voedingslijn verstoort het *stralingspatroon* en de *impedantie* van de antenne
- Bij coax vrij makkelijk te bestrijden door die een paar windingen op te rollen of door een ringkern te halen bij het voedingspunt
- Met een balun kan je ook (breedbandig!) de impedantie aanpassen (“1:X baluns”)
  - Ideale match voor multiband antennes, maar er zijn beperkingen
- Een balun voorkomt dat door de voedingslijn opgepikte omgevings QRM in de Rx terecht komt
- Waar moet een balun zitten? Boven of beneden? (Allebei!)

# Baluns

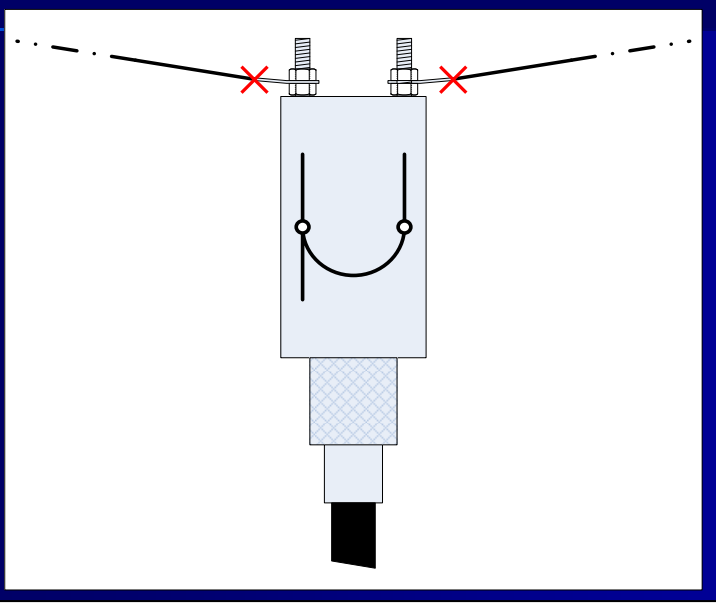





Typen stroombaluns

“Guanella” balun rechts

## Doet ie het?



- Eenvoudige test
- Neem één antenne-aansluiting los van de balun
  - Maakt niet uit welke, allebei proberen dus
- In beide gevallen moet je ontvanger zwijgen!

# Koppelstukjes



**PL259**

- Transmissieverlies:
- HF: 0.03 dB
- 2m: 0.03 dB
- 70 cm: 0.6 dB

- SWR:
- HF: 1.046
- 2m: 1.23
- 70 cm: 1.9

**N-type**

- Transmissieverlies:
- HF: 0.03 dB
- 2m: 0.02 dB
- 70 cm: 0.02 dB

- SWR:
- HF: 1.008
- 2m: 1.04
- 70 cm: 1.085

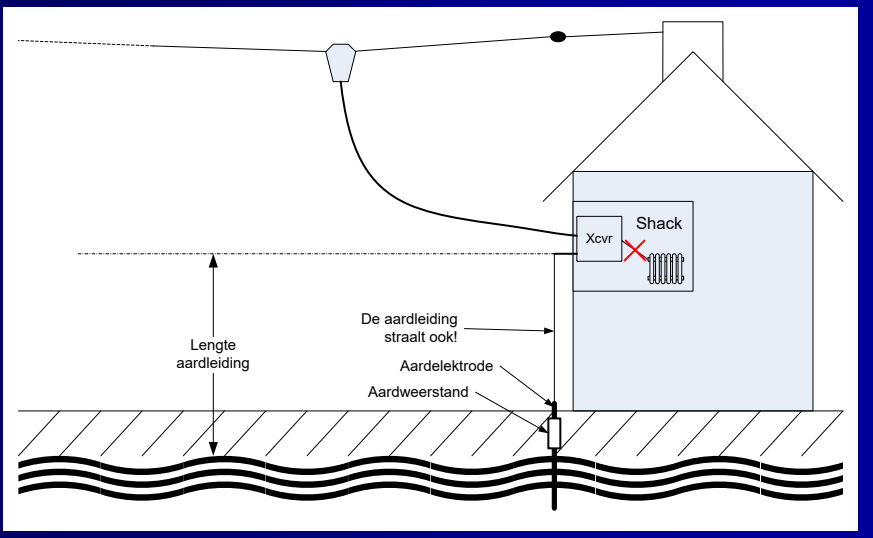
**BNC**

- Transmissieverlies:
- HF: 0.04 dB
- 2m: 0.03 dB
- 70 cm: 0.02 dB

- SWR:
- HF: 1.013
- 2m: 1.08
- 70 cm: 1.06

Vergeleken met een enkel SMA koppelstukje.

## RF aarding, algemeen




- In de shack (meestal) zinloos of zelfs ongewenst:
  - De aardleiding straalt als er HF stroom door loopt
  - Alleen zinvol als de lengte < λ/10 op de hoogste band
  - Als de verbinding met aarde op enige frequentie een kwart golf (of een oneven veelvoud daarvan) lang is, dan is de set op die band zelfs geïsoleerd van aarde!
- Bij een goed gebalanceerd dipoolsysteem, een juist geaarde vertical of een GP is het niet nodig
- *Nooit* de veiligheidsaarde, verwarmings- of waterleidingbuizen gebruiken als RF aarde (uitzondering: QRPPP)
- De verbinding met de veiligheidsaarde altijd voorzien van een RF smoorspoel (ferriet clip-ons)
- WEL: alle apparatuur in de shack op dezelfde aardpotentiaal! (“Ground Bar”) (oppassen voor aardlussen!)

En:

“That [earth] current path is an antenna, and any RF current flowing on that conductor will radiate!”

- Lees de paper van K9YC voor uitleg (http://www.arrl.org/grounding).

Trouwens, wat is eigenlijk een goede RF aarde?????

Ook hier is ON9CVD weer de naysayer

## RF aarding, algemeen



K9YC is hier heel duidelijk over:

