Inhoudsopgave

14 Antennes, transmissielijnen en voortplanting van elektromagnetische golven .. 14-3
14.1 Wat leer je in dit hoofdstuk 14-3
14.2 Antennes en transmissielijnen 14-3
14.2.1 Elektromagnetisch veld 14-3
14.2.2 De halve golf-dipoolantenne 14-5
14.2.3 Vervangingsschema van een dipoolantenne 14-7
14.2.4 Transmissielijnen 14-8
14.2.5 Symmetrische en asymmetrische transmissielijnen 14-9
14.2.6 Koppeling van een symmetrische transmissielijn aan de antenne 14-11
14.2.7 De transmissielijn als afgestemde kring en impedantietransformator ... 14-11
14.2.8 De halvegolf transmissielijn. 14-13
14.2.9 Coaxiale kabel als transmissielijn; de balun 14-13
14.2.10 Gewikkelde baluns 14-15
14.2.11 De eindgevoede dipoolantenne (“Zeppelin antenne” of “Zepp”) 14-16
14.2.12 Staande-golf-verhouding (“Standing Wave Ratio”, SWR) 14-17
14.2.13 Aanpassing van de zender aan transmissielijn en antenne 14-20
14.2.14 De antennetuner of Antenna Tuning Unit (ATU) 14-22
14.2.15 Leidingverliezen 14-23
14.2.16 De golfgeleider 14-24
14.3 Propagatie van elektromagnetische golven 14-25
14.3.1 Polarisatierichting van EM-golven 14-25
14.3.2 Zichtverbindingen 14-25
14.3.3 Directe golf, grondgolf of bodemgolf en ruimtegolf 14-26
14.3.4 Propagatie van VHF- en UHF-golven 14-27
14.3.5 Propagatie via de ionosfeer 14-29
14.4 Antennevariaties 14-34
14.4.1 De isotrope straler, een theoretische maat voor antenne”versterking”.. 14-34
14.4.2 Afstand en verzwakking 14-34
14.4.3 Verticale antennes (groundplane) 14-34

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

14.4.4 De gevouwen dipool 14-36
14.4.5 Antennes met parasitaire elementen 14-36
14.4.6 Dipool met sperkringen 14-38
14.4.7 Apertuur-antennes 14-38
14.4.8 Horizontale en verticale stralingsdiagrammen 14-40
14.4.9 De effectief ontvangende oppervlakte van een antenne 14-44

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

14 Antennes, transmissielijnen en voortplanting van elektromagnetische golven

14.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

Dit hoofdstuk gaat over de reis van EM-golven van zendereindtrap naar zendantenne en dan naar ontvangstantenne. De leerstof is verdeeld over 3 paragrafen.

De eerste paragraaf gaat over de vraag, hoe een signaal van de zendereindtrap in de zendantenne komt. Dat gaat via de volgende stappen:

- Elektromagnetische (EM-) velden en golven, verband tussen frequentie, verplaatsingssnelheid en golflengte;
- Eén soort antenne en zijn vervangingsschema; andere soorten antennes komen in de laatste paragraaf;
- Een signaal gaat van zender naar antenne via een transmissielijn. We behandelen ze in drie soorten: symmetrisch (open), asymmetrisch (gesloten) en golfpijp;
- Enkele kunstjes met transmissielijn, zoals er een afgestemde kring van maken, overgang van symmetrische naar asymmetrische transmissielijn via een balun;
- Aanpassing van de zender aan de transmissielijn, staande-golf-verhouding (SWR), leidingverliezen en de ATU, de Antenna Tuning Unit of *tuner*.

De tweede paragraaf gaat over de reis van zend- naar ontvangstantenne:

- Polarisatierichting en verschil tussen directe golf, grondgolf en ruimtegolf;
- Propagatie van VHF- en UHF-golven, die vooral via het onderste deel van de atmosfeer loopt, maar ook via de maan of geïoniseerde sporen van meteoren;
- Propagatie via het buitenste deel van de atmosfeer, de ionosfeer.

De derde paragraaf gaat vooral over soorten antennes. We beperken ons tot de soorten die op het examen kunnen worden gevraagd:

- Een theoretische antenne: de isotrope straler en verzwakking van EM-golven met toenemende afstand tot de zendantenne;
- Horizontale en verticale antennes;
- Antennes met parasitaire elementen. De parasieten blijken nuttig te zijn;
- Antennes voor meer dan één frequentie;
- Apertuurantennes (schotels bijvoorbeeld);
- Stralingsdiagrammen en de effectief ontvangende oppervlakte van een antenne.

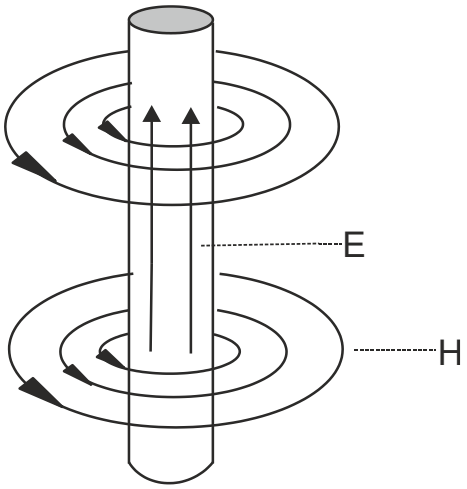
14.2 Antennes en transmissielijnen

14.2.1 Elektromagnetisch veld

Rond elke stroomvoerende geleider bevindt zich een elektromagnetisch veld. Dat bestaat uit een een magnetisch veld H en elektrisch veld E. H heeft veldlijnen in vlakken

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

loodrecht op de geleider; E heeft veldlijnen in vlakken ongeveer evenwijdig aan de geleider. Elektrisch en magnetisch veld staan loodrecht op elkaar (Figuur 14.2-1).



Figuur 14.2-1. Magnetisch veld rond een stroomvoerende geleider (cursus 1999, iets gewijzigd).

De afstand waarover iets zich in een bepaalde tijd verplaatst, volgt uit

$$Afstand = snelheid * tijd$$

De snelheid waarmee een elektromagnetisch veld (afgekort: EM-veld) zich uitbreidt, is in vacuüm (luchtledig) gelijk aan en in lucht vrijwel gelijk aan de lichtsnelheid c, afgerond 300 000 km/s.

Het "langskomen" van één EM-golf duurt even lang als de periodeduur T van de wisselstroom/spanning die hem veroorzaakt. De frequentie f is het aantal perioden in 1 seconde. Dan is f ook het aantal golven dat achter elkaar gezet in 300 000 km past. Daaruit volgt de lengte van een enkele golf, de golflengte λ volgens

$$\lambda = c.T \qquad (14.2\text{-}1)$$

Het verband tussen frequentie f en periodeduur T is

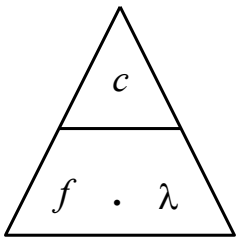
$$T = \frac{1}{f} \qquad (14.2\text{-}2)$$

Vul dat in in (14.2-1) en we krijgen we het verband tussen golflengte en frequentie:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \rightarrow \quad f = \frac{c}{\lambda} \qquad (14.2\text{-}3)$$

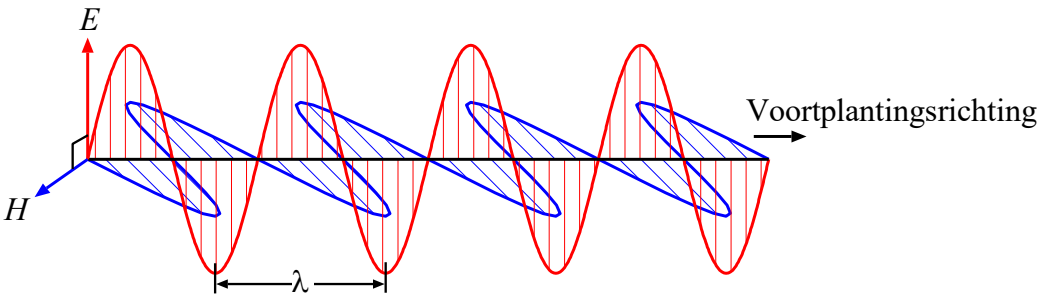
In woorden: golflengte is lichtsnelheid gedeeld door frequentie. Frequentie is lichtsnelheid gedeeld door golflengte. Je kunt er dezelfde driehoek voor gebruiken als bij de wet van Ohm (Figuur 14.2-2).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-2. Vermenigvuldig- en deeldriehoek voor vergelijkingen (14.2-3).

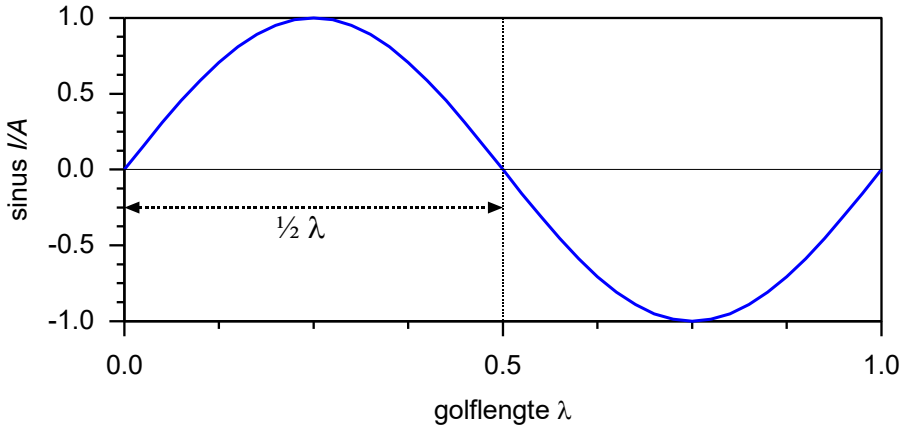
Figuur 14.2-1 liet zien dat het elektrische en het magnetische veld loodrecht op elkaar staan. Figuur 14.2-3 laat zien hoe je je dat kunt voorstellen.



Figuur 14.2-3. Richting van het elektrische deel E en het magnetische deel H van een EM-veld.

14.2.2 De halve golf-dipoolantenne

De lengte van een antenne hangt samen met de golflengte waarvoor de antenne geschikt is. Stel je een oneindig lange rechte draad voor waar een wisselstroom doorheen loopt. De lengte van één periode is één golflengte (Figuur 14.2-4).

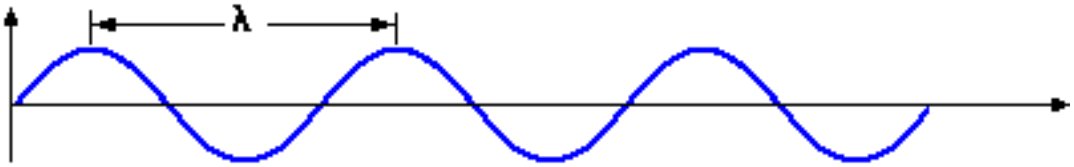


Figuur 14.2-4. Een sinusperiode van één hele golflengte λ. Tussen de pijlpunten zit een halve golflengte.

De golf verplaatst zich langs de draad met bijna de lichtsnelheid. De verhouding snelheid in de draad/lichtsnelheid is ongeveer 0,96. Dat heet de *verkortingsfactor*. De golflengte λ in zo'n draad is de verkortingsfactor maal de golflengte in de omringende lucht.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

De golf verplaatst zich met gelijkblijvende amplitude langs de draad. Zo'n golf heet een *lopende golf*. Klik op Figuur 14.2-5 voor een animatie.



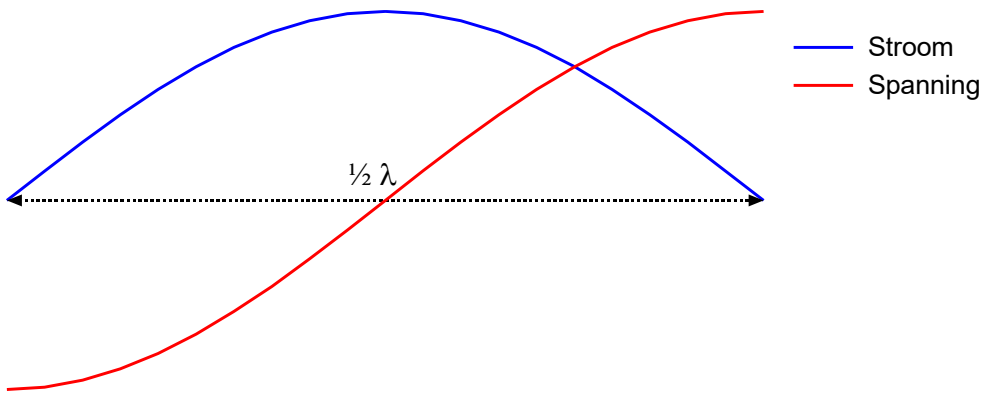
Figuur 14.2-5. Afbeelding van een lopende golf met golflengte λ. (Wikipedia)

Bij *staande golven* varieert de amplitude en blijven de nulpunten op hun plaats.

We beschouwen een stuk draad van een halve golflengte lang. Het staat aangegeven in Figuur 14.2-4: de gestippelde tweepuntige pijl met de aanduiding ½ λ. Stuur een wisselstroom met die golflengte dat stuk draad in (hoe, komt later).

Stroom veroorzaakt een magnetisch veld. Dat veld is een vorm van energie. De stroom "botst" onvermijdelijk tegen de uiteinden van de draad. De energie van het magnetisch veld moet dan ergens heen. Die probeert de stroom op gang te houden. Stroom is transport van lading. Die lading hoopt zich op aan de uiteinden van de draad. De ladingen op de uiteinden zijn tegengesteld. Er is dan spanning tussen de uiteinden van de draad. Het bijbehorende elektrische veld is ook een vorm van energie. Naarmate zich meer lading ophoopt, loopt de spanning tussen de draaduiteinden op. Het elektrische veld wordt sterker. Uiteindelijk zal de stroom de andere kant op gaan lopen De ladingen en het elektrische veld nemen af. Het magnetische veld wordt door de groter wordende stroom sterker, enz. Zo wisselen elektrisch en magnetisch veld voortdurend energie uit.

Stroom- en spanningsgolf in het draadstuk blijven op hun plek. Het zijn *staande golven*. Ze zwakken geleidelijk af als er geen nieuwe energie wordt toegevoerd. Een klein deel is warmteverlies. Maar het EM-veld blijft zich uitbreiden. In elke periode gaat een deel van het vermogen "de wijde wereld in". Zo werkt een zendende antenne. Figuur 14.2-6 toont de verdeling van spanning en stroom over een halve golf-antenne.



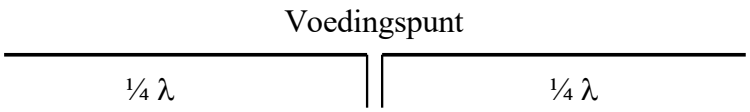
Figuur 14.2-6. Verdeling van stroom en spanning over een halve golf-antenne. De spanningen op de uiteinden zijn in tegenfase.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

In het midden is de amplitude van de stroom het grootst en die van de spanning het kleinst. Op de uiteinden is het omgekeerd. Waar de draad eindigt, is de stroom 0 en de spanning hoog. Daaruit volgt dat de impedantie in het midden laag is en op de uiteinden heel hoog. Zo'n antenne heet een *dipool.*

De theoretische impedantie in het midden bedraagt 73 ohm als de antenne hoog genoeg is opgehangen voor een verwaarloosbare invloed van het aardoppervlak. Een hoogte van een kwart golflengte komt redelijk in de buurt. Minder hoogte geeft een lagere impedantie.

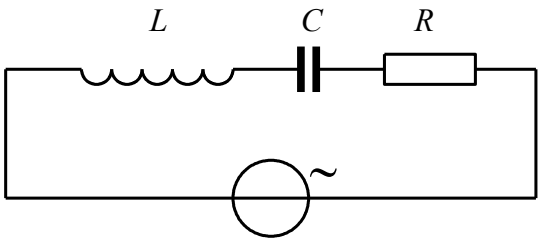
De zender vult de energie die de antenne uitzendt, aan via een transmissielijn (subparagraaf 14.2.4 en volgende). Die lijn is verbonden met de zenderuitgang. Het aansluitpunt is bijvoorbeeld het midden van de antenne, waar de laagste impedantie zit, zoals in Figuur 14.2-7.



Figuur 14.2-7. Dipoolantenne bestaande uit twee helften van ¼ golf lang. Het voedingspunt met lage impedantie zit in het midden.

14.2.3 Vervangingsschema van een dipoolantenne

Als de halve golf precies in de dipool past, heet het dat de antenne *in resonantie* is. Dat doet denken aan een LC-kring. En dat is precies het vervangingsschema (Figuur 14.2-8).