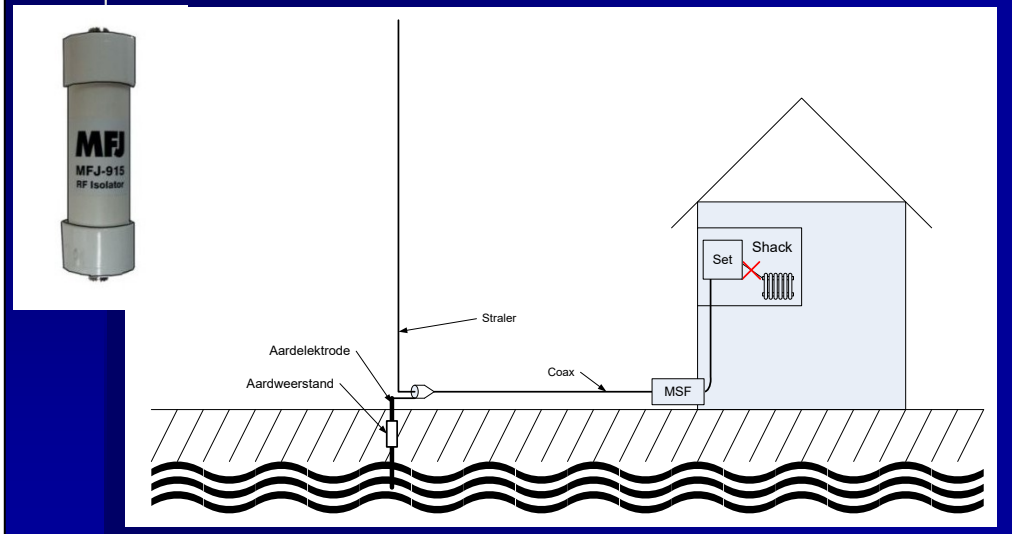
“Some hams like to think of the earth as if it were somehow a "sink" into which all noise can be poured, never to bother us again. Indeed, you'll find lots of bad advice to solve RFI problems with "a better ground." In fact, nothing could be further from the truth. An earth connection is rarely part of a solution to RF or noise problems.”

En:

“That [earth] current path is an antenna, and any RF current flowing on that conductor will radiate!”

- Lees de paper van K9YC voor uitleg (http://www.arrl.org/grounding).

# RF aarding (2)



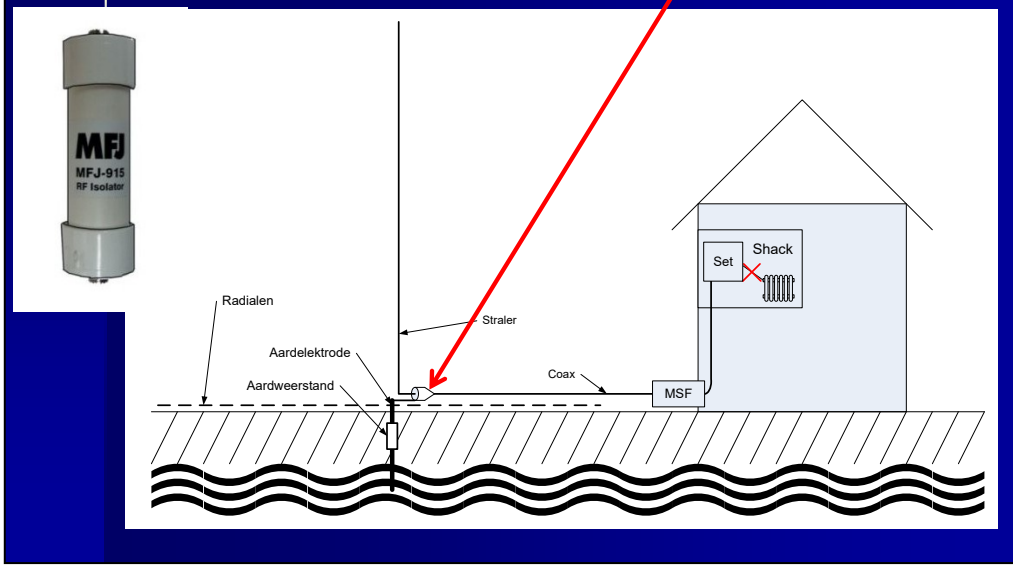

- Bij een vertical: aarden bij het voedingspunt
  - Mantelstroomfilter bij de doorvoer EN bij het voedingspunt (unun)
- Andere asymmetrische antennes: zie verderop
- De aarde is een helft van je antenne
  - Energie opgestookt in de aardweerstand (tientallen ohms in serie!)
  - HF stromen door de aarde geven last bij de buren
  - Radialen (kunstmatige aarde) kunnen de situatie verbeteren, maar je hebt er veel (tientallen) van nodig van > 0.4 λ op de laagste band voor enig effect. Op 80m is dat dus al een paar km draad
  - “Ground mesh” misschien nog de beste oplossing

Aardweerstand: denk op HF ook aan het skin effect (enkele meters bij gemiddelde grondsoort).

Boven een bepaalde lengte heeft verlengen van de aardelektrode geen zin meer.

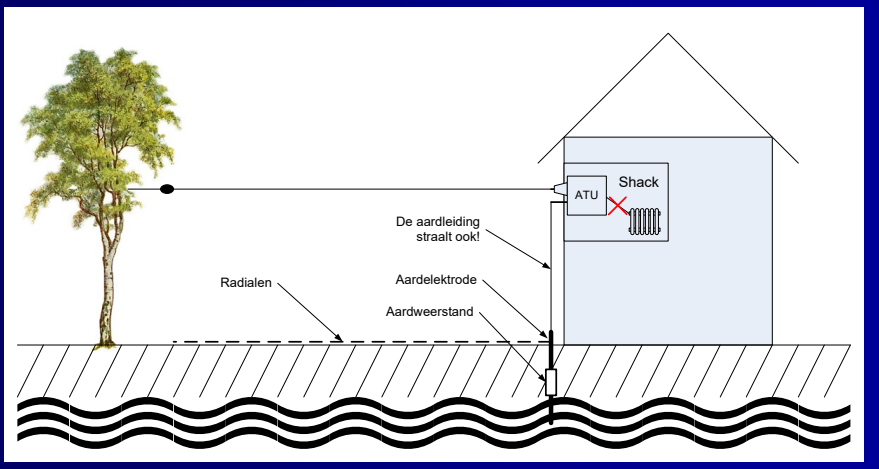
# Vertical met aardnet






Hier is de aarde alleen voor de veiligheid (wel in het voedingspunt een “blitz bug” installeren)

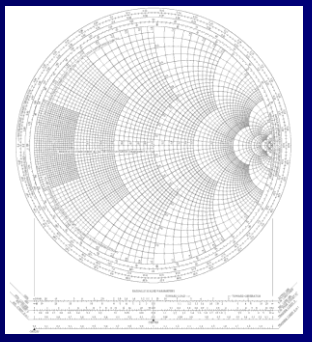
## Long wire en aarding




- Bij long wires moet je wèl in de shack aarden
- Denk er aan dat de aardleiding een deel is van de antenne
- RF aarden *alleen* op de externe tuner. De coax naar je set voorzien van een mantelstroom-killer
- De tuner zo dicht mogelijk bij de doorvoer
- De veiligheidsaarde is geen RF aarde!

## Meetapparatuur en hulpmiddelen











- SWR/Power meter
- Het Smith diagram
- Dummyload

Voor gebruik van de Smith Chart moet je wel wat begrijpen van complexe getallen en hoe die in de elektrotechniek worden gebruikt. Voor F-amateurs geen probleem!

# Meetapparatuur en hulpmiddelen

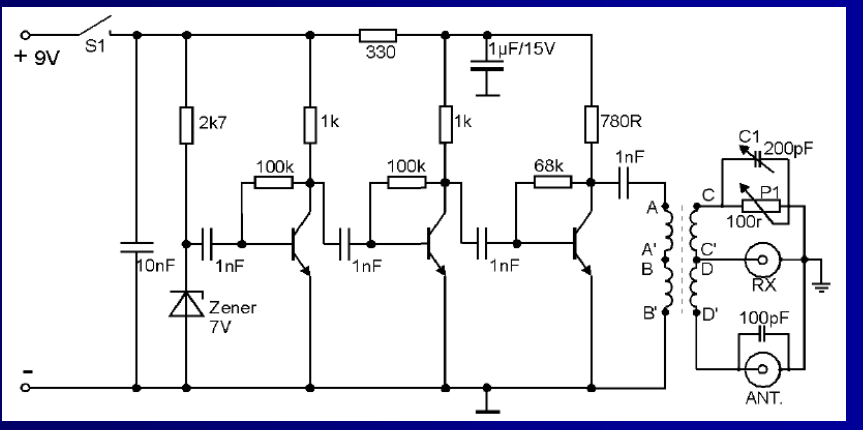






- TAPIR + H-probe: opsporen mantelstromen
- Kent u deze nog? De Griddipper!
  - Afregelen antenne-elementen en traps

# Meetapparatuur en hulpmiddelen




- Ruisbrug + GC ontvanger
  - Voor impedantiemetingen
  - De ruisbrug is makkelijk zelf te maken

## Meetapparatuur



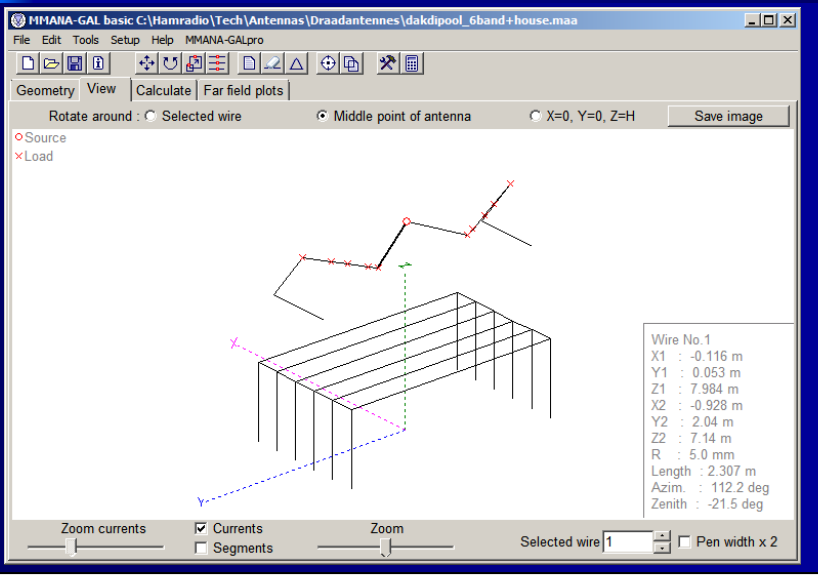






- Heel luuks: Antenna Analyzer (plaatje: RigExpert "Match") of (mini/nano)VNA
  - Beetje prijzig (de meest uitgebreide RigExpert Match (met RFE license) kost meer dan 600 euro, de MiniVNA-Tiny ca. 500 euro). Misschien iets voor de afdeling?
  - De NanoVNA is een stuk vriendelijker geprijsd, < € 100,- (2025-03-20)

# Antennesimulatie: MMANA-GAL




- Antennetechniek behoort tot die gebieden waar de amateur nog naar hartelust kan experimenteren
- Tegen bescheiden kosten kun je een testopstelling maken
- En je kunt simuleren voordat je wat gaat bouwen! Bijv. met MMANA-GAL.

Demonstructie MMANA-GAL:

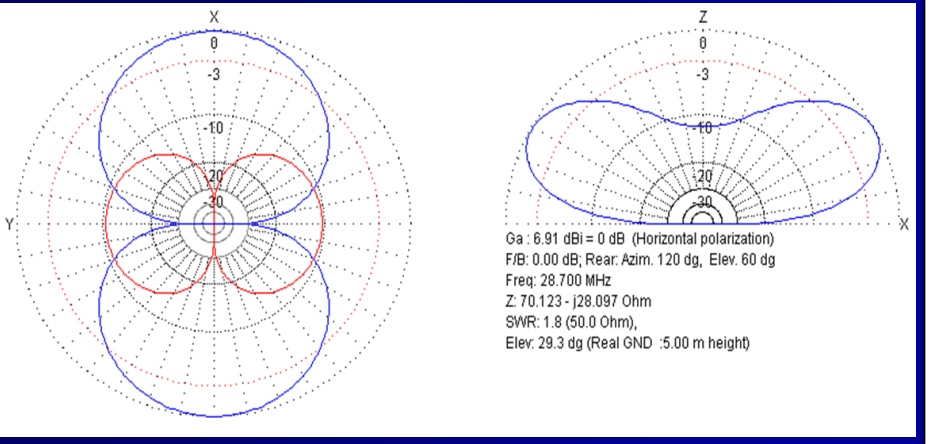
-Simpele dipool maken. Impedantie aanpassen (setup)!

-Op verschillende hoogtes doorrekenen

-Optimaliseren (alle elementen simultaan)