Figuur 14.2-8. Vervangingsschema van een middengevoede halve-golf dipool met wisselspanningsbron.

Capaciteit C en zelfinductie L zijn in werkelijkheid verdeeld over de volle lengte van de antenne. Bij resonantie is hun gezamenlijke reactantie 0 en blijft weerstand R over. R is twee weerstanden in één:

- De verliesweerstand die een (klein) deel van het vermogen omzet in warmte.
- De *stralingsweerstand* die staat voor het in de ruimte verdwijnen van vermogen via elektromagnetische straling. In de antenne van Figuur 14.2-7 is dat de genoemde 73 Ω.

Voor wat betreft de impedantie kunnen zich drie situaties voordoen.

- **De halve golflengte die bij de frequentie hoort, past precies in de antenne.** Dan heffen de reactanties van condensator en spoel elkaar op en blijft een Ohmse weerstand over.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

- **De halve golflengte is langer dan de antenne.** Dan is de frequentie die bij de golflengte hoort, lager dan de resonantiefrequentie. De reactantie van C is dan groter dan die van L en de antenne gedraagt zich als een capaciteit in serie met R.
- **De halve golflengte is korter dan de antenne.** Dan is de frequentie die bij de golflengte hoort, hoger dan de resonantiefrequentie. De reactantie van L is daarbij groter dan die van C en de antenne gedraagt zich als een zelfinductie in serie met R.

14.2.4 Transmissielijnen

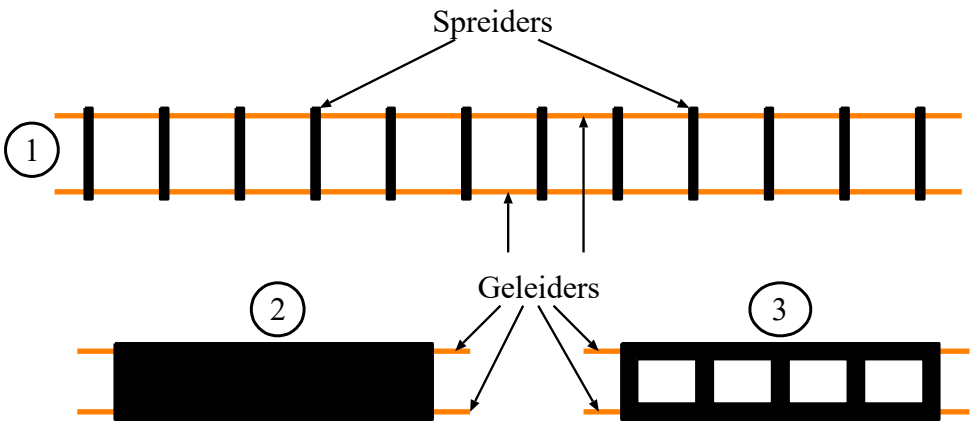
Een goede transmissielijn heeft twee eigenschappen.

- De lijn verliest onderweg zo min mogelijk energie
- De lijn geeft een maximale overdracht van vermogen van zender naar antenne of van antenne naar ontvanger.

Er zijn drie hoofdsoorten transmissielijn:

- Symmetrische of open leidingen
- Asymmetrische of gesloten leidingen
- Golfgeleiders ("golfpijp").

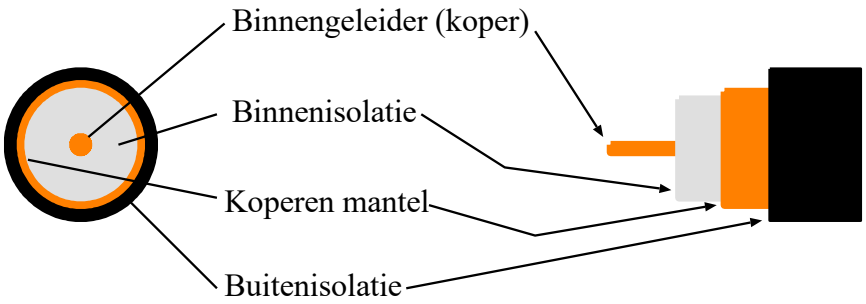
Figuur 14.2-9 laat drie uitvoeringen van open leidingen zien. De stroomvoerende delen zijn bij voorkeur van het goed geleidende koper. Vandaar hun kleur.



Figuur 14.2-9. Drie soorten symmetrische of open leidingen. 1. Twee draden met isolerende spreiders die de onderlinge afstand gelijk houden. Onder radioamateurs: "Kippenladder". 2. Platte leiding met kunststof-isolatie die ook de afstand tussen beide draden gelijk houdt. 3. Variant op (2) die door de openingen lichter is en veel lucht in de isolatie heeft. De geleiders zijn zo goed mogelijk koperkleurig weergegeven.

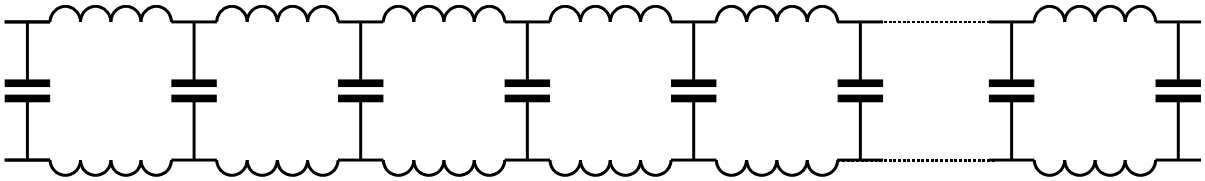
De asymmetrische of gesloten leiding is een coaxiale kabel of kortweg coaxkabel. Ook die heeft twee geleiders, de binnengeleider en de mantel. De binnengeleider is omsloten door de mantel (Figuur 14.2-10).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-10. Coaxkabel in dwars- en langsdoorsnede. De geleiders zijn ook hier zo goed mogelijk koperkleurig gemaakt.

Figuur 14.2-11 toont het vervangingsschema van een ideale symmetrische transmissielijn.



Figuur 14.2-11. Vervangingsschema van een ideale symmetrische transmissielijn.

Een niet-ideale lijn heeft weerstand. In een lijn van goede kwaliteit is die weerstand klein. Capaciteiten en zelfinducties zijn net als bij een antenne niet gescheiden. Ze kunnen dan ook in willekeurig aantal worden voorgesteld. Hoe meer, hoe realistischer.

Spanning en stroom in de ene geleider zijn in tegenfase met die in de andere. De elektromagnetische velden van beide zijn even groot en tegengesteld. Zo wordt de straling van de één opgeheven door die van de ander. Doordat de geleiders niet exact kunnen samenvallen, is dat net niet helemaal zo, maar praktisch gezien straalt de lijn vrijwel niet.

Een oneindig lange lijn gedraagt zich op het aansluitpunt als weerstand. Toch hebben we het over impedantie, omdat de leiding nu eenmaal zelfinductie en capaciteit bevat. De impedantie hangt af van de opbouw van de lijn. De impedantie van een oneindig lange lijn heet *karakteristieke impedantie*. Voor open leidingen is die meestal tussen 100 en 600 Ω.,

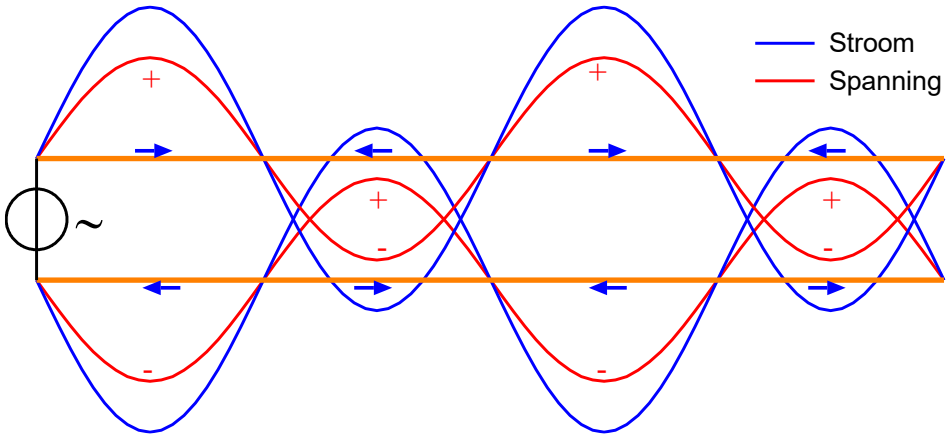
Meten van de karakteristieke impedantie met een ohmmeter is zinloos. Die werkt met gelijkstroom. Daarbij geldt de Ohmse weerstand.

Als we een eindig stuk transmissielijn afsluiten met een weerstand die even groot is als de karakteristieke impedantie, lijkt de lijn vanaf het aansluitpunt nog steeds oneindig lang.

14.2.5 Symmetrische en asymmetrische transmissielijnen

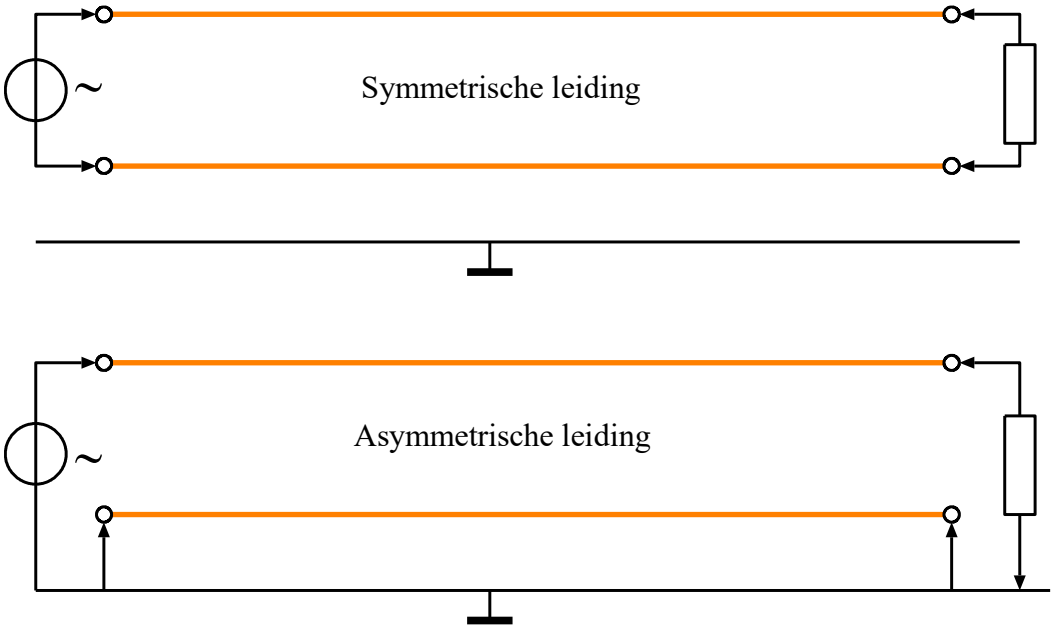
Open lijn is symmetrisch. De ene geleider is identiek aan de andere. Stroom en spanning in de ene geleider hebben hun spiegelbeeld in de andere (Figuur 14.2-12).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-12. Momentopname van stroom en spanning in een open transmissielijn met lopende golven. Geleiders koperkleurig getekend. (figuur volgens cursus 1999).

Coax is asymmetrisch. De mantel omsluit de binnengeleider. Door het verschil in constructie verschilt de aansturing tussen open lijn en coax (Figuur 14.2-13).

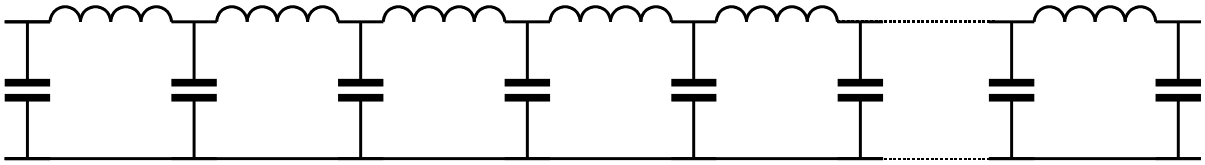


Figuur 14.2-13. Aansluiting symmetrische leiding (boven) en asymmetrische leiding (onder). Figuur volgens cursus 1999.

Een symmetrische leiding heeft geen aard- of massa-aansluiting. In beide helften gebeurt hetzelfde, maar in tegengestelde richting. De leidinghelften “zweven” ten opzichte van aarde.

In een asymmetrische leiding doet de binnengeleider hetzelfde als één helft van een symmetrische leiding. De mantel is behalve de tweede leiding ook massa/aarde. Daarom is voor een coaxiale leiding Figuur 14.2-14 een betere benadering dan Figuur 14.2-11.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-14 Vervangingsschema asymmetrische transmissielijn (coax).

De karakteristieke impedantie van coaxiale kabel ligt meestal tussen 50 en 100 Ω. De verkortingsfactor is kleiner dan bij losse draad of symmetrische leidingen. Dat komt vooral door het grotere contactoppervlak met het isolerende materiaal. Bij gangbare coax ligt de verkortingsfactor rond 0,65; bij symmetrische leidingen rond 0,95. Bij verliesarme coax, waarin de isolatie in de kabel veel lucht bevat, ligt de waarde vaak rond 0,7 – 0,75. Bij isolatie met sommige soorten kunststof zoals teflon kan deze zelfs boven 0,8 liggen.

14.2.6 Koppeling van een symmetrische transmissielijn aan de antenne

Figuur 14.2-8 liet zien dat we ons de dipool kunnen voorstellen als een seriekring van zelfinductie, capaciteit en weerstand. Als de antenne in resonantie is, is er elektrisch gezien alleen een weerstand. Als die weerstand even groot is als de karakteristieke impedantie van de transmissielijn, is het een kwestie van aansluiten. Anders is er een aanpassing nodig. Aanpassingen komen verderop in dit hoofdstuk aan de orde.

De antenne is te beschouwen als een LC-kring in resonantie. De transmissielijn die ook wel voedingsleiding heet, levert een vermogensstroom aan de antenne. In de antenne is evenwicht als de voedingsleiding evenveel vermogen naar de antenne brengt als de antenne uitstraalt en dissipeert. De waarde van Q van de antenne bepaalt bij welke amplitude van de staande golf in de antenne dat het geval is.

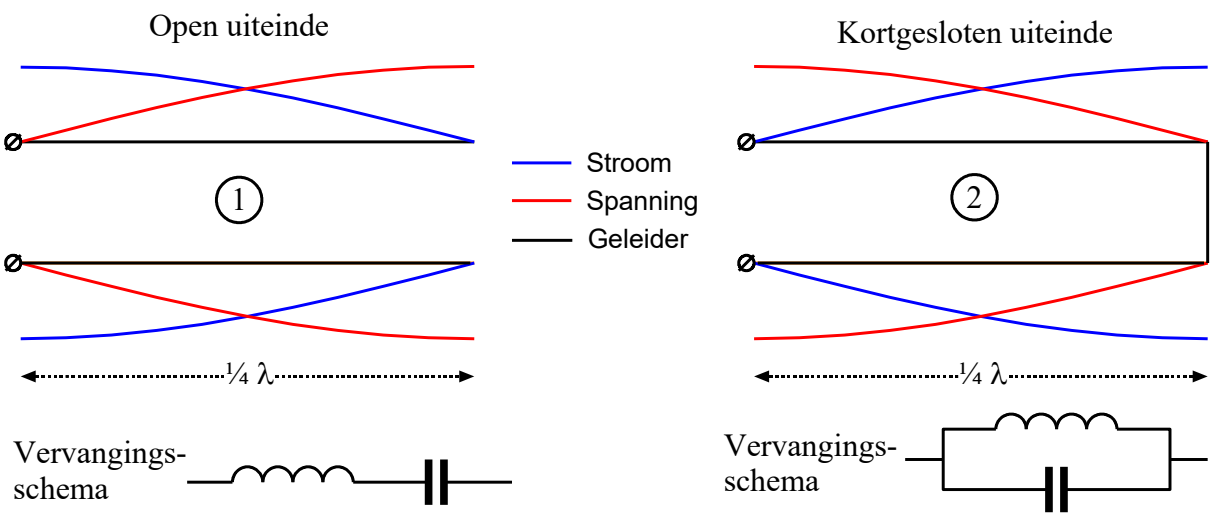
Een dipoolantenne die wordt gevoed via een symmetrische (open) transmissielijn is ook op te vatten als een transmissielijn met naar buiten gebogen uiteinden.