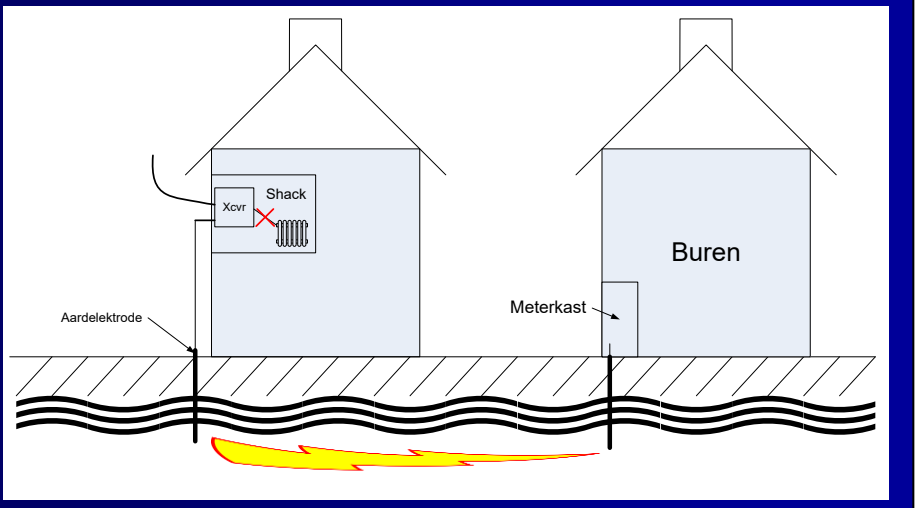
-Voorbeeld file laten zien

## Tot besluit



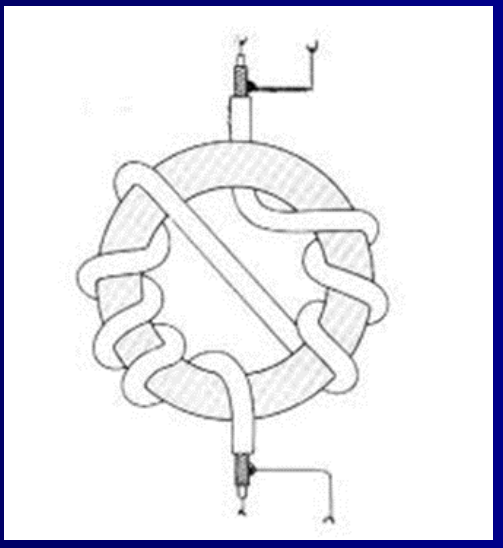

- Vanwege de eenvoud en de lagere kans op EMI, overweeg eerst een dipool(-achtige)
  - Ca. 7 dBi gain boven een reële aarde
  - Bij weinig ruimte, ophangen als Inverted-Vee
  - Denk aan de hoogte
- Pas als andere argumenten zeer zwaar gaan wegen, overweeg dan wat anders
  Bijvoorbeeld een STL op 160 m

# Tot besluit




Pas op met HF aarding

## Tot besluit



Bestrijd mantelstromen

## Tot besluit




SWR is niet de killer waar men hem voor houdt.

Er zijn goede redenen om een hoge VSWR te bestrijden, maar altijd en overal is te kort door de bocht.

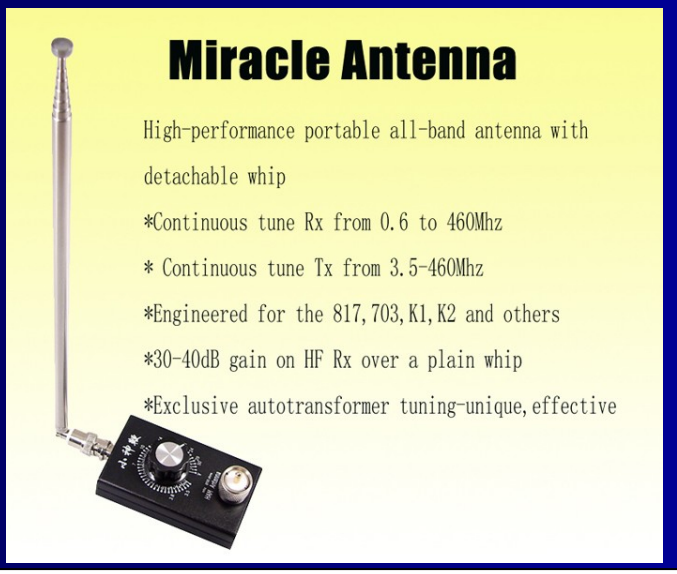
Kijk naar frequentie, kabeleigenschappen en –lengte en hoeveel reflectie de tuner aan kan.

Gratis bestaat niet: ook een matcher bij de antenne geeft demping. Een goede matcher bij de antenne heeft wel als effect dat er geen SWR-verliezen in de kabel optreden. Denk wel aan corrosie, vooral langs de kust (zout!).

Ook ter overdenking: geen enkele antenne (behalve de dummyload-met-aftakking) is zo breedbandig dat de hele band met SWR < 1.1 wordt bestreken (met name 80 meter is wat dat betreft een probleem). Dat betekent: de tuner in de mast, of afstemmen op het midden van de band, een zekere mate van misaanpassing (met bijbehorend SWR-verlies) tolereren aan de banduiteinden en in de shack aanpassen.

Ik heb wel een kritische kanttekening t.a.v. sommige tuners (Kenwoord AT-130/230 en Dentron. Misschien ook nog andere, maar daar heb ik geen ervaring mee): de afstemcondensatoren zijn lineair. Dat heeft tot gevolg dat – indien de condensator in de buurt van het minimum staat afgestemd – de bediening erg "schrikkerig" is. Ik zou hier graag condensatoren met een logaritmisch capaciteitsverloop zien, zoals vroeger in omroepontvangers.

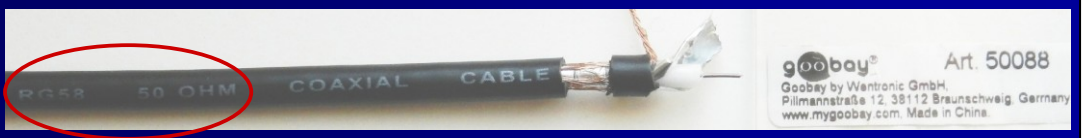
## Tot besluit




- O ja, antenne X en Y. Het moge duidelijk zijn dat er geen echte winnaar is.
- “Wonder-antennes” bestaan niet:
  de Wet tot Behoud van de Narigheid gaat onverminderd op voor alle ontwerpen
- In deze wereld bestaan vrijwel geen no-brainers:
  Eerst denken, dan doen.

## Coaxkabel: PAS OP voor neppers! Twee voorbeelden:

- "RG213 TYPE" blijkt geen RG213
  - Is dunner (9mm i.p.v. 10.5mm)
  - Minder dichte afscherming (lekkage!)
- Verkocht als RG58, is wat anders (75Ω)




- **Let op standaard: MIL-C-17!**

Let altijd bij RG* kabels op de standaardaanduiding **MIL-C-17** :

"Mil-C-17 cable is a range of coaxial and twin-axial cables manufactured according to the military specification for flexible and rigid radio frequency cables and used by the defense forces. **A particular aspect of these cables is the rigorous quality assurance process followed to ensure cables comply with their specifications, a factor that gives users confidence that such cables perform correctly.**"
Bron: Allied Wire & Cable", https://www.awcwire.com/mil-spec-coaxial/m17-cable

RG8 is wat anders dan RG213! Verschil: RG8 is dubbel afgeschermd (folie+vlechtwerk), gedeeltelijke luchtisolatie (spiraal), massieve kern (Belden LL7874CSA of Belden type 9913).

De 75 ohm "RG58" wordt veel verkocht bij AliExpress, Amazon etc. maar ook bij enkele Nederlandse webshops. Het probleem bestaat in elk geval al sinds 2015 (bron: Circuitsonline.net).

Impedantie met de NanoVNA nagemeten, Zk = $\sqrt{(Z_L \times Zin)} = \sqrt{(50 \times 116)} = 76.16$ ohm bij 12.69 MHz. Bron: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/cable-impedance-measurement_257988.html
(In feite zitten we bij deze procedure door een $\lambda/4$ transformator heen te meten!)

De fysieke lengte van de kabel is 4.1m. Een kwart elektrische golflengte is 5.9m. VF = 4.1/5.9 = 0.69. Dit geeft $\varepsilon_r = 1/VF^2 = 2.1$.

Door middel van capaciteitsmeting zijn de eigenschappen van het diëlektricum vastgesteld. $\varepsilon_r$ blijkt bij deze meting 1.9 te zijn. Dit is iets minder dan het materiaal dat we bij RG58 e.d. tegenkomen (2.3 voor VF=0.66). Onder de microscoop blijkt het om schuim te gaan. De porositeit is (bij de gemeten $\varepsilon_r$): ca. 20% gas. Bron: Martin Stråat et al., "Dielectric Properties of Polyethylene Foams at Medium and High Frequencies". Annual transactions of the Nordic rheology society, vol. 18, 2010.

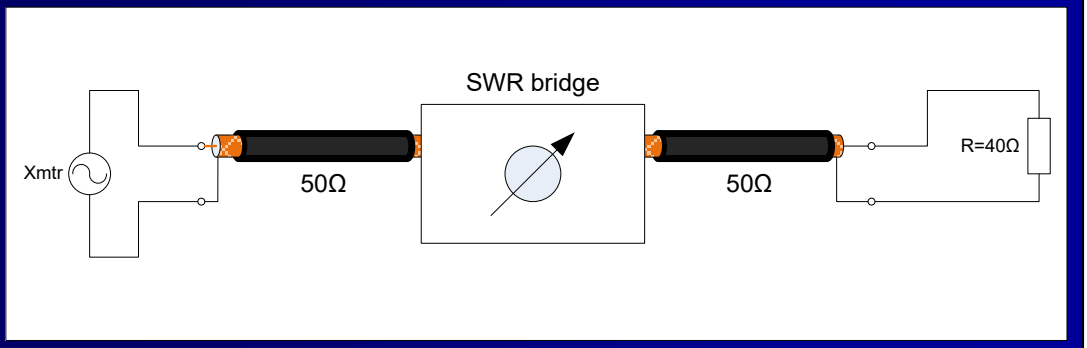
De buitendiameter van de kabel is 5 mm. Het is dus ook geen RG59, die is dikker (ca. 6.5 mm).

## Ecoflex-10 vs. RG-58

- Ecoflex: veel minder demping
- Dus ook de *reflectie* wordt minder gedempt
- Daardoor *hogere SWR*

# Ter overdenking

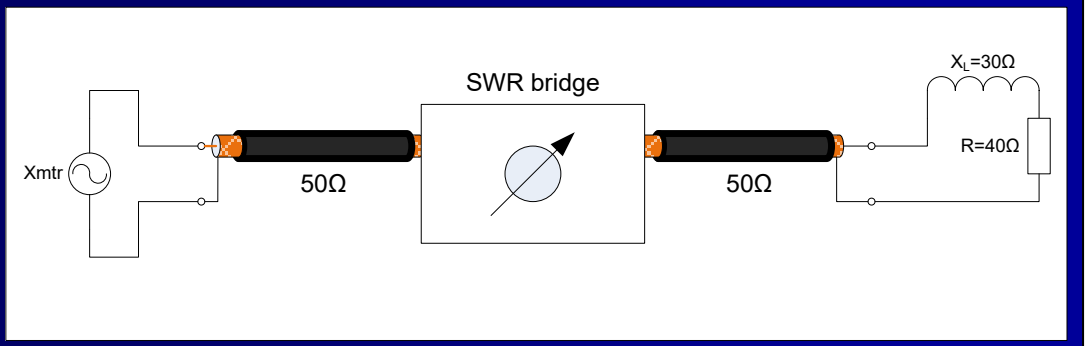
$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$




VSWR = 1.25

# Ter overdenking

$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$

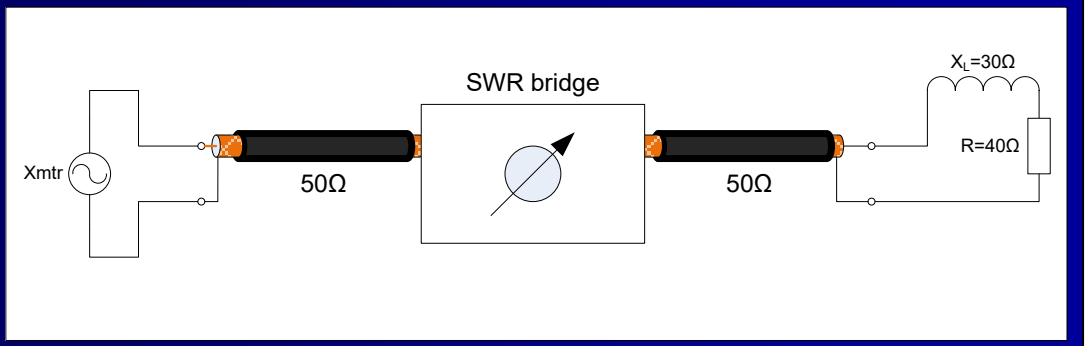



$$Z_L = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50\Omega$$

VSWR = ???

# Ter overdenking

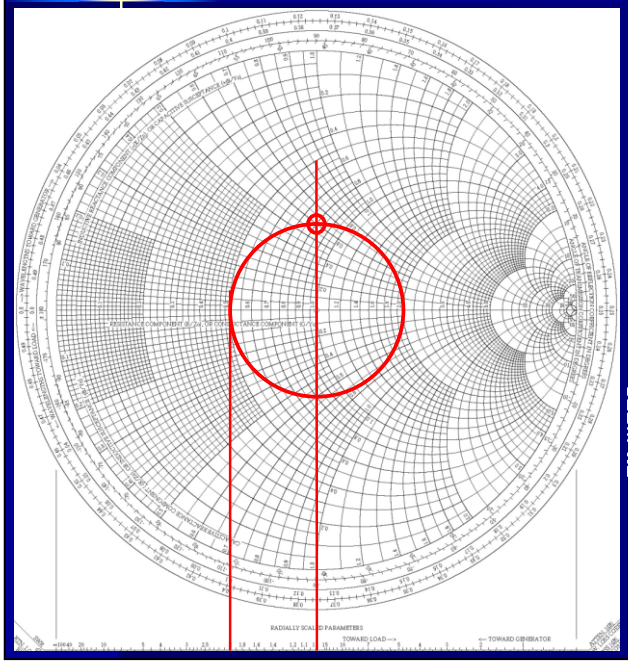
$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$



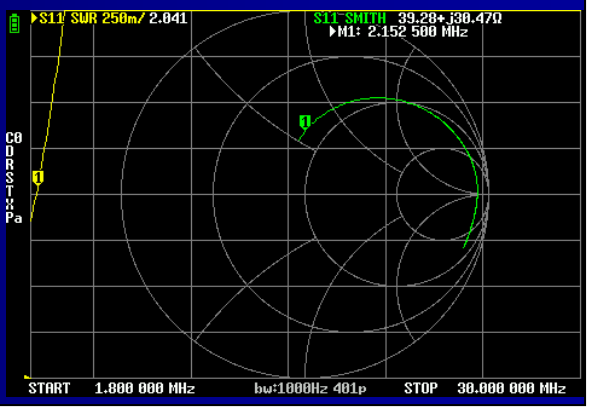

$$|Z_L| = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50\Omega; re_Z = 40; im_Z = 30$$

# Ter overdenking

$$VSWR = \left(\frac{R}{Z_0}\right)^{\pm 1} \geq 1$$



Zet in de Smith chart:
VSWR = 2 !!