14.2.7 De transmissielijn als afgestemde kring en impedantietransformator

We zagen eerder hoe een stuk draad een antenne kan zijn voor een frequentie waarvan de halve golflengte gelijk is aan de antennelengte. Afhankelijk van hun lengte hebben ook stukken transmissielijn bijzondere eigenschappen. We beginnen met een stuk van ¼ λ lang.

De halve-golf-dipool die we in subparagraaf 14.2.2 bespraken, bestaat uit twee kwartgolfstukken. Elk stuk heeft een uiteinde met lage en met hoge impedantie. Een kwartgolfstuk transmissielijn doet net zoiets (Figuur 14.2-15).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-15. Symmetrische kwartgolf transmissielijn. 1) Open eind. 2) Kortgesloten eind.

Lijn 1 (links) heeft een open uiteinde; de twee geleiders zijn niet verbonden. De spanningen over het uiteinde zijn daardoor hoog: een hoge impedantie. Op het aansluitpunt links is de spanning laag en de stroom hoog: een lage impedantie. De schakeling gedraagt zich als een serie-LC-kring die op de resonantiefrequentie (vrijwel) een kortsluiting geeft. Een *zuigkring* heet dat ook wel.

Lijn 2 (rechts) heeft een kortgesloten eind. Het impedantiebeeld is omgekeerd aan dat van lijn 1. De lage impedantie zit op de kortsluiting, de hoge bij de aansluiting. De schakeling gedraagt zich als parallelkring: bij resonantie een hoge impedantie op de ingang.

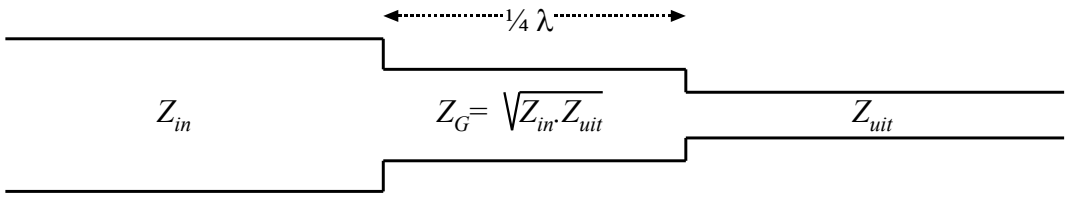
Een kwartgolflijn kan ook een impedantietransformator zijn als we er een eindige impedantie op aansluiten. Het verband tussen de aangesloten impedantie Z_{in}, de karakteristieke impedantie Z_G van het stuk lijn en de impedantie Z_{uit} aan de uitgang is:

$$Z_G^2 = Z_{in}.Z_{uit} \qquad (14.2\text{-}4)$$

of

$$Z_G = \sqrt{Z_{in}.Z_{uit}} \qquad (14.2\text{-}5)$$

Zie Figuur 14.2-16 hieronder.

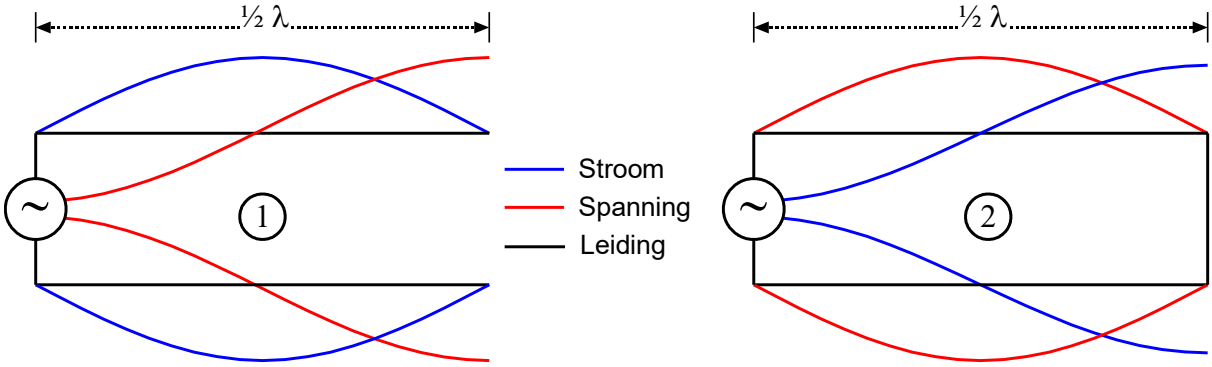


Figuur 14.2-16. Kwartgolf transmissielijntransformator

Wat we hier over symmetrische (open) lijn hebben besproken, is ook van toepassing op coaxiale transmissielijn. De enige extra voorwaarde is dat bij gebruik van coax binnengeleider aan binnengeleider en mantel aan mantel komt.

14.2.8 De halvegolf transmissielijn.

Figuur 14.2-17 lijkt op Figuur 14.2-15, maar is een halve golflengte lang. Hij toont weer de spanning- en stroomverdeling bij open en bij kortgesloten uiteinde.



Figuur 14.2-17. Verdeling van spanning en stroom in een halvegolf-transmissielijn. Links (1) met open uiteinde. Rechts (2) met kortgesloten uiteinde.

De cirkel met wisselstroomsymbool links in beide schakelingen stelt een generator voor die de wisselstroom en -spanning produceert. Let vooral op de verwisseling van de curven die het verloop van stroom, respectievelijk spanning aangeven.

Nu de vraag, wat in een halvegolf-transmissielijn gebeurt als hij tussen twee andere transmissielijnen wordt geschakeld. Een transmissielijn van een halve golflengte lang is twee kwartgolf stukken in serie. Dat betekent twee keer achtereen de impedantietransformatie van een kwartgolf-transmissielijn. Als de aangesloten transmissielijn aan beide kanten dezelfde karakteristieke impedantie heeft, ontstaan twee exact tegengestelde transformaties. Resultaat: aan in- en uitgang dezelfde impedantie. Is dat alles? Nee. Kijk goed naar Figuur 14.2-17. Begin en eind zijn in tegenfase!

Conclusie: Een transmissielijn van een halve golf lang laat de impedantie ongemoeid als op de uiteinden dezelfde impedantie wordt aangesloten en keert de fase om. Het halvegolf-stuk zelf mag elke karakteristieke impedantie hebben.

14.2.9 Coaxiale kabel als transmissielijn; de balun

Een dipoolantenne is symmetrisch. Antenne-aansluitingen op amateurzenders en -ontvangers zijn bijna altijd coaxiaal met een impedantie van 50 Ω.

Kun je een coaxiale en dus asymmetrische transmissielijn ongestraft op een symmetrische antenne aansluiten? Een coaxiale lijn straalt normaal gesproken niet. Dat komt doordat EM-stralingen van de binnengeleider en de mantel even groot en tegengesteld zijn en elkaar naar buiten toe teniet doen. Daaruit valt af te leiden dat de stroom in de mantel aan de binnenkant moet lopen: het huideffect (Hoofdstuk 6).

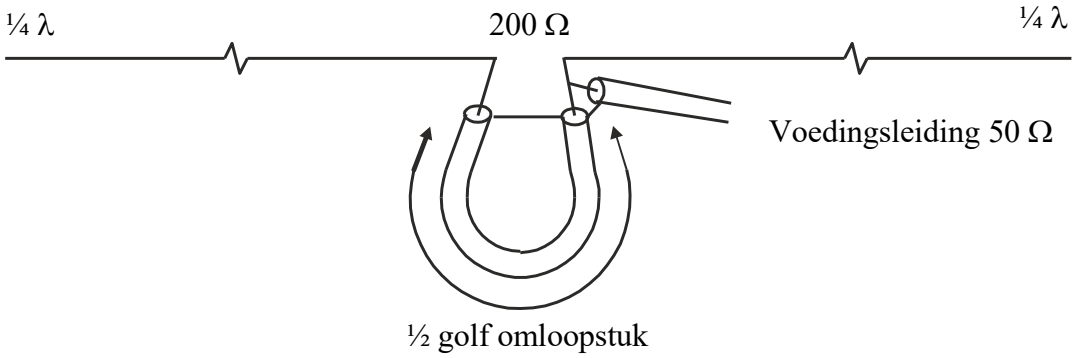
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

De binnengeleider van de coaxkabel kan zonder bezwaar aan één helft van de dipool worden verbonden. Wordt de mantel rechtstreeks verbonden met de andere dipoolhelft, dan zou er in de mantel stroom aan de buitenkant lopen. Dan gaat de kabel EM-straling uitzenden. Vermogen dat door de kabel wordt uitgezonden, wordt niet uitgezonden door de antennehelft die met de mantel is verbonden. De antenne straalt daardoor asymmetrisch. In gebruikelijk Nederlands: ¨de antenne straalt scheef".

Dan is er een risico dat die EM-straling van de kabel terechtkomt waar hij storing kan veroorzaken of wordt gedissipeerd in (bijvoorbeeld) een boomkruin.

Een balun corrigeert dit. Balun is een afkorting van "**Bal**anced to **un**balanced" of anders gezegd: van symmetrisch naar asymmetrisch. Vanuit de antenne gezien klopt dat: de antenne "ziet" een symmetrische aansluiting en de kabel een asymmetrische. Men spreekt ook wel van *balun transformers*. .

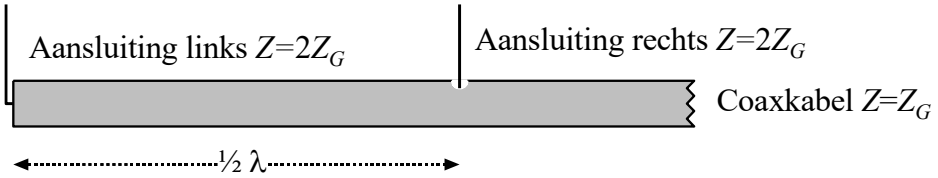
Om een symmetrische antenne met een impedantie van 200 Ω aan te sluiten op een coaxiale kabel met een karakteristieke impedantie van 50 Ω, kan een halvegolf stuk transmissielijn worden toegepast. Zoiets heet ook wel een halvegolf-*stub* (Figuur 14.2-18).



Figuur 14.2-18. Dipool 200 Ω met balun 1:4 voor aanpassing aan 50 Ω coax.

In de tekening zien we een coax-voedingsleiding van 50 Ω en een ½ λ stuk coax dat is aangegeven met "½ golf omloopstuk". De mantel op de uiteinden van het ½ golf stuk is doorverbonden met de mantel van de voedingslijn. De linkerhelft van de dipool is via de binnenader van het omloopstuk verbonden met de binnenader van de voedingskabel.

Omloopstuk en voedingslijn vormen samen eigenlijk één voedingslijn waarin op ½ golflengte vóór het eind een aftakking op de binnengeleider is gemaakt (Figuur 14.2-19).



Figuur 14.2-19. De balun van Figuur 14.2-18 meer schematisch getekend.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Tussen de twee dipoolaansluitingen zit een coaxstub van ½ λ. De aansluitpunten zitten vlakbij elkaar door de kleine afstand tussen de antenne-aansluitingen. Vandaar de bocht in Figuur 14.2-18. In het schematische plaatje van Figuur 14.2-19 staat die niet. Een halvegolfstuk veroorzaakt alleen een fase-omkering. Dat is nodig, want dipoolhelften moeten in tegenfase worden gevoed. Op de rechter aansluiting wordt aan de kabel de helft van de stroom onttrokken, want een halve golflengte verderop, waar de andere helft wordt onttrokken, is de impedantie dezelfde. De halve stroom betekent dubbele impedantie op het aftakpunt, want aan de fase en de grootte van de spanning verandert niets. Dus daar is $Z = 2Z_G$. Op de eindaansluiting zit de linkerhelft van de dipool aangesloten. De karakteristieke impedantie is dezelfde als het eerdere aftakpunt, want de stub is ½ λ lang. Ook hier loopt de halve stroom, dus opnieuw $Z = 2Z_G$. De 2 stuks impedantie van $2Z_G$ staan, van het ene aansluitpunt naar het andere gezien, in serie. Daarmee wordt de totale impedantie op de aansluiting $4Z_G$.

<u>Samengevat</u>: de twee voedingsstromen zijn even groot en in tegenfase. De karakteristieke impedantie van de kabel is met 4 vermenigvuldigd. De uitkomst is gelijk aan de karakteristieke impedantie van de antenne.

<u>Slotopmerking</u>: Bij het berekenen van de lengte van zulke coaxiale stubs moet worden uitgegaan van de verkortingsfactor. Bij veel coax ligt die rond de 0,66, maar niet bij alle typen. Vind in een voorkomend geval op de kabel het type en zoek de factor op via Internet.

14.2.10 Gewikkelde baluns

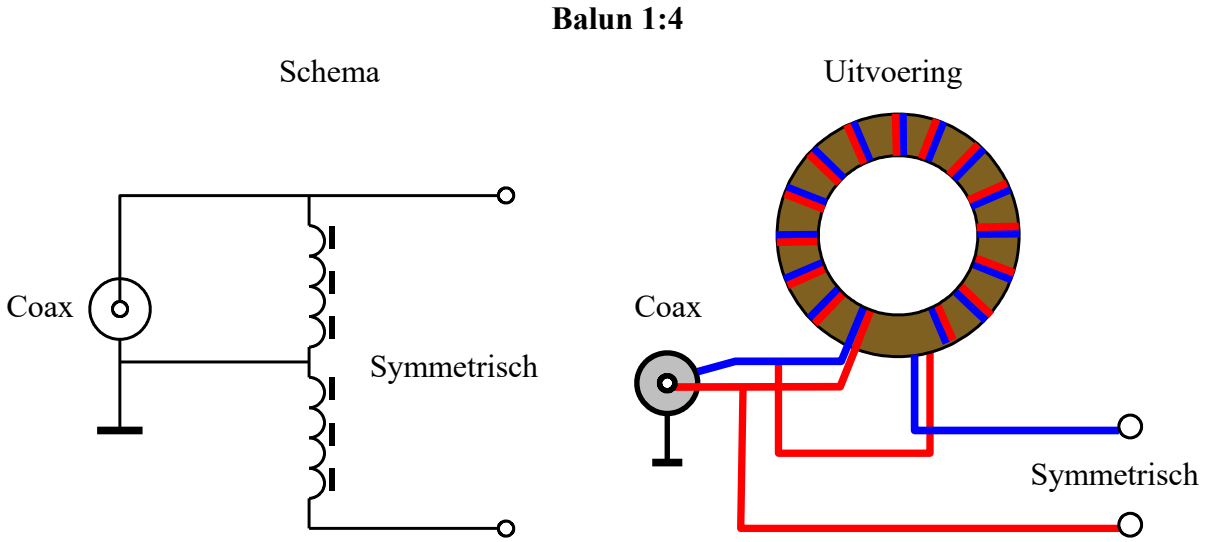
Baluns kunnen ook op een ringkern gewikkeld zijn. Dan zijn ze prettig compact zonder lange einden coax. Ringkernen (Foto 14.2-1) kunnen van verschillend magnetisch permeabel materiaal zijn gemaakt, zoals ferrieten, ijzercarbonyl of ijzerpoederkernen, een isolerend keramisch materiaal met fijne ijzerdeeltjes er in.

Foto 14.2-1. Voorbeelden van ringkernen. De kleur geeft het meest passende frequentiegebied aan. De grootte heeft te maken met het maximale vermogen dat de kern aan kan. Boven een bifilair bewikkelde kern (Figuur 14.2-20 en vervolgtekst erna).

Een ringkern is zelfafschermend. Het magnetisch veld blijft vrijwel helemaal opgesloten in de ring door de relatief hoge permeabiliteit ervan en doordat de ring rond is, waardoor

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

het magnetisch veld ononderbroken binnen het materiaal doorloopt. Figuur 14.2-20 toont een ringkernuitvoering van de balun in Figuur 14.2-18 en Figuur 14.2-19.

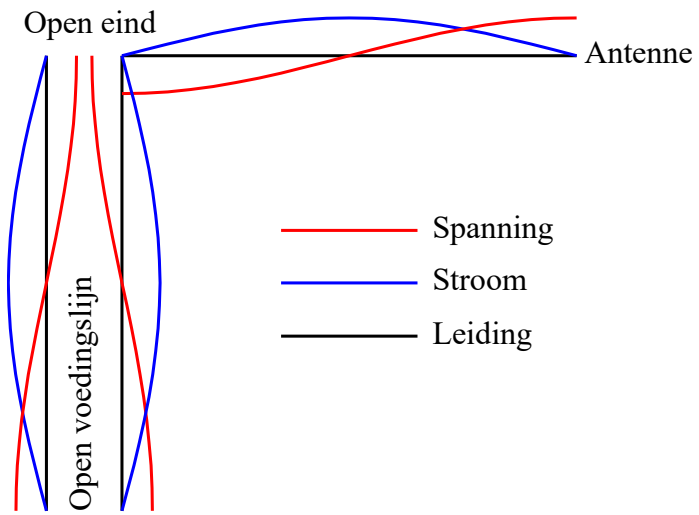


Figuur 14.2-20. Balun 1:4; de ringkernuitvoering van de balun in Figuur 14.2-18 en Figuur 14.2-19. Links het schema, rechts de prtaktische uitvoering met bifilair bewillelde ringkern

De manier van wikkelen in Figuur 14.2-20 is twee draden naast elkaar. Deze manier van wikkelen heet *bifilair*. Een 1:1 balun is trifilair gewikkeld. Dat is met drie draden.

14.2.11 De eindgevoede dipoolantenne (“Zeppelin antenne” of “Zepp”)

We hebben de dipoolantenne behandeld als in het midden gevoede antenne. Maar het aansluitpunt kan ook op het hoogohmige einde. De stroom is dan vrijwel 0 en praktisch alle vermogen zit in elektrische lading. Dan zijn daar de spanningen en dus ook de impedantie hoog. Figuur 14.2-21 geeft een schematische tekening van een eindgevoede antenne.

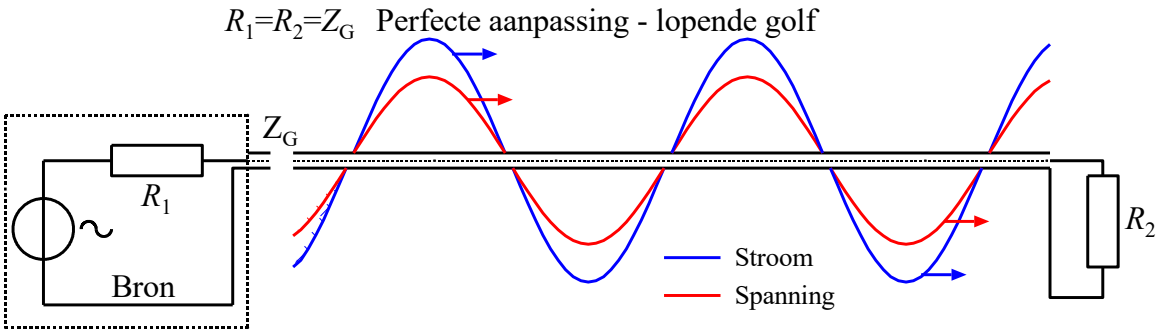


Figuur 14.2-21. Eindgevoede dipoolantenne (“Zeppelin” of “Zepp”).

Er zijn allerlei varianten van deze Zeppelin antenne, zoals een klein stukje dipool aan het linkereind van de voedingslijn dat in Figuur 14.2-21 doodloopt. Praktisch al die varianten zijn bedoeld om de extreem hoge spanningen op het voedingspunt te vermijden.

14.2.12 Staande-golf-verhouding ("Standing Wave Ratio", SWR)

Tot nu toe zijn we uitgegaan van een perfecte aanpassing van transmissielijn aan antenne. Figuur 14.2-22 geeft een plaatje. De golf in de voedingslijn is een lopende golf zoals in Figuur 14.2-5. Bronweerstand R_1 en belastingsweerstand R_2 zijn -gezien vanuit de transmissielijn- gelijk.



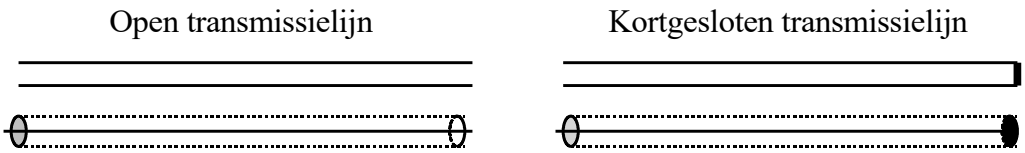
Figuur 14.2-22. Bron (links), met inwendige weerstand R_1, transmissielijn en belasting R_2. Alle weerstanden/impedanties zijn gelijk.

Stroom en spanning zijn in fase. In de figuur zijn ze niet even groot getekend. Reden: het zijn verschillende grootheden en twee lijnen op elkaar zie je niet afzonderlijk.

Bij het koppelen van voedingslijnen en antennes zijn karakteristieke impedanties in de praktijk zelden exact gelijk. We beginnen met twee extremen. Praktische situaties zitten altijd ergens tussen ideaal en extreem of tussen twee extremen. De extremen zijn de open en de kortgesloten transmissielijn. De eerste heeft aan het eind een oneindige impedantie; de tweede 0 ohm.

De open en de kortgesloten transmissielijn

De open lijn houdt abrupt op. De weerstand tussen beide geleiders is op het eindpunt theoretisch oneindig. De kortgesloten lijn eindigt even abrupt, maar op het eindpunt is de weerstand tussen beide geleiders 0 (Figuur 14.2-23).



Figuur 14.2-23. Open en kortgesloten transmissielijn. Boven: symmetrisch. Onder: asymmetrisch.

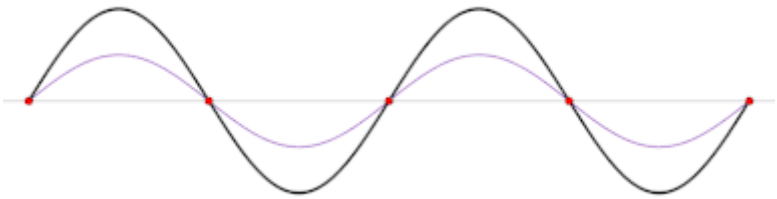
Een golf die de transmissielijn ingaat, komt in beide gevallen terug, doordat het vermogen in de golf aan het eind van de lijn nergens heen kan. In een antenne zou het vermogen deels worden uitgestraald, maar een goede transmissielijn straalt niet of nauwelijks..

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

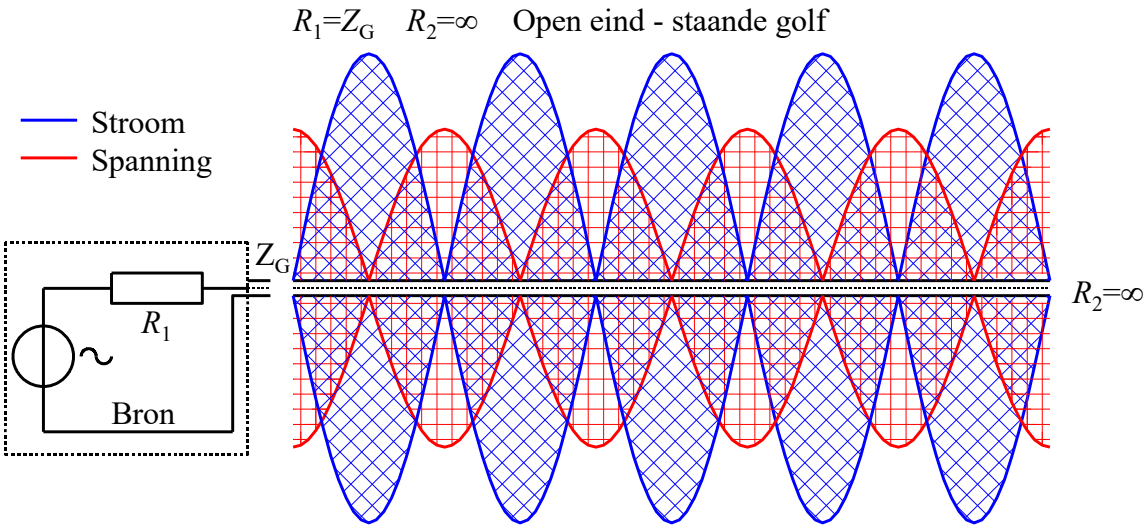
In de lijn met open einde hoopt zich op de uiteinden van beide geleiders tegengestelde lading op. De tegengestelde ladingen zetten zich na het maximum of minimum halverwege een halve periode om in tegengestelde stromen.

In de kortgesloten transmissielijn is het andersom. Daar is op de uiteinden de amplitude van de stroom maximaal en die van de spanning 0. Op de uiteinden blijft de amplitude van de stroom de grootste en die van de spanning de kleinste. Dat betekent dat we te maken hebben met staande golven. De golf wordt op de uiteinden weerkaatst.

De weerkaatste spanning is vergelijkbaar met een echo, zoals geluid tegen een muur weerkaatst. De stroomgolf gaat op het kortgesloten eind "de bocht om" en loopt via de tegenoverliggende leiding weer terug. Stroom èn spanning leveren heen en terug even grote golven. Dat geeft een staande golf. Figuur 14.2-24 toont een voorbeeld. Klik erop en je ziet de animatie.



Figuur 14.2-24. Staande golf met vaag op de achtergrond de twee samenstellende lopende golven die tegen elkaar in lopen (Staande golf - Wikipedia).



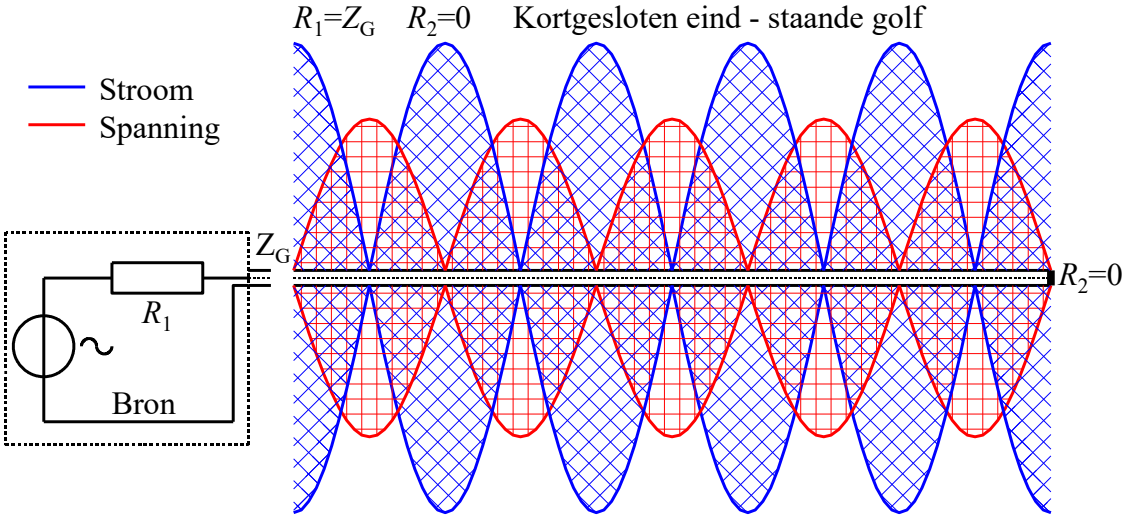
Figuur 14.2-25. Staande golven in een transmissielijn met open uiteinde. Op het uiteinde is de stroomgolf 0 en de spanningsgolf maximaal.

De maximale amplitude van de staande golf is de som van die van de lopende golven. De staande golven die ontstaan op het open uiteinde van de open lijn zijn stilstaand afgebeeld in Figuur 14.2-25. De arceringen zijn bedoeld om aan te geven dat de staande golf bij zijn

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

op en neer bewegen de hele ruimte binnen de sinusvormige krommen gebruikt. Kijk eventueel nog eens naar Figuur 14.2-24.

Het plaatje voor de kortgesloten transmissielijn (Figuur 14.2-26) lijkt op dat van Figuur 14.2-25, maar de spanning op het rechter uiteinde is nu 0. Daar is de stroom nu maximaal.



Figuur 14.2-26. Staande golven in een transmissielijn met kortgesloten uiteinde. Op het uiteinde is de spanningsgolf 0 en de stroomgolf maximaal.

Figuur 14.2-24 t/m Figuur 14.2-26 laten samengevat het volgende zien:

- De maximale amplitudes zijn het dubbele van de amplitudes van de lopende golven in Figuur 14.2-22.
- De tekeningen lijken een frequentieverdubbeling te zijn ten opzichte van Figuur 14.2-22. Dat is schijn. Twee opeenvolgende “bobbels” in de grafiek zijn rwee helften van één sinusgolf. Als een sinushelft in de één positief is, die in de volgende (en vorige) negatief. Dat is te zien in de animatie van Figuur 14.2-24.
- Bij de open transmissielijn (Figuur 14.2-25) is de spanningssinus op het open eind (rechts) maximaal.
- Bij de kortgesloten transmissielijn (Figuur 14.2-26) is de stroomsinus op het kortgesloten eind (rechts) maximaal.

De praktijk

Praktische situaties liggen ergens tussen Figuur 14.2-22 (ideale aanpassing) en Figuur 14.2-25 of Figuur 14.2-26 (open of gesloten transmissielijn) in. Dan is er tussen aansluitpunt en antenne gelijktijdig een lopende en een staande golf.

Het gereflecteerde deel hoort tot de staande golf. Het wordt kleiner naarmate de impedanties van de aansluitende delen (zender, transmissielijn, antenne) onderling minder verschillen en verdwijnt als ze gelijk zijn. De staande-golf-verhouding *s* (ook wel SGV of SWR van *Standing Wave Ratio* in het Engels) geeft de verhouding van som en

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

verschil van voorwaartse en gereflecteerde spanning of stroom. De uitkomst is voor stroom en spanning dezelfde. Als we spanning gebruiken is de voorwaartse spanning u_F (met de F van Forward) en de gereflecteerde spanning u_R (met de R van Reflected). De SWR-waarde s is gedefinieerd als

$$s = \frac{u_F + u_R}{u_F - u_R} \qquad (14.2\text{-}6)$$

Voor zowel Figuur 14.2-25 als Figuur 14.2-26 geldt $s = \infty$ (oneindig), want $u_F = u_R$.

Ook de verhouding 1:s, ("1 op s") wordt wel SWR genoemd. De waarde van s is ook gelijk aan de verhouding van de twee op elkaar aangesloten impedanties:

$$s = \frac{hoogste\ impedantie}{laagste\ impedantie} = \frac{Z_{max}}{Z_{min}} \qquad (14.2\text{-}7)$$

Een voorbeeld met getallen:

Een antenne met een impedantie van 100 ohm op het aansluitpunt wordt aangestuurd via een transmissielijn van 70 ohm. Dan is

$$s = \frac{100\ \Omega}{70\ \Omega} \approx 1{,}4$$

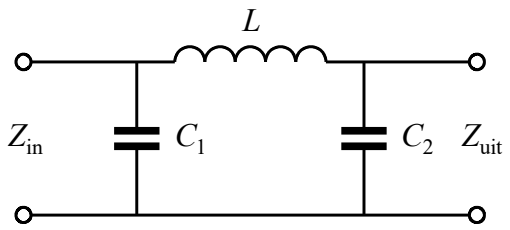
De omgekeerde verhouding van de impedanties, antenne 70 ohm en transmissielijn 100 ohm, geeft dezelfde uitkomst. De combinatie van zender, transmissielijn en antenne blijft het redelijk doen, zolang s kleiner is dan ongeveer 2.

14.2.13 Aanpassing van de zender aan transmissielijn en antenne

De impedantie van een zendereindtrap wordt aangepast aan die van de transmissielijn met een impedantietransformator. Aansluitingen van zenders zijn vrijwel altijd gebaseerd op coax met een karakteristieke impedantie van 50 ohm. We behandelen twee klassieke schakelingen: het pi-filter en het T-filter.

Het pi-filter

Figuur 14.2-27 geeft het schema van een pi-filter. De vorm is die van het afvlakfilter in wisselspanningsvoedingen en lijkt een beetje op de Griekse letter π (pi).



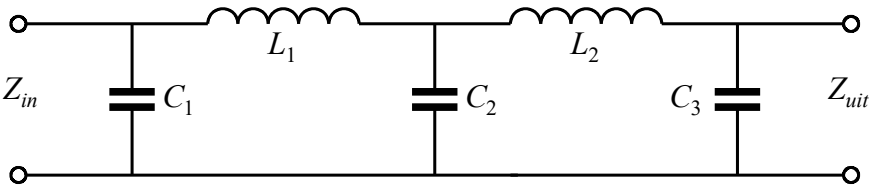
Figuur 14.2-27. Een pi-filter.

Het pi-filter is een laagdoorlaatfilter en onderdrukt ongewenste hogere frequenties, maar is vóór alles bedoeld als impedantietransformator. De impedantieverhouding tussen in- en

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

uitgang hangt vooral af van de verhouding C_1/C_2. De laagste impedantie zit in het algemeen aan de kant van de hoogste capaciteit.

De uitgangsimpedantie zal meestal maar 50 ohm zijn. Daardoor zal de kwaliteitsfactor Q niet heel hoog zijn en de bandbreedte omvat gemakkelijk een volledige amateurband. Verstemmen is dan niet aan de orde. Is de gewenste transformatie met één pi-filter slecht te realiseren, dan kunnen er ook meerdere achter elkaar worden gezet (Figuur 14.2-28).