Nog iets grappigs: deze impedantie ligt precies op de imaginaire $\rho$-as!

Stelling: dat geldt voor alle impedanties waarvan de absolute waarde gelijk is aan de systeemimpedantie.

Bewijs:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{Re(Z) + j \cdot Im(Z) - Z_0}{Re(Z) + j \cdot Im(Z) + Z_0}$$

Omdat volgens bovenstaande stelling $|Z| = \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2} = Z_0$, geldt:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{Re(Z) + j \cdot Im(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}}{Re(Z) + j \cdot Im(Z) + \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}}$$

Als de stelling hierboven waar is geldt $\theta = \arg(teller) - \arg(noemer) = \frac{\pi}{2}$, dus

$$tan^{-1}\left(\frac{Im(Z)}{Re(Z)-\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}}\right) - tan^{-1}\left(\frac{Im(Z)}{Re(Z)+\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}}\right) = \frac{\pi}{2}$$

Omwerken geeft:

$$tan^{-1}\left(\frac{Im(Z)}{Re(Z)-\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}}\right) + cot^{-1}\left(-\frac{Re(Z)+\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}}{Im(Z)}\right) = \frac{\pi}{2}$$

Omdat $tan^{-1}(a) + cot^{-1}(a) = \frac{\pi}{2}$, is nu nog te bewijzen:

$$\frac{Im(Z)}{Re(Z)-\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}} = -\frac{Re(Z)+\sqrt{Re(Z)^2+Im(Z)^2}}{Im(Z)} \qquad (1)$$

Door bijvoorbeeld in het rechterlid van (1) teller en noemer te vermenigvuldigen met $Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}$ ontstaat:

$$-\frac{(Re(Z) + \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}) \cdot (Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2})}{Im(Z) \cdot (Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2})} = -\frac{Re(Z)^2 - (Re(Z)^2 + Im(Z)^2)}{Im(Z) \cdot (Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2})} =$$

$$= \frac{Im(Z)^2}{Im(Z) \cdot (Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2})} = \frac{Im(Z)}{Re(Z) - \sqrt{Re(Z)^2 + Im(Z)^2}}$$

Dit is gelijk aan het linkerlid van vergelijking (1), waarmee het bewijs geleverd is voor positieve Im(Z). Het bewijs voor negatieve Im(Z) verloopt analoog, waarbij $\theta = -\frac{\pi}{2}$.

# Berekening Z = 40 + *j*30

$$Zonder\ L{:}\ VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} = \frac{50}{40} = 1.25$$

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{40 + j30 - 50}{40 + j30 + 50} = \frac{-10 + j30}{90 + j30} = \frac{-1 + j3}{9 + j3} \rightarrow$$

$$\rho = \frac{\sqrt{(-1)^2 + 3^2} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{3}{-1}\right)}}{\sqrt{9^2 + 3^2} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{3}{9}\right)}} = \frac{\sqrt{10} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}(-3)}}{\sqrt{90} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{3}\right)}} \rightarrow$$

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{9}} \cdot \frac{e^{j \cdot 108.44°}}{e^{j \cdot 18.44°}} = \frac{1}{3} \cdot e^{j(108.44° - 18.44°)} = 0.333 \cdot e^{j90°} = j0.333 \rightarrow |\rho| = 0.333$$

$$Met\ L{:}\ VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} = \frac{1.333}{0.667} = 2$$

θ = 90°, dus: ρ is volledig imaginair!

Bij VSWR zonder L: $Z_0/Z_L$ omdat $Z_0 > Z_L$

Oppassen met $\tan^{-1}()$: de noemer zit in Q2, dus 180° optellen bij de uitkomst.

Het probleem was dat we steeds het feit hebben veronachtzaamd dat een complexe impedantie ook leidt tot een complexe reflectiecoëfficiënt. Het imaginaire deel leidt hier tot een VSWR van 2.

# Berekening Z = 30 + *j*40

$$Zonder\ L{:}\ VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} = \frac{50}{30} = 1.67$$

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{30 + j40 - 50}{30 + j40 + 50} = \frac{-20 + j40}{80 + j40} = \frac{-2 + j4}{8 + j4} \rightarrow$$

$$\rho = \frac{\sqrt{(-2)^2 + 4^2} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{4}{-2}\right)}}{\sqrt{8^2 + 4^2} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{4}{8}\right)}} = \frac{\sqrt{20} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}(-2)}}{\sqrt{80} \cdot e^{j \cdot \tan^{-1}\left(\frac{1}{2}\right)}} \rightarrow$$

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{4}} \cdot \frac{e^{j \cdot 116.57°}}{e^{j \cdot 26.57°}} = \frac{1}{2} \cdot e^{j(116.57° - 26.57°)} = 0.5 \cdot e^{j90°} = j0.5 \rightarrow |\rho| = 0.5$$

$$Met\ L{:}\ VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} = \frac{1.5}{0.5} = 3$$

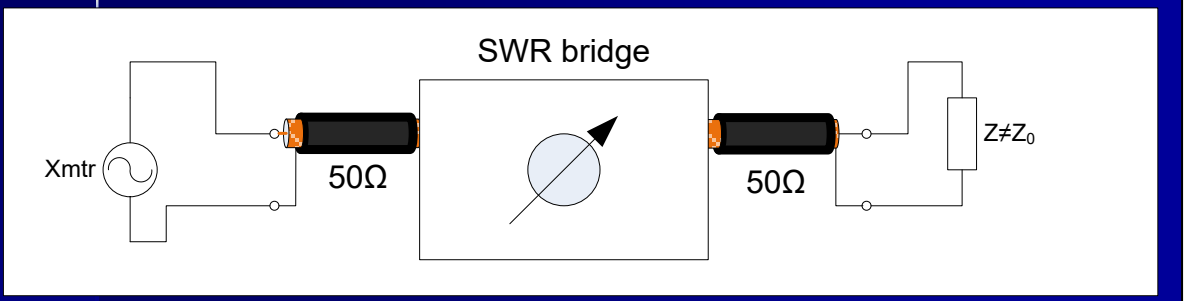
θ = 90°, dus: ρ is volledig imaginair!