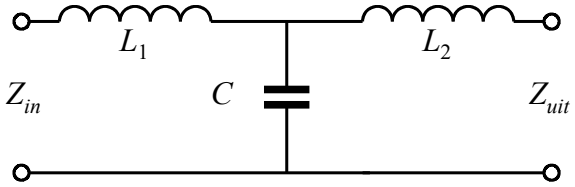


Figuur 14.2-28. Dubbel pi-filter. De middelste condensator C_2 is de som van de vereiste uitgangscapaciteit van het linker filter en de vereiste ingangscapaciteit van het rechter.

De spoelen kunnen verliesarm worden gehouden door ze op een ringkern te wikkelen. De condensatoren kunnen instelbare types zijn voor een eenmalige nauwkeurige afstemming.

Het T-filter

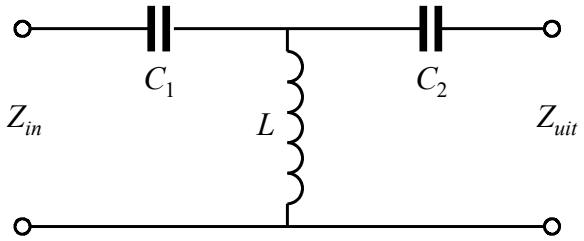
Figuur 14.2-29 geeft het schema van een T-filter met twee spoelen en één condensator.



Figuur 14.2-29. T-filter met twee spoelen en een condensator.

Ook dit is een laagdoorlaatfilter. De impedantieverhouding van in- en uitgang wordt vooral bepaald door de spoelen. De hoogste impedantie zit aan de kant van de hoogste L.

Spoelen en condensatoren kunnen worden verwisseld (Figuur 14.2-30). Dan ontstaat een hoogdoorlaatfilter dat wel impedanties transformeert, maar geen hogere frequenties onderdrukt.



Figuur 14.2-30. T-filter met twee condensatoren en één spoel.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

14.2.14 De antennetuner of Antenna Tuning Unit (ATU)

Een antennetuner dient voor een zo goed mogelijke aanpassing tussen zender en transmissielijn. Is die aanpassing vanzelf al goed genoeg, dan is een ATU ("tuner" in dagelijkse taal) niet nodig.

Een goede tuner moet op alle kortegolf-amateurbanden kunnen werken met zowel coax als symmetrische transmissielijn. Condensator(en) en spoel(en) zijn variabel. Variabele spoelen zijn schakelbaar of het zijn rolspoelen. Een rolspoel heeft een geleidend wieltje op de niet-geïsoleerde spoeldraad. Het wieltje zit aan een schuifcontact op een metalen as.

Een bekende vorm is het T-filter van Figuur 14.2-30. Foto 14.2-2 toont het binnenste van een zelfbouwtuner met schakelbare spoelaftakkingen (de rode draden).

Foto 14.2-2. Het binnenste van een antennetuner met geschakelde spoel. Rechts twee variabele condensatoren. Achter links: printje voor SWR-meter, midden achter: bifilair op ferriet ringkern gewikkelde balun voor aanpassing naar symmetrische lijn. Bouwer: wijlen Henny Schoeman, PA3AKQ.

Foto 14.2-3 toont het binnenste van een fabriekstuner met rolspoel (MFJ-962D).

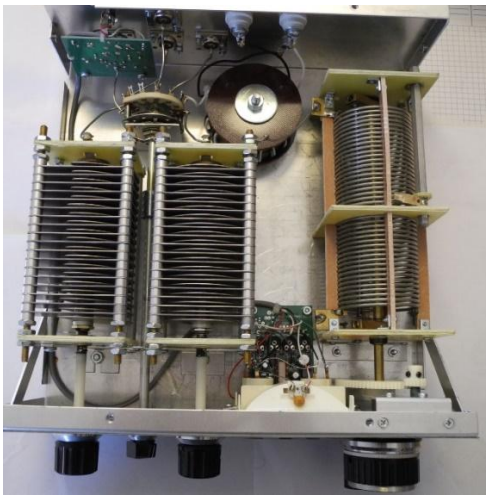
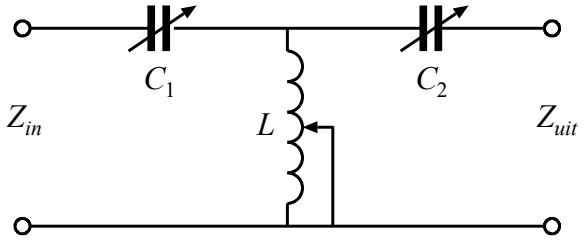


Foto 14.2-3. Het binnenste van een fabriekstuner met rolspoel (rechts). Het wieltje zit niet buitenop maar binnenin de spoel en is daardoor niet te zien De twee variabele condensatoren zitten links naast elkaar; het printje voor de SWR-meting linksachter en de aansturing van de (analoge) SWR- en vermogensmeters onder, rechts van het midden. De ronde balun voor aanpassing aan een symmetrische lijn zit middenachter.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Omdat het contactwieltje binnenin de rolspoel zit, is het op de foto niet zichtbaar. Het SWR-printje zit linksboven, de meters voor SWR en vermogen onder tegen de voorkant. Het eigenlijke tunerdeel in schemavorm zien we in Figuur 14.2-31. Het is een kopie van Figuur 14.2-30, maar nu met variabele *L* en *C*.

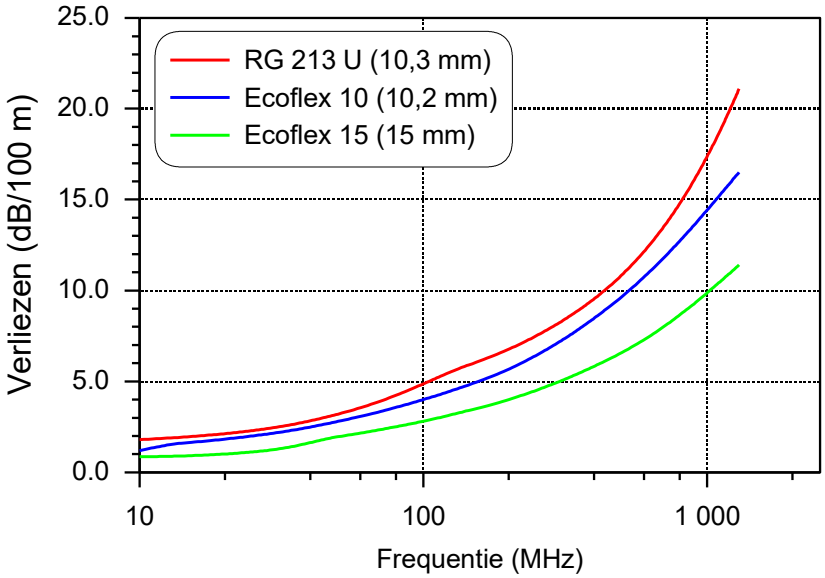


Figuur 14.2-31. Antennetuner op basis van een T-filter met 2 condensatoren en 1 variabele spoel.

Een tuner kan ook worden gemaakt op basis van een pi-filter of een T-filter met twee spoelen en één condensator op basis van Figuur 14.2-29. Die constructies onderdrukken wèl ongewenste harmonischen, maar de zelfinductie van de spoelen moet 2x zo groot zijn als die in Figuur 14.2-31. Er zijn nog heel veel meer mogelijkheden.

14.2.15 Leidingverliezen

Elke transmissielijn geeft verliezen. Ze dempen het signaal dat er doorheen gaat. Demping is frequentie-afhankelijk. Ze wordt per frequentie opgegeven, meestal in dB per 100 m. Is het verlies 10 dB/100 m, dan geeft 60 m van de lijn 6 dB verlies. Dan is het vermogen dat de zender erin stopt geslonken tot ¼ van de oorspronkelijke waarde. Uitzonderlijk is dat niet. Figuur 14.2-32 toont drie voorbeelden van onder amateurs gebruikelijke coaxkabel.



Figuur 14.2-32. Verliezen van drie soorten coaxkabel: de klassieke RG213/U met massieve kunststofisolatie (diëlektricum) en twee diameters Ecoflex, dat is een kunststof met fijne luchtblaasjes, een soort gestold schuim dus.

Uit de grafiek zijn enkele conclusies te trekken:

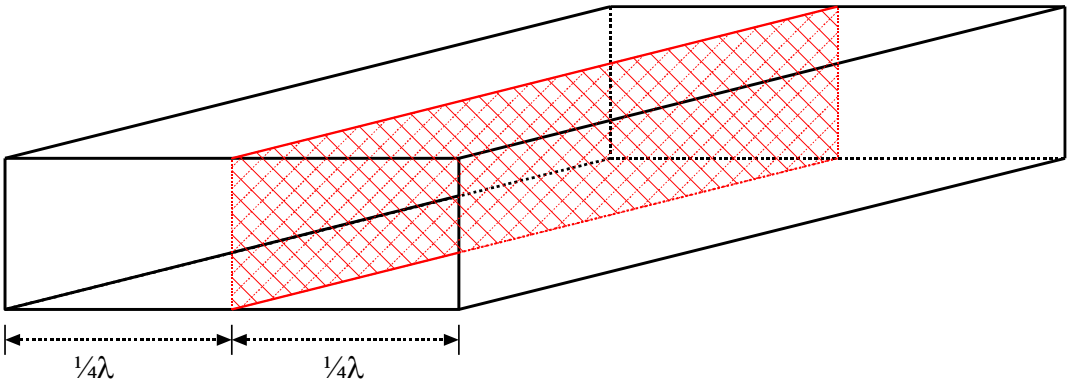
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

- Een massief diëlektricum (RG213) leidt tot grotere verliezen dan een diëlektricum met een relatief hoog gehalte aan lucht (Ecoflex)
- Hoe groter de diameter, des te kleiner de verliezen
- Hoe hoger de frequentie, des te groter de verliezen
- Bij frequenties boven ongeveer 1000 MHz (1 GHz) lopen de verliezen sterk op.

Door de oplopende verliezen in het GHz-gebied is een ander soort transmissielijn nodig dan coax of symmetrische lijn. Dat is de golfgeleider of golfpijp.

14.2.16 De golfgeleider

De golfgeleider of golfpijp wordt toegepast op frequenties van circa 3-30 GHz. Het is metalen buis, rond of rechthoekig, van binnen bekleed met koper, zilver of goud. We gaan uit van rechthoekige buis (Figuur 14.2-33), maar ronde golfpijp bestaat ook.



Figuur 14.2-33. Rechthoekige golfpijp, ½ golflengte breed.

Het doorzichtige rood gearceerde vlak in het midden is op te vatten als een symmetrische transmissielijn. Op afstanden van ¼ λ lopen de verticale zijkanten van de buis.

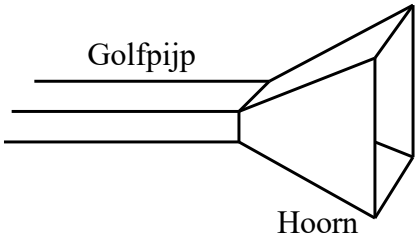
Een aan één kant kortgesloten ¼ λ open-lijn-stub heeft aan het open einde een zeer hoge impedantie. De linker- en rechterbuishelften zijn op te vatten als een parallelschakeling van een oneindig aantal van die stubs. De “transmissielijn” is zo aan alle kanten afgeschermd.

Dit type golfpijp is ook geschikt voor golflengten kleiner dan twee pijpbreedtes, niet voor grotere. Dat geldt ook voor ronde pijp met een diameter gelijk aan de breedte van de rechthoekige buis. Golfpijp is daarom ook een hoogdoorlaatfilter.

Een zendersignaal kun je in een golfpijp krijgen met bijvoorbeeld een coaxkabel waarvan de mantel aan de pijp is gesoldeerd en waarvan de binnenader met ¼ golflengte doorloopt in de golfpijp, maar er geen contact mee maakt.

Een bekend type antenne in combinatie met golfpijp is de hoornantenne (Figuur 14.2-34).

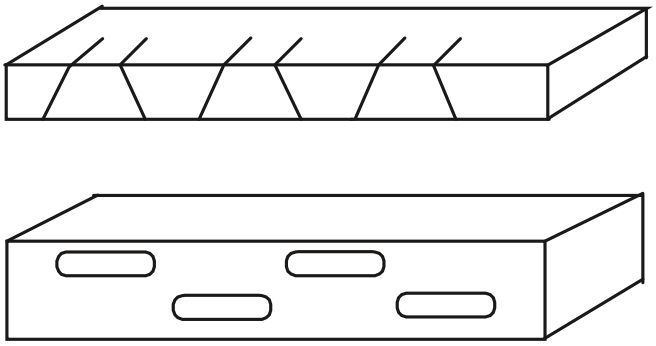
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.2-34 Hoornantenne aan golfpijp (Cursus 1999, aangepast).

In een golfpijp plant zich een elektromagnetisch veld voort. De hoorn fungeert door zijn vorm als impedantieovergang van golfpijp naar vrije ruimte. Hoe groter de hoorn, des te sterker is de bundeling van de uitgestraalde energie. Het EM-veld is vóór de hoorn veel sterker dan erachter. Dat heet versterking, maar eigenlijk is het bundeling.

De verliezen zijn bij golfpijp klein. Golfpijp met sleuven of spleten kan fungeren als antenne (Figuur 14.2-35).



Figuur 14.2-35. Sleufantennes (Cursus 1999).

14.3 Propagatie van elektromagnetische golven

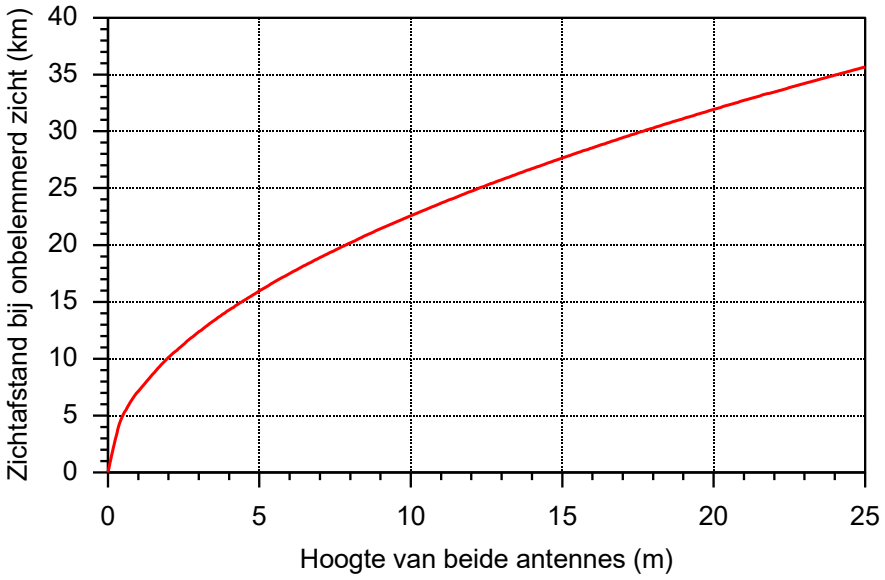
14.3.1 Polarisatierichting van EM-golven

De polarisatierichting van een EM-golf is de richting van het elektrische deel. Bij een dipool ligt het elektrische deel van het EM-veld tussen de uiteinden, dus evenwijdig aan de antenne. Een horizontale dipool geeft horizontale polarisatie, een verticale dipool polariseert verticaal. Op VHF/UHF is het raadzaam, de polarisatierichting bij zend- en ontvangantenne gelijk te hebben. Bij wereldwijd radioverkeer op de korte golf maakt het weinig uit door reflecties in de ionosfeer en de kromming van het aardoppervlak.

14.3.2 Zichtverbindingen

Een zichtverbinding is een verbinding langs een rechte lijn. Door de kromming van het aardoppervlak overbrugt een zichtverbinding een beperkte afstand. Hoe hoger de antennemast, des te groter is de overbrugbare afstand, net als de zichtafstand vanaf een uitkijktoren. Figuur 14.3-1 geeft het verband tussen hoogte en maximaal zichtbereik tussen twee even hoge antennes in volkomen vlak gebied.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.3-1. Lengte van een zichtverbinding als functie van de antennehoogte bij even hoge antennes.

Vuistregel 1: als je 10 m hoog staat, is de zichtafstand ongeveer 10 km. Hoogte n keer zo groot geeft een zichtafstand van ongeveer $\sqrt{n}$ keer zo ver.

Vuistregel 2: zichtafstand in km $\approx 4\sqrt{h}$, hoogte h in m.

Bij 2 even hoge antennes tel je de beide zichtafstanden op.

Bij controle met de grafiek blijkt vuistregel 1 een iets te kleine afstand te leveren. Vuistregel 2 leidt tot een iets te grote afstand. In werkelijkheid worden op de meeste amateurbanden veelvouden van die afstanden overbrugd. Bij radioverbindingen moet dus meer aan de hand zijn.

14.3.3 Directe golf, grondgolf of bodemgolf en ruimtegolf

Bij zichtverbinding spreken we van een *directe golf*. Daartoe worden ook de golven gerekend die in het onderste deel van de atmosfeer, de troposfeer, worden teruggebogen naar de aarde. Ze worden ook wel aangeduid met de term *troposferische golven*. Daarnaast kennen we de *grond- of bodemgolf* en de *ruimtegolf*.

De grondgolf, ook wel bodemgolf genoemd, volgt min of meer het aardoppervlak en wekt in de aarde stromen op. Dat leidt tot vermogensverlies. Bij verticale polarisatie zijn die aardstromen het kleinst en de verliezen dus ook. De grondgolf volgt vooral bij lage frequenties de kromming van het aardoppervlak. De verliezen maken hoge vermogens nodig om de golf op grote afstand waarneembaar te houden. Hoe lager de frequentie, hoe kleiner de verliezen en des te groter het bereik.

De *ruimtegolf* verdwijnt niet altijd in de ruimte. Vooral op de korte golf worden EM-golven in de hoogste laag van de atmosfeer, de *ionosfeer*, vaak teruggebogen naar de aarde. Dit waren de voor propagatie van EM-golven belangrijkste atmosfeerlagen. Op rij:

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

- **De troposfeer**. Het is de onderste laag, ongeveer 6 km dik in de poolgebieden en 16-18 km bij de evenaar. In Nederland is de dikte ongeveer 10 km.
- **De ionosfeer** is de hoogste en meest ijle laag. De onderkant ligt op een hoogte van circa 80 km. De zonnestraling (ultraviolet en Röntgenstraling) ioniseert de ijle lucht. Ionisatie is de omzetting van atomen en moleculen in elektrisch geladen deeltjes. In geïoniseerde ijle lucht worden radiogolven geabsorbeerd of afgebogen, vooral op de midden- en korte golf. Afbuiging maakt overbrugging van grote afstanden mogelijk. 's Nachts vermindert de ionisatiegraad.

Tussen deze twee lagen liggen de stratosfeer van ongeveer 40 km dik en daarboven de mesosfeer van gemiddeld ruim 30 km dik. Voor radioverkeer zijn ze van weinig belang. Tabel 14.3-1 geeft een indruk, welk soort golf bij welke frequenties belangrijk is. In werkelijkheid zijn de overgangen niet scherp. Amateurs maken bijvoorbeeld ook af en toe verbindingen met ruimtegolven tot in de 144-146 MHz-band (2 meter).

Tabel 14.3-1. Overzicht van frequentiebanden met golflengte, gebruik (niet volledig) en soort golf.

Band	Frequentie	Golflengte	Belangrijkste gebruiker(s)	Soort golf (overwegend)
VLF	Beneden 30 kHz	>10 000 m	Navigatie	Bodemgolf (grondgolf)
LF	30-300 kHz	10 000 – 1 000 m	Omroep	Bodemgolf (grondgolf)
MF	300-3000 kHz	1 000 – 100 m	Omroep, amateur	Bodemgolf (grondgolf)
HF	3-30 MHz	100 – 10 m	Omroep, amateur	Ruimtegolf
VHF	30-300 MHz	10 – 1 m	RTV, amateur	Directe golf, troposfeer
UHF	300 – 3000 MHz	1 m – 10 cm	RTV, amateur	Directe golf, troposfeer
SHF	3 – 30 GHz	10-1 cm	Radar, satelliet amateur	Directe golf
EHF	30 – 300 GHz	1 cm – 1 mm	Satelliet	Directe golf

14.3.4 Propagatie van VHF- en UHF-golven

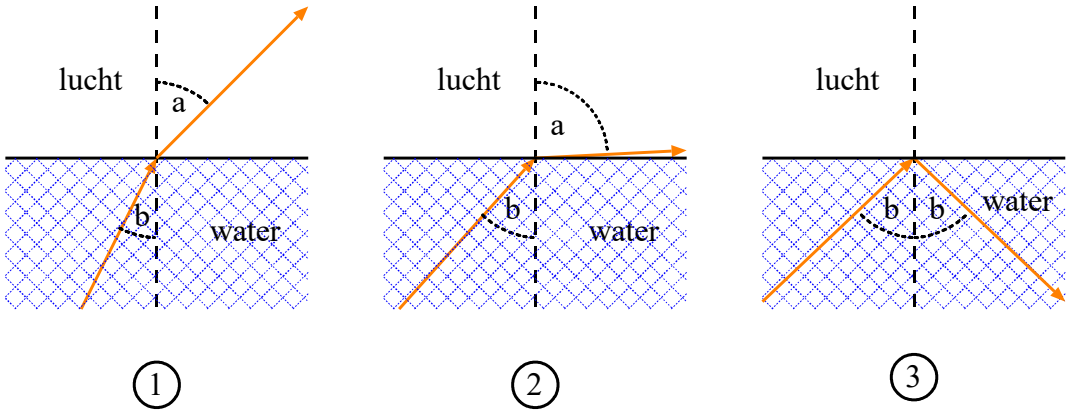
Troposfeer

Voor de propagatie van VHF- en UHF-golven is vooral de troposfeer van belang, Voor VHF kan ook de ionosfeer een rol spelen. Dat bespreken we in deze sub-paragraaf.

Een optisch opstapje

De propagatie van VHF en UHF in de troposfeer lijkt wat op het gedrag van licht. Vandaar dit zijstapje naar de optiek. Het is geen examenstof, maar helpt om het gedrag van VHF en UHF in de troposfeer te begrijpen. We beginnen met Figuur 14.3-2. Daarin is een lichtstraal onder water onder verschillende hoeken naar het wateroppervlak gericht.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.3-2. Gedrag van een lichtstraal die onder verschillende hoeken een wateroppervlak bereikt. De streepjeslijn staat loodrecht op het wateroppervlak.

In plaatje 1 zien we hoe de lichtstraal aan het oppervlak wordt gebroken. Het onderwaterdeel maakt een hoek *b* met de verticale streepjeslijn, het bovenwaterdeel een hoek *a*. De verhouding $^{\sin a}/_{\sin b}$ is gelijk aan de verhouding van de snelheden van licht in lucht en in water. De verhouding van de sinussen ligt dus vast. We vergroten nu hoek *b*, waardoor ook de hoek *a* zich vergroot (plaatje 2). Nu is de vraag, wat er gebeurt als hoek *a* groter dan 90 graden zou moeten worden. Dat laat plaatje 3 zien. Het wateroppervlak gedraagt zich dan als een spiegel. De lichtstraal wordt onder dezelfde hoek als waarmee die het wateroppervlak raakt, weer het water in gereflecteerd volgens de spiegelwet "hoek van inval = hoek van terugkaatsing".

Warme en koude lucht; temperatuurinversies

Ook in de troposfeer is de voortplantingssnelheid van licht en andere EM-golven niet in alle luchtsoorten dezelfde.

De voortplantingssnelheid van EM-golven in lucht is iets kleiner dan in het luchtledige (vacuüm). Hoe ijler de lucht, des te meer benadert de lichtsnelheid die in vacuüm. Omdat de luchtdruk vanaf het aardoppervlak naar boven afneemt of -anders gezegd- lucht naar boven toe ijler wordt, worden ook EM-golven iets naar beneden afgebogen. Meestal is de kromming van het aardoppervlak te sterk om ze naar het aardoppervlak te laten terugkeren en zo verre verbindingen mogelijk te maken.

Warme lucht is bij gelijke luchtdruk iets ijler dan koude. Normaal gesproken neemt in de troposfeer de luchttemperatuur van beneden naar boven af met gemiddeld ongeveer 0,6 graden per 100 m Maar soms ligt er een laag warme lucht boven een koudere. Dat heet een *temperatuurinversie* of kortweg *inversie.* Inversie betekent omkering. Bij een inversie kan het verschil in snelheid van EM-golven in de twee luchtlagen net genoeg zijn om een EM-golf wèl terug te buigen naar de aarde. Dan ontstaat een verschijnsel dat enigszins te vergelijken is met dat van water en lucht in plaatje 3 van Figuur 14.3-2. Radiogolven worden dan teruggekaatst of teruggebogen naar de aarde. Dan kunnen op VHF en UHF afstanden van vele honderden km worden overbrugd.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

EM-golven die een inversie onder een vrij grote hoek treffen, gaan er doorheen, net als de lichtstraal door het wateroppervlak in plaatjes 1 en 2 van Figuur 14.3-2. Loopt de EM-golf bijna evenwijdig aan de inversie, dan kan het gedrag van plaatje 3 in Figuur 14.3-2 ontstaan. Omdat een inversie niet overal op precies dezelfde hoogte zit en golvingen kan hebben, kan een via deze weg ontvangen signaal in sterkte variëren.

Een *duct* is ingewikkelder. Dan vindt in de troposfeer een aantal reflecties plaats tussen luchtlagen of meer reflecties langs een inversie. Dat kan leiden tot verbindingen over vele honderden tot meer dan 1000 km.

Ook kan verstrooiing van radiogolven optreden. Dat heet *scatter*. Het verstrooide deel van de EM-golven is vooral in hogere lagen van de troposfeer klein en de verliezen groot. Bij hoge zendvermogens is er soms een en ander aan leuke verbindingen “te halen”.

Meteor scatter

Een bijzondere methode van propagatie is zogenoemde *meteor scatter*. Als de aarde de baan van een meteorenzwerm kruist, komen meteoren in de dampkring terecht. Ze laten dan een geïoniseerd (14.3.5) spoor achter dat gedurende korte tijd (enkele seconden is al vrij lang) radiogolven weerkaatst. Daardoor kunnen -met veel herhaling van weinig informatie- op VHF en UHF verbindingen worden gemaakt. De zwermen en hun baan om de zon zijn bekend en hun optreden is vrij nauwkeurig te voorspellen. Verbindingen worden veelal gemaakt in snelle CW of digitale modes, vanwege de korte duur van de “bursts”. Geïnteresseerden kunnen -helaas in het Engels- informatie vinden op de site van de ARRL, de Amerikaanse radioamateurvereniging.

Moonbounce, EME

Een nogal exotische manier om op VHF en UHF verre verbindingen te maken is via reflectie tegen de maan. Dat heet *moonbounce* of *EME*, afkorting van *Earth-Moon-Earth*. De maan staat op circa 380 000 km afstand. Dan is de halve aardbol te bestrijken. Dat gaat niet met een standaard amateurzender en dito antenne. De maan is ver weg en geen goede reflector. Je hebt een antenne nodig die het uitgezonden signaal scherp bundelt (waarover verderop meer) en een flink zendvermogen. Om zo min mogelijk last van ruis te hebben, gaan de verbindingen doorgaans in CW. Engelstalige informatie vind je bijvoorbeeld hier.

14.3.5 Propagatie via de ionosfeer

Eigenschappen, ionisatie

De ionosfeer is ijl. De dichtheid neemt van boven naar beneden toe, maar op de grens met de mesosfeer is deze nog steeds maar een fractie van die aan het aardoppervlak.

De zonnestraling bevat er veel straling van hoge energie zoals (ver) ultraviolet en Röntgenstraling. Er zijn vrije elektronen die door de hoge energie van hun atomen zijn afgesplitst. Een atoom of molecuul met een elektron te weinig is positief geladen. Dat heet een *positief ion*. Ionen worden weer gewone deeltjes als ze een vrij elektron oppikken. Dat laatste heet *recombinatie*. Ionen beïnvloeden de richting van EM-straling.

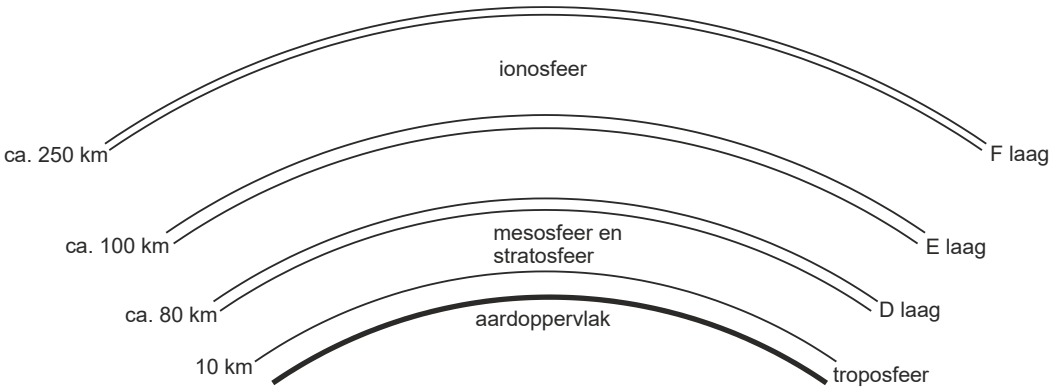
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Hoe minder hoog, des te minder ijl de lucht en des te groter de concentratie aan ionen en losse elektronen. Daarmee gaat recombinatie van boven naar beneden ook steeds sneller, tot er in de mesosfeer nauwelijks nog ionisatie optreedt.

Er worden drie geïoniseerde lagen onderscheiden:

- De D-laag, 70-80 km boven het aardoppervlak, aan de onderkant van de ionosfeer;
- De E-laag (Kennelly-Heaviside-laag), ongeveer 110 km boven het aardoppervlak;
- De F-laag (Appleton-laag), 250-280 km boven het aardoppervlak,

Figuur 14.3-3 brengt ze schematisch in beeld.



Figuur 14.3-3. De geïoniseerde lagen in de ionosfeer (niet op schaal; cursus 1999).

Van de D- en de E-laag wordt de ionisatie bepaald door de aan- of afwezigheid van zonnestraling. 's Nachts recombineren ionen en elektronen grotendeels. Ook de F-laag dankt zijn ionisatie aan de zon. Op deze hoogte is de recombinatie door de ijle lucht traag en blijft de F-laag 's nachts bestaan. Overdag splitst de laag zich in de F1- en de F2-laag.

Ionosferische lagen en de voortplanting van EM-golven

Geïoniseerde lucht beïnvloedt de voortplanting van EM-golven van MF tot VHF, maar op verschillende wijze. Het gaat om reflectie en absorptie.

De D-laag absorbeert overdag ruimtegolven tot boven 2 MHz. Alleen de grondgolf blijft dan over. Na zonsondergang lost de D-laag op, bereiken de golven de F-laag en worden alsnog gereflecteerd. De 160 m-amateurband (in NL: 1810-1880 kHz) is daardoor vooral een nachtband. De reflectie van EM-golven in de ionosfeer hangt af van factoren als

- Frequentie
- De elektronenconcentratie in de ionosfeerlaag
- De hoek waaronder de golf de laag treft.

Dat laatste kennen we van de tekst over de troposfeer, maar natuurkundig gezien gaat het in de ionosfeer om een ander proces.

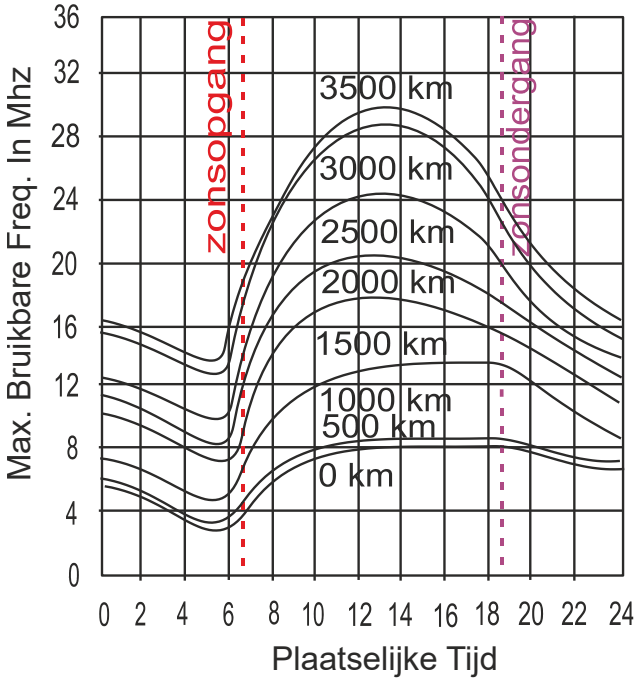
Kritische frequentie en maximaal bruikbare frequentie (MUF)

Bij het gedrag van een ionosferische laag horen twee belangrijke grootheden. Dat zijn:

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

- De **kritische frequentie**. Dat is de hoogste frequentie waarbij een verticaal uitgezonden golf nog wordt gereflecteerd.
- De **maximaal bruikbare frequentie** (***MUF***, afkorting van *Maximum Usable Frequency*). Dat is de hoogste frequentie waarbij de EM-golven bij vlakke instraling nog net worden gereflecteerd naar het aardoppervlak.