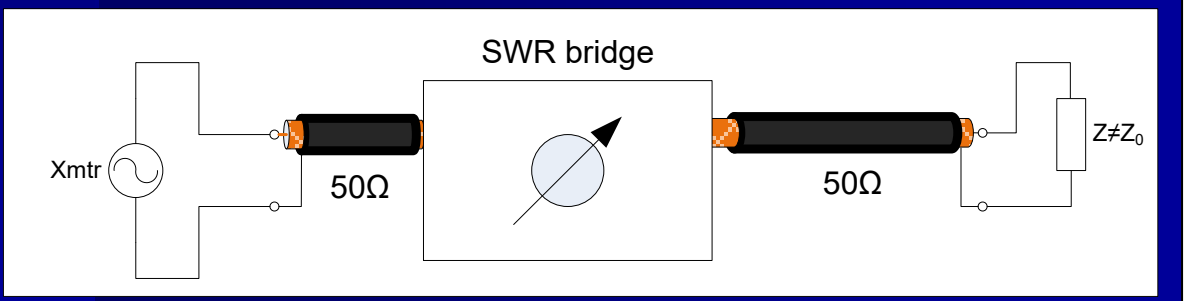
Bij VSWR zonder L: $Z_0/Z_L$ omdat $Z_0 > Z_L$

Oppassen met $\tan^{-1}()$: de noemer zit in Q2, dus 180° optellen bij de uitkomst.

Het probleem was dat we steeds het feit hebben veronachtzaamd dat een complexe impedantie ook leidt tot een complexe reflectiecoëfficiënt. Het imaginaire deel leidt hier tot een VSWR van 2.

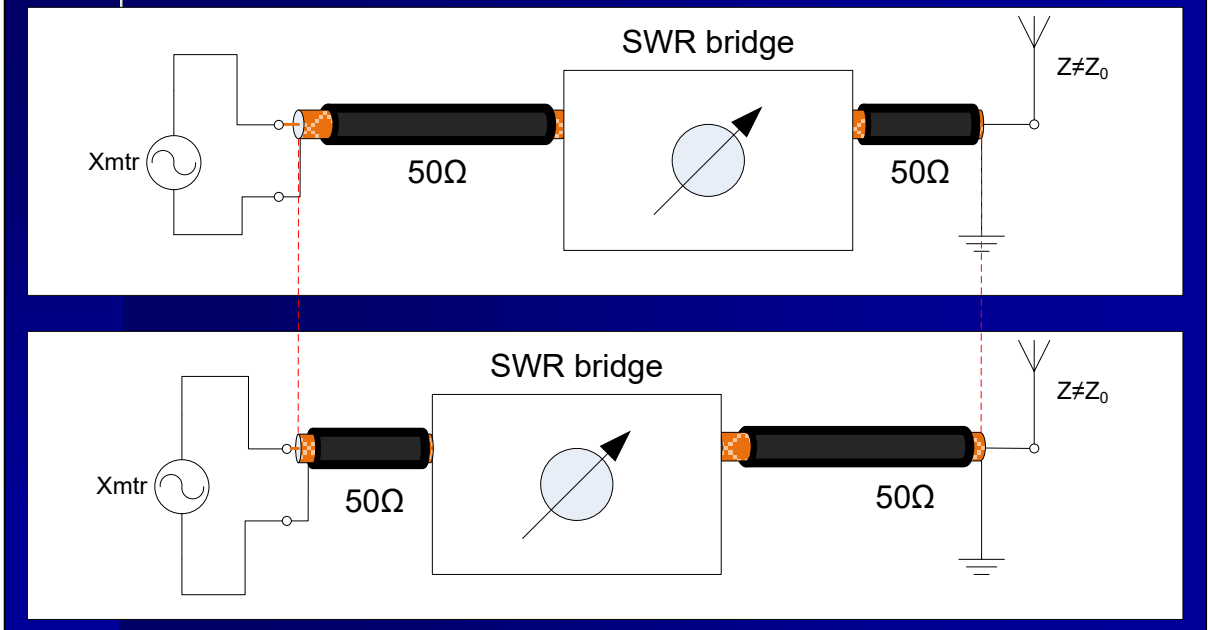
# Verandert SWR met lengte kabel?
# 1: Geen verschil



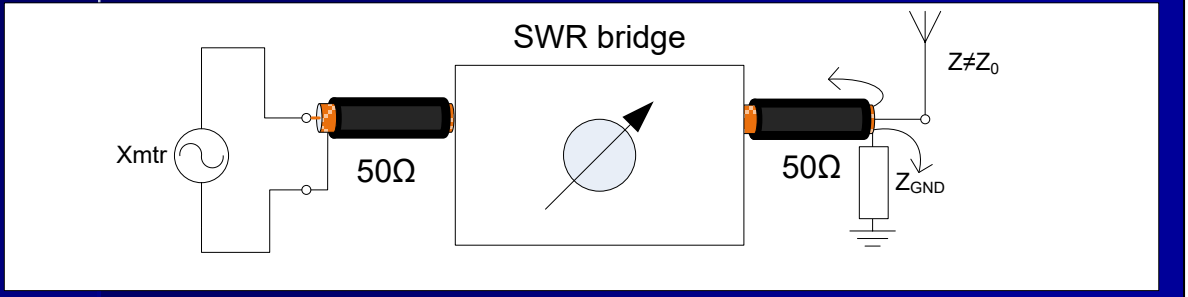

Gesloten systeem, geen derde draad

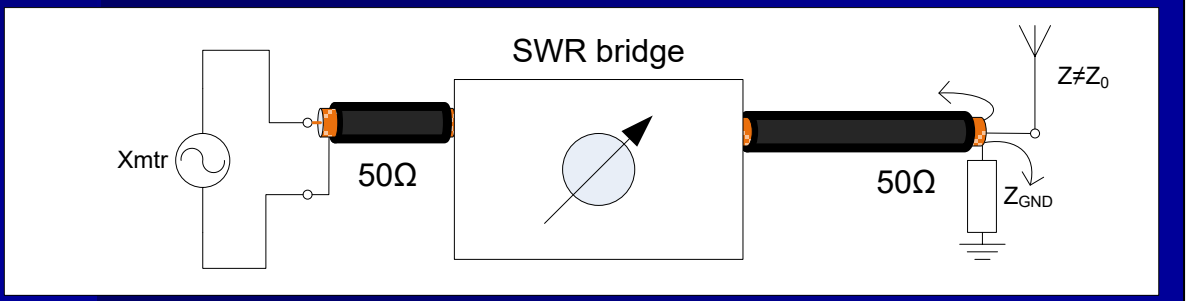
# Verandert SWR met lengte kabel?
# 2: Geen verschil




Open systeem. Lengte derde draad constant, ongeacht de plaats van de meter.