De frequenties hangen grotendeels af van de zonnestand, dat wil zeggen de tijd van de dag en het seizoen. Figuur 14.3-4 geeft een idee hoe de MUF over de dag kan veranderen.



Figuur 14.3-4. De reflecterende eigenschappen van de ionosfeer veranderen gedurende de dag (cursus 1999).

Van groot belang hierbij is de zonneactiviteit. Die beïnvloedt onder meer de hoeveelheid ioniserende straling. De zonneactiviteit varieert in een ongeveer 11-jarige cyclus. De activiteit is ongeveer af te lezen aan het aantal zonnevlekken, vandaar de naam *zonnevlekkencyclus*. Hoe meer vlekken, hoe actiever de zon en des te hoger de ionisatiegraad in de ionosfeer en des te groter de kans op verre radioverbindingen op HF.

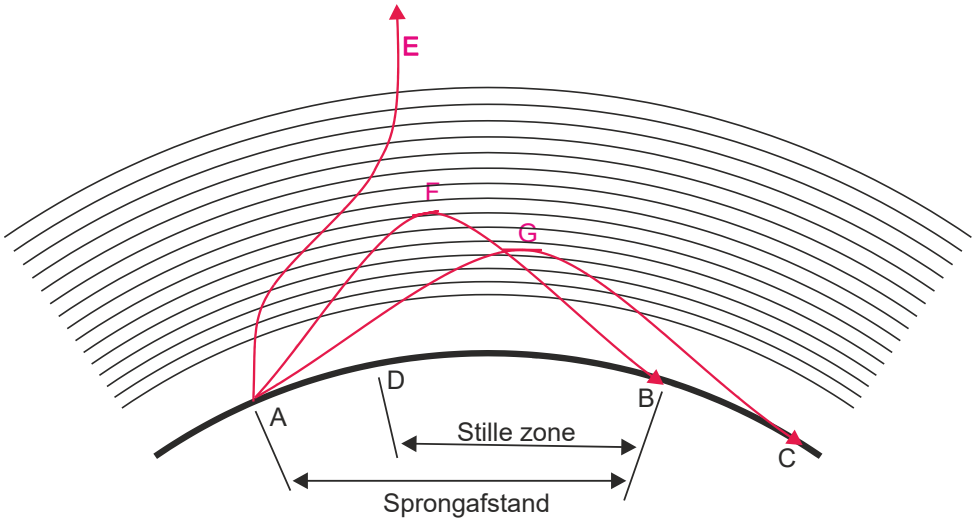
In de zomer staat de zon veel hoger boven de horizon dan in de winter en levert veel meer vermogen per m² dan 's winters. Dat beïnvloedt de E-laag. In het zomerhalfjaar zijn vooral overdag soms verbindingen van enkele duizenden km mogelijk op de hogere HF-frequenties en minder vaak ook op VHF. Deze *sporadische E-reflecties* zijn niet te voorspellen. Zijn ze er, dan bijna altijd overdag. Een sterk geïoniseerde E-laag kan verbindingen via de F-laag blokkeren door reflectie vóór EM-golven de F-laag bereiken.

Sprongafstand (skip distance) en stille zone (dead zone)

Uit de definities van kritische frequentie en MUF volgt dat er op aarde een zone is, waar tussenliggende frequenties als het ware overheen springen. Is de stralingshoek te steil, dan

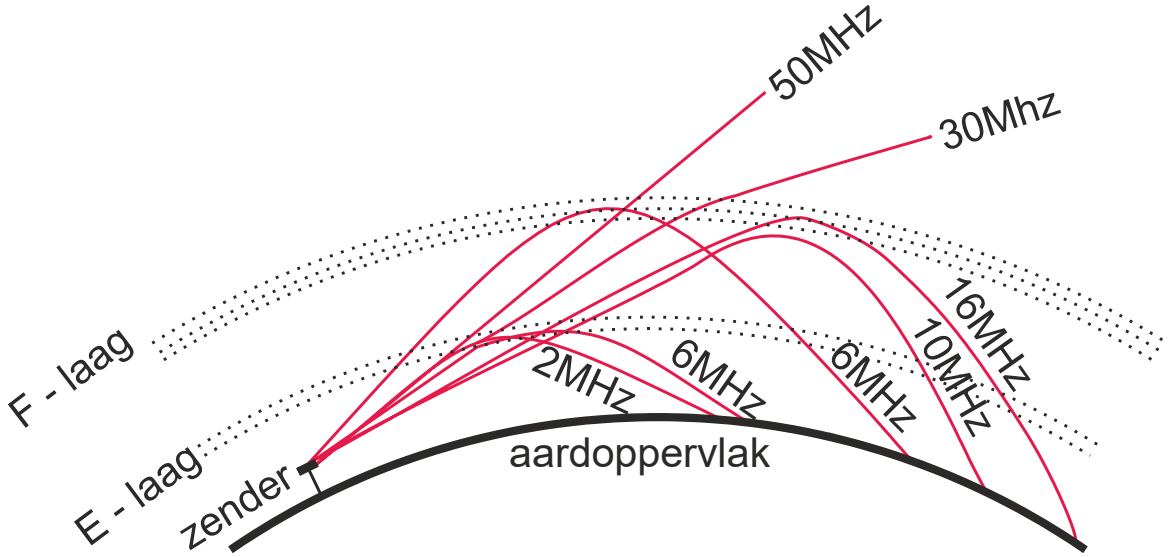
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

worden EM-golven wel afgebogen, maar te weinig om naar de aarde terug te keren. Is de hoek vlakker, dan worden ze wel gereflecteerd. Figuur 14.3-5 geeft een plaatje.



Figuur 14.3-5. Effect van de opstralingshoek op de propagatie, sprongafstand (skip distance) en stille zone (dead zone). (cursus 1999, aangepast)

Vanaf punt A wordt een EM-golf uitgezonden. Het steilste deel (lijn AE) verdwijnt in de ruimte. De minder steil opgestraalde golf langs de route AFB wordt gereflecteerd. Het gebied tussen A en B ontvangt via de ruimtegolf niets. Als de grondgolf van A tot D reikt, stopt de ontvangst voorbij D. De *stille zone* waarin het station op punt A niet te ontvangen is, loopt dan van D tot B. In het Engels heet die zone de *dead zone*. De afstand AB heet *sprongafstand*, in het Engels *skip distance*. AGC heeft de kleinste opstralingshoek van de drie. Het reflectiepunt is lager. De sprongafstand is groter. Figuur 14.3-6 toont mogelijke verbanden tussen sprongafstand, opstralingshoek en frequentie.



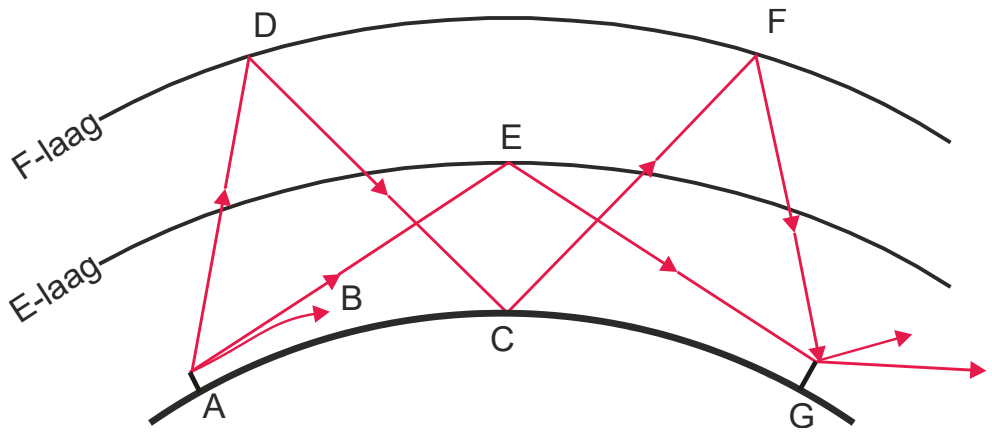
Figuur 14.3-6. Voorbeeld van het verband tussen frequentie en sprongafstand of skip distance. (Opnieuw getekend naar cursus 1999).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Frequenties van 30 MHz en hoger worden in dit voorbeeld niet gereflecteerd. Lagere frequenties worden gereflecteerd in de ionosfeer; 10 en 16 MHz via de F-laag. Een vlak opgestraalde 6 MHz wordt al in de E-laag teruggebogen, de steilere wordt pas afgebogen in de veel hogere F-laag. De 2 MHz ontmoet alleen de E-laag en heeft een bijna even grote sprongafstand als de vlak opgestraalde 6 MHz. Sprongafstanden verschillen per frequentie en per situatie.

Fading

De ontvangen signaalsterkte van stations op de korte golf kan snel en sterk wisselen. Dat heet *fading*. Fading is meestal een gevolg van wisselingen in de ionisatietoestand en/of verandering van hoogte van ionosferische lagen. Figuur 14.3-7 laat zien hoe fading op verschillende manieren kan ontstaan.



Figuur 14.3-7. Het ontstaan van fading.

De zender in A zendt onder verschillende verticale hoeken EM-golven uit. Meer hierover komt nog (sub-paragraaf 14.4.8).

Golf ABC is een oppervlaktegolf. Golf AEG is een ruimtegolf die wordt weerkaatst door de E-laag. Een steiler uitgezonden ruimtegolf wordt in D weerkaatst door de F-laag en in C ontvangen. Ook wordt deze ruimtegolf gereflecteerd door het aardoppervlak, bereikt de F-laag weer in punt F en wordt daar opnieuw weerkaatst en ontvangen in G. Dat is een dubbele reflectie (Engels: *two-hop transmission*). Bij meer van die reflecties, heet dat *multi-hop transmission*.

De in C ontvangen golf is de som van twee golven: de grondgolf via B en de weerkaatste ruimtegolf via D. Door verschil in afgelegde afstanden kunnen ze in fase, in tegenfase of iets daartussenin zijn. Zijn ze in fase, dan geven ze samen een sterk signaal. Bij tegenfase is het ontvangen signaal zwak. De reflectiehoogte is niet constant, het faseverschil dus ook niet. Bij een reflectiehoogte van circa 250 km en een golflengte van 20 meter leiden minimale hoogteveranderingen tot grote faseverschuivingen en daarmee samenhangende verschillen in sterkte van een ontvangen signaal.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Niet alleen grondgolf en weerkaatste ruimtegolf kunnen samenkomen. Dat kan ook met twee weerkaatste ruimtegolven. Het steilere deel van de afstraling in punt A gaat via de F-laag. Het minder steile deel via de E-laag. Als ze beide in punt G samenkomen, ontstaat ook fading. Opnieuw is de oorzaak veranderend faseverschil.

Tenslotte kennen we *selectieve fading*. Die ontstaat als de fading over de bandbreedte van een signaal verschilt. Bij DSB en AM leidt dat tot onbalans tussen twee zijbanden en daarmee samenhangende vervorming.

14.4 Antennevariaties

14.4.1 De isotrope straler, een theoretische maat voor antenne"versterking"

Iets heet i*sotroop* als het in alle richtingen dezelfde eigenschappen heeft. Een bol is isotroop. Het tegendeel van *isotroop* is *anisotroop*. Geen enkele "echte" antenne straalt naar alle kanten evenveel vermogen uit en is dus minstens een beetje anisotroop.

Een isotrope straler verdeelt het uitgestraalde vermogen exact gelijk over alle richtingen. Hij wordt gebruikt als theoretische maatstaf voor de "versterking" van een antenne.

Een antenne bundelt uitgestraalde energie in bepaalde mate. De "versterking", ook wel *gain* genoemd, is de verhouding tussen het uitgestraald vermogen van de antenne in de richting waarin dit het sterkst is en dat van een isotrope straler. De verhouding wordt uitgedrukt in dBi, met de "i" van isotroop.

Een in de vrije ruimte geplaatste dipool heeft een gain van 2,15 dBi. Dat wil zeggen dat het loodrecht op de antenne uitgestraalde vermogen 2,15 dB groter is dan het rondom uitgestraalde vermogen van een isotrope straler bij gelijk aangeleverd vermogen.

14.4.2 Afstand en verzwakking

Hoe groter de afstand tot de zendende antenne is, des te zwakker wordt het door de antenne uitgestraalde EM-veld. De sterkte wordt uitgedrukt als *vermogensdichtheid*. Dat is het vermogen per oppervlakte loodrecht op de stralingsrichting. De eenheid van vermogensdichtheid is daarom W/m^2. **De vermogensdichtheid is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de zendende antenne.** In getallen: afstand 2x zo groot, vermogensdichtheid 4x zo klein.

14.4.3 Verticale antennes (groundplane)

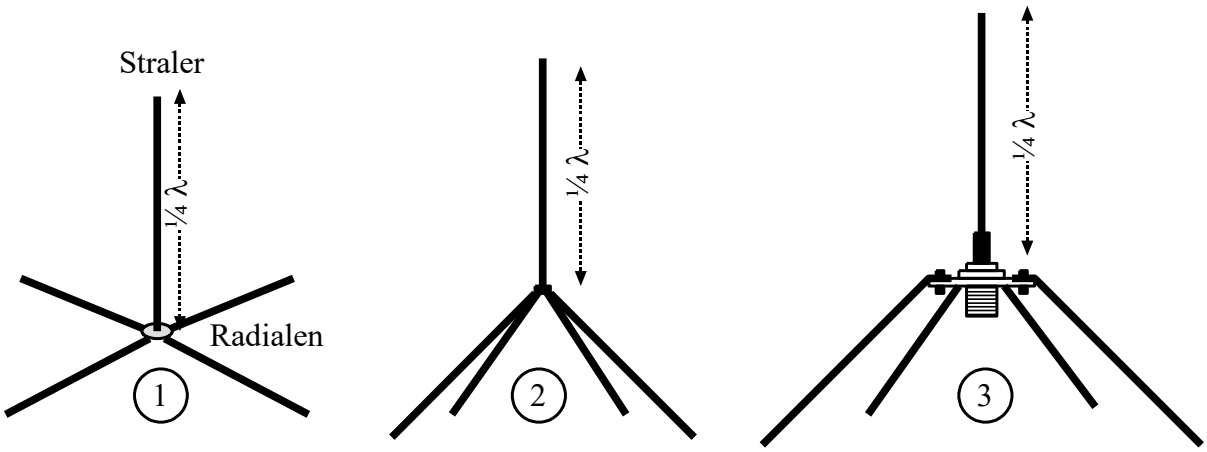
Zet een dipool op zijn kant en klaar is Kees, zou je kunnen denken. Die gedachte klopt niet helemaal. Meestal zal een verticale dipool evenwijdig zijn aan de metalen mast waarin hij is gemonteerd. Dat geeft ongewenste beïnvloeding, verliezen en verstemming. De onderste antennepunt staat dichter bij de aarde dan de bovenste. Dat gaat ten koste van de symmetrie. Dat effect is kleiner naarmate de antenne, gemeten in golflengten, hoger staat.

Meestal is een verticale antenne een kwart golf lang en geen halve golf. Een "ideale" aarde spiegelt het andere kwart erbij. De echte aarde is geen heel goede geleider. Die geleider

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

moet worden gemaakt. Een aantal draden van ¼λ lang (of iets langer) straalsgewijs vanuit de onderkant van de ¼λ -antenne volstaat. Die noemen we meestal *radialen*.

Als de radialen een hoek van 90 graden maken met de straler, is de impedantie op het voedingspunt tussen radialen en straler ruim 30 ohm. Bij 135 graden is die 50 ohm. Dan past de antenne perfect aan op 50 ohms coax. Figuur 14.4-1 laat beide zien met rechts nog één met coax-aansluiting. De binnenader is verbonden met de straler; de mantel met de radialen. De antenne is asymmetrisch, dus balunvrij en wordt *groundplane* genoemd.

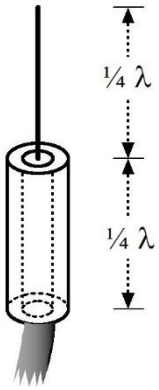


Figuur 14.4-1. Groundplane antenne. 1) met horizontale radialen; 2) met radialen onder een hoek van 135°met de straler; 3) uitvoering met coax-aansluiting.

De afstraling van de groundplane is bijna horizontaal. Dat kan een voordeel zijn met het oog op ionosferische propagatie.