# Verandert SWR met lengte kabel?
# 3: ***WEL*** verschil!



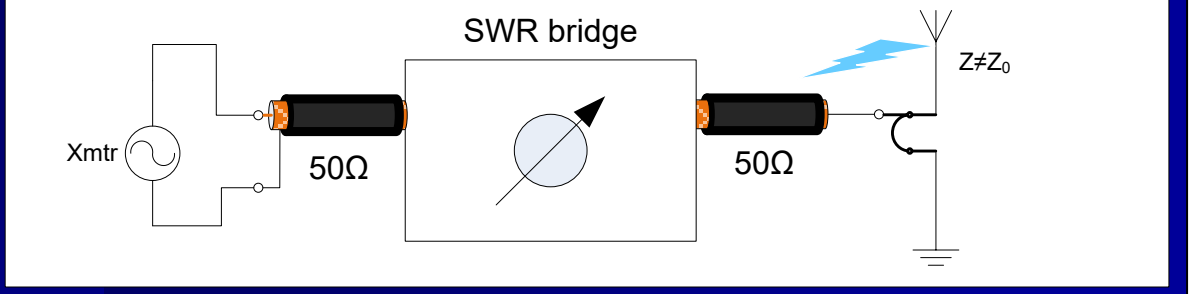



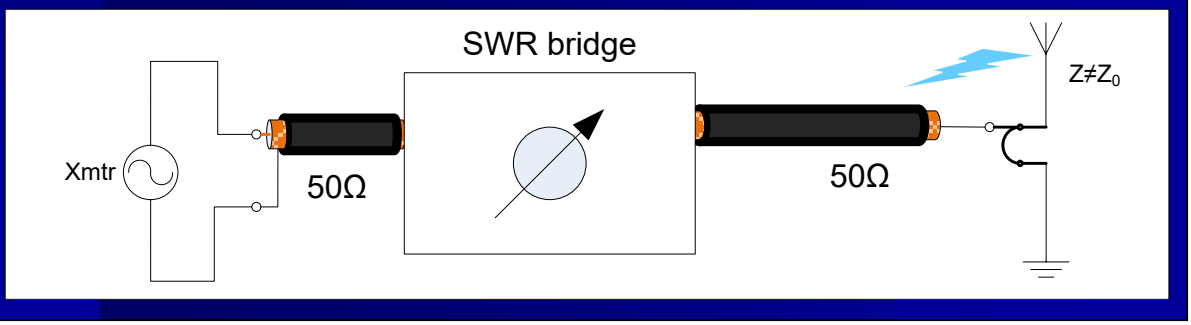

Open systeem. De lengte van de “derde draad” verandert, daardoor verandert de antenne-impedantie en dus de SWR.

Anders gezegd: de aardstroom vanuit de voedingslijn verdeelt zich over de aardweerstand en de impedantie van de buitenkant van de afscherming (de “derde draad”). De impedantie van de derde draad is afhankelijk van de lengte daarvan.

De totale impedantie van het antennesysteem is de serieschakeling van de aardimpedantie en het deel aangesloten op de binnengeleider. Als een daarvan verandert, verandert de impedantie van het geheel.

# Verandert SWR met lengte kabel?
# 4: Geen verschil




Door een unun/balun bij het voedingspunt ontstaat een quasi gesloten systeem en daardoor is er geen derde draad.

N.B.: de antenne kan – om de balun of unun heen – nog steeds parasitair instralen op de voedingslijn. Dat kan – zij het in mindere mate – beïnvloeding geven van de stralingsweerstand, de impedantie en uiteindelijk de SWR. Bij verticale antennes is het daarom verstandig om de voedingslijn onder het radialennet te leggen. Bij dipolen e.d. de voedingslijn zo goed mogelijk haaks op de antenne afspannen. Clip-on ferrieten elke paar meter om de voedingslijn kunnen een nog verdere verbetering van de situatie geven.

# Succes!



Mail voor verdere vragen:

pa0qrb@hotmail.com

# Bronnen en Links

- MMANA-GAL: www.mmhamsoft.amateur-radio.ca
- Coax traps: W8WWV, DG1MFT
- Trapdipool: NU3E, W8NX, W3DZZ, ON9CVD
- End fed half wave antenna: AA5TB
- Aarding: K9YC/ARRL
- Hy End Fed: PA3RK, PA3EKE
- OCF dipool ("Windom"): VE2CV, VE3KLO, VK2DQ
- Antenne tuner: AT-130 manual (Trio-Kenwood Corp.)
- Hairpin match: VK1OD
- T-match: K1FO
- Gamma match: W3PG
- Baluns: Ruthroff, Sevick, Guanella, Roos
- Propagation solar data: www.n0nbh.com
- Algemene info:
  - ARRL Antenna Book
  - Websites W8JI, W2DU, PA0FRI
  - www.DXzone.com
- Theoretische achtergronden:
  - Wayne Tomasi: Electronic Communications Systems
  - Zoya & Branko Popović: Introductory Electromagnetics
  - Transmissielijnen: www.fermi.asu.edu, www.ycars.org
  - Walt Maxwell, W2DU: Reflections
  - www.antenna-theory.com (o.a. de Smith chart)
  - K9YC: A Ham's Guide to RFI, Ferrites, Baluns, and Audio Interfacing
  - Coaxiale weerstand: Boston University (www.buphy.edu)
  - Grondeigenschappen, aardweerstand: www.phasetophase.nl
  - Polytechnisch Zakboekje
  - Wikipedia.org

Maxwell for Dummies? Helaas, die titel bestaat niet.

# Begrippenlijst

- ATU = Antenna Tuning Unit
- dB = decibel (#dB = 10 * $^{10}\log(P_{gemeten}/P_{referentie})$)
- dBi = dB (vermogensdichtheid) t.o.v. isotrope straler op dezelfde afstand
- dBm = dB t.o.v. 1 milliwatt
- dBW = dB t.o.v. 1 watt
- EIRP = Equivalent Isotropically Radiated Power, ERP waarbij de antenne-gain uitgedrukt is in dBi
- ERP = Effective Radiated Power, netto resultaat van TPO en alle verliezen/gains in het systeem
- GP = Groundplane (antenne)
- S-punt = niveauverschil van 6 dB (1:4 in vermogen, 1:2 in spanning)
  - S-9 (op HF) = - 73 dBm = 50 µV in 50 Ω
- SWR = Standing Wave Ratio
- TPO = Transmitter Power Output, zendvermogen
- Vermogensdichtheid = vermogen per oppervlakte ($W/m^2$) loodrecht op de voortplantingsrichting

## Formules

- Reflectiecoëfficiënt → VSWR :

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

- VSWR → Reflectiecoëfficiënt:

$$|\rho| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

- Gereflecteerd vermogen:

$$P_{refl} = |\rho|^2 \cdot P_{fwd}$$

De reflectiecoëfficiënt is een complexe grootheid: $\rho = (Z - Z_0) / (Z + Z_0)$ met Z is complex (weerstand + j · reactantie, $j^2 = -1$).

De absoluutstrepen || geven aan dat we hier de fasehoek buiten beschouwing laten.