Het elektrische deel van het EM-veld staat verticaal. Daarom is de straling van een groundplane verticaal gepolariseerd, De antenne is rondom gevoelig. Hij wordt meestal voor VHF en UHF gebruikt. Voor HF wordt de antenne al gauw erg hoog (een kwart golf op 80 m is 20 m!)

Een variant op de groundplane is de *sleeve-antenne*. *Sleeve* betekent *mouw*. Kijk naar de afbeelding van Figuur 14.4-2 en de term zal waarschijnlijk meteen duidelijk zijn.



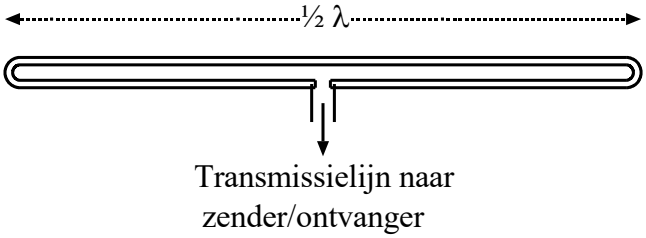
Figuur 14.4-2. Sleeve-antenne

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

De radialen zijn vervangen door een ¼λ lange metalen bus rondom de coaxiale voedingskabel omlaag vanaf het voedingspunt. De impedantie op het voedingspunt is bij dit soort antennes ongeveer 75 ohm. De binnenader van de coax is verbonden met de antenne, de mantel met de sleeve.

14.4.4 De gevouwen dipool

De gevouwen dipool is een hele golflengte lang en in tweeën gevouwen, zodat het geheel maar ½λ lang is (Figuur 14.4-3).



Figuur 14.4-3. Gevouwen dipool.

De twee bochten liggen een kwart golflengte van het aansluitpunt. Bij een halve-golf-dipool zouden hier de hoogohmige uiteinden liggen. Ook in dit geval is de impedantie op de bochten hoog om weer heel laag te worden in het midden van de bovenste helft van de dipool. De ingangsimpedantie is 4x zo hoog als de 73 ohm van de enkelvoudige dipool; dat is dus een kleine 300 ohm. De oorzaak is dat nu niet één, maar twee in serie geplaatste kwartgolf stralers de EM-golf uitzenden. Vergeleken met de halvegolf-dipool komt dat neer op de halve stroom bij dubbele spanning op de aansluiting = viervoudige impedantie.

14.4.5 Antennes met parasitaire elementen

Parasitaire elementen worden aan antennes toegevoegd om het uitgezonden vermogen te bundelen en zoveel mogelijk één richting op te sturen. Daarmee wordt meer vermogen in de gewenste richting uitgezonden, anders gezegd: gebundeld. Bij ontvangst is de antenne voor signalen uit diezelfde richting gevoeliger. De bundeling werkt dus twee kanten op.

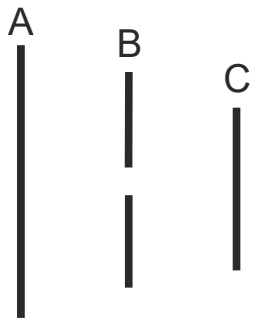
We beginnen met een dipool zoals die in subparagraaf 14.2.2. Wordt vlak bij een dipool een geleider (draad of staaf) geplaatst, dan ontvangt die de EM-golf van de antenne en straalt hem ook weer uit. Het faseverschil tussen ontvangen en (her)uitgezonden signaal hangt af van de lengte van de geleider. Is de geleider (iets) langer dan een halve golflengte, dan gedraagt hij zich inductief en zendt de golf iets vertraagd weer uit. Is hij korter dan een halve golflengte, dan werkt de geleider capacitief en zendt de golf versneld (en verzwakt) uit. Zo'n geleider heet een *parasitair element*.

Een inductief element kan als reflector werken. Het wordt op een afstand van 0,15 tot 0,25 λ evenwijdig aan de straler geplaatst. De afstand hangt af van de lengteverhouding van straler en reflector. De reflector straalt de ontvangen golf weer uit, maar met vertraging en met een zodanig faseverschil dat de van de straler afkomstige golf achter de reflector zoveel mogelijk wordt verzwakt. De gereflecteerde golf is, aangekomen bij de

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

straler, door de afgelegde afstand in fase met de golf uit de straler en versterkt deze. Daardoor straalt de antenne naar één kant veel meer vermogen uit dan naar de andere. De richting met de versterkte uitstraling heet ***voor*** en die met de verzwakte uitstraling ***achter***.

Een capacitief (korter) element werkt andersom. Het heet *director* en wordt vóór de straler geplaatst. Daarmee wordt de voorwaartse golf beter gebundeld. Antennes hebben vaak meer dan één director, soms meer dan 10. Figuur 14.4-4 laat de opbouw van een antenne met drie elementen zien Van groot naar klein zijn dat respectievelijk de reflector (A), de straler (B) en een director (C). De straler B is in tweeën gedeeld voor de kabelaansluiting. Dit soort antenne heet naar één van zijn uitvinders Yagi-antenne.



Figuur 14.4-4. Halvegolf-straler (B) met links een reflector (A) en rechts een director (C) (cursus 1999)

De straler mag een gevouwen dipool zijn. De impedantie op de aansluiting is dan 4x die van een enkele dipool.

Voor/achterverhouding

Omdat een yagi vooral naar voren straalt, is de eigenschap *voor/achterverhouding* van belang. Dat is de verhouding van het naar voren en het naar achteren uitgestraalde vermogen. Deze verhouding wordt uitgedrukt in dB. Een voor/achterverhouding van 12 dB betekent dat naar voren 16x zoveel vermogen wordt uitgestraald als naar achteren. Het betekent ook dat de antenne bij ontvangst van een station ervóór een 12 dB sterker signaal doorgeeft naar de ontvanger dan van een station met gelijke veldsterkte erachter.

Gain, antennewinst of antenneversterking

Deze drie termen betekenen hetzelfde: de verhouding van vermogen dat door een bepaalde antenne naar voren wordt uitgestraald en dat van een isotrope straler of van een dipool bij dezelfde vermogensinput. De verhouding met een isotrope straler gaat in dBi, die met een dipool in dBd. Een dipool heeft enig richteffect en is dus niet isotroop. De uitstraling in de langsrichting is praktisch 0. Dat “uitgespaarde” vermogen wordt in de dwarsrichting uitgezonden. De verhouding in gain G in dBd met dat in dBi is 2,15:

$$G(\text{dBd}) = G(\text{dBi}) + 2{,}15 \qquad (14.4\text{-}1)$$

Effective radiated power (ERP)

In het Nederlands heet dat *effectief uitgestraald vermogen*. Dat is het aan de antenne toegevoerde vermogen maal de getalswaarde van de gain (dus niet in dB) ten opzichte van

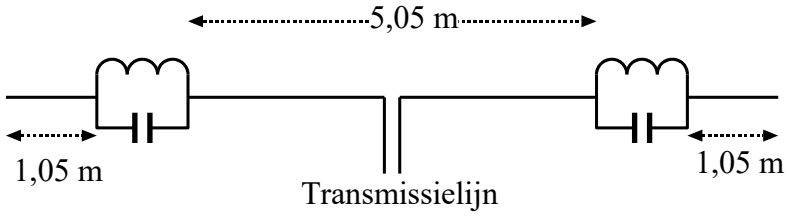
© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

een dipoolantenne. Bij een antenne met een versterking van 12 dBd is de versterking in getalvorm 16. Een antenne-input van 10 W betekent dan een ERP van 160 W.

Als een isotrope straler als uitgangspunt wordt genomen spreken we van EIRP met de I van Isotropic. Dat scheelt de inmiddels bekende 2,15 dB. Afgerond is dat een factor 1,6. De EIRP in het voorbeeld wordt 1,6 ∗ 160 W ≈ 260 W. Opletten bij antennegegevens!

14.4.6 Dipool met sperkringen

Een dipool is met een vrij eenvoudige truc geschikt te maken voor meer dan één frequentie. De truc heet *trap* (spreek uit: *trep*). Een *trap* is een LC-parallelkring die in de antenne is opgenomen (Figuur 14.4-5). Zo'n kring heeft op zijn resonantiefrequentie een in theorie oneindige impedantie (Hoofdstuk 5).



Figuur 14.4-5. Schema van een antenne met traps voor de 10- en de 15-m amateurband

Bij een dipool die op diezelfde frequentie resoneert, kun je op de beide uiteinden een trap monteren. Die doet daar nauwelijks iets, want de dipool is daar toch al heel hoogohmig. Maar de trap laat wel toe dat de dipool voorbij de trap kan worden verlengd voor een lagere frequentie zonder dat de resonantiefrequentie van het dipooldeel tussen aansluitpunt en trap verandert. Voor de lagere frequentie waarbij de hele antenne in resonantie komt, is de trap een inductief stukje van de totale antenne. Zo ontstaat een antenne voor twee frequenties. De antenne in Figuur 14.4-5 is er één voor de 10- en de 15 m amateurband (resp. 28-30 MHz en 21-21,45 MHz).

Er is geen enkel bezwaar tegen een tweede set traps op de uiteinden van de tweebands antenne die de antenne geschikt maakt voor een derde band met weer lagere frequentie. Bij sommige fabrieksantennes zijn twee traps listig samengevoegd tot ogenschijnlijk één trap voor twee extra banden. Traps worden ook toegepast in verticale antennes.

14.4.7 Apertuur-antennes

In subparagraaf 14.2.16 hebben we kennis gemaakt met één soort apertuurantenne, de hoornantenne. Bij gebruik van apertuurantennes is de straler of reflector (veel) groter dan de gebruikte golflengte.

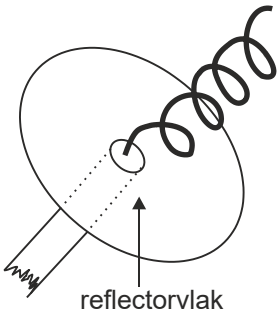
Een vorm is de paraboolantenne. Daarin heeft de dwarsdoorsnede van de reflector de vorm van een parabool. Wie een heel grote (25 m diameter) wil zien, kan naar het Dwingelderveld (Drenthe), waar een groep zendamateurs een afgedankte astronomische radiotelescoop een nieuw leven heeft gegeven. Foto 14.4-1 laat hem zien. De website is: Dwingeloo Radiotelescoop | CAMRAS – C.A. Muller Radioastronomie Station | PI9CAM.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Foto 14.4-1. De voormalige radiotelescoop in Dwingeloo. Voor de maat: zie de kleine mensjes op de trap. Foto: PA9JOO.

Voor amateurgebruik op UHF en vooral SHF zijn er handzamer exemplaren. De hoornantenne van subparagraaf 14.2.16 kan worden gebruikt voor het “belichten” (zo heet dat) van een parabool van bijvoorbeeld metaalgaas. Als de hoorn in het brandpunt staat, kan de parabool een scherpere bundeling met grotere ERP leveren dan de hoorn zelf. Boven de schotel op Foto 14.4-1 zien we een constructie met die functie.

Figuur 14.4-6 toont een tekening van een spiraalvormige antenne (helix- of helical-antenne) met reflector. Deze antenne geeft circulaire (draaiende) polarisatie.

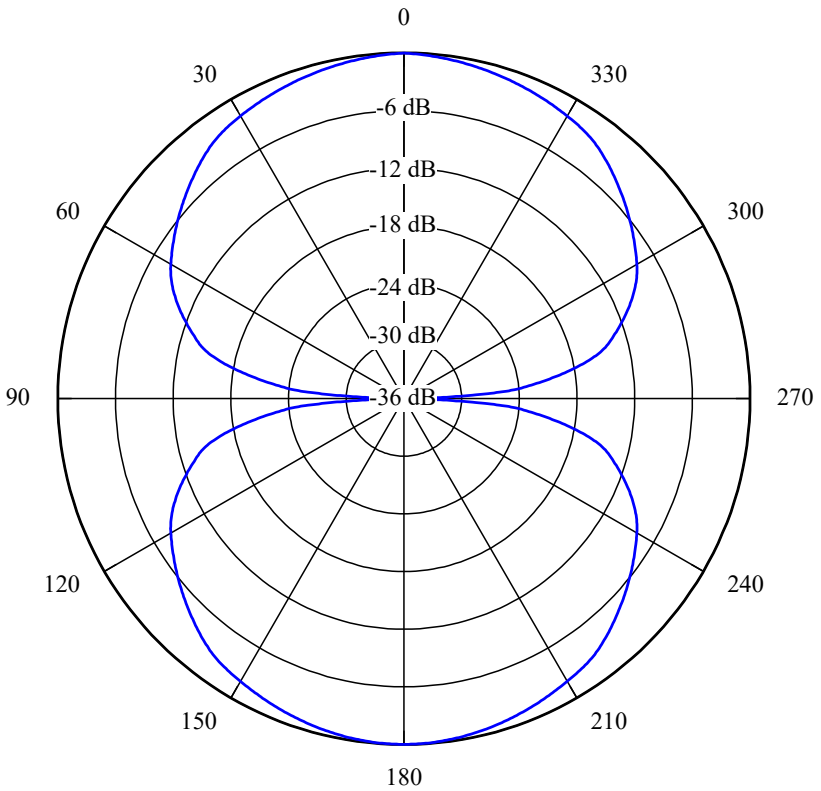


Figuur 14.4-6. Helical antenne met reflector (cursus 1999)

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

14.4.8 Horizontale en verticale stralingsdiagrammen

Een horizontaal stralingsdiagram toont, welk vermogensdeel in welke richting wordt uitgestraald. De grafiek is rond. Op de buitenrand staat de richting in graden. 0 en 180 graden zijn respectievelijk “voor” en “achter”. De binnencirkels geven de relatieve vermogensdichtheid. Soms in dB, soms in verhoudingsgetallen. De grootste vermogensdichtheid is 0 dB; bij verhoudingsgetallen is dat 1. Figuur 14.4-7 toont het horizontale stralingsdiagram van een ½λ dipoolantenne met de vermogensdichtheid in dB. De buitenrand vertegenwoordigt met 0 dB de hoogste waarde. Naar binnen toe zijn daardoor de dB-getallen negatief.

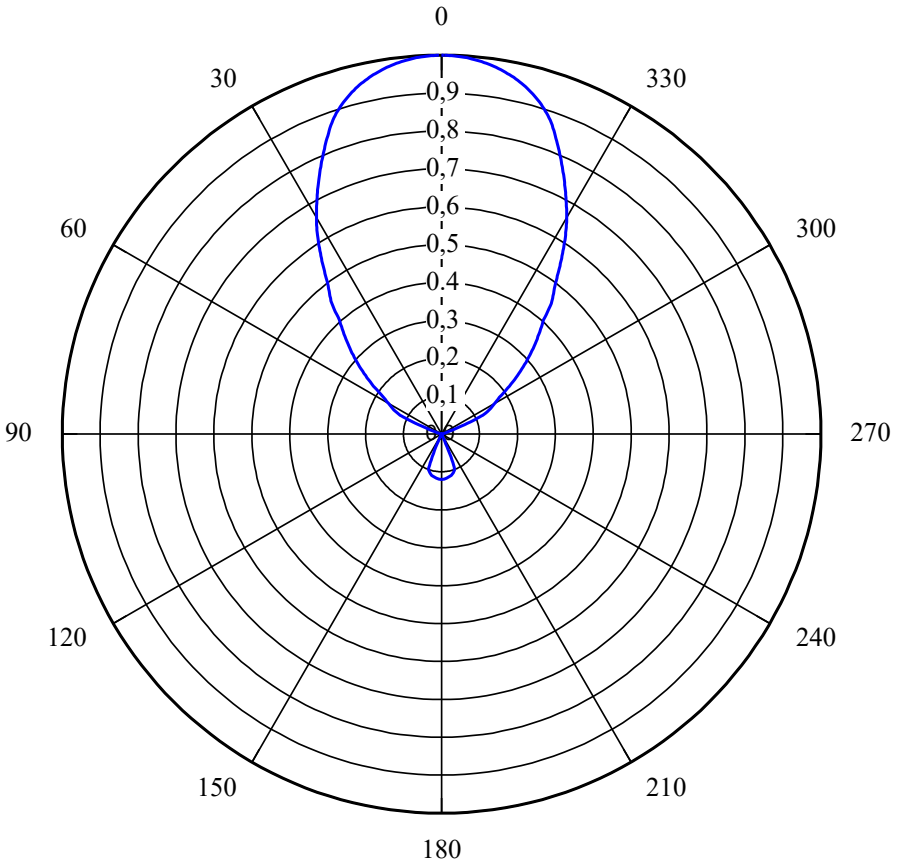


Figuur 14.4-7. Stralingsdiagram van een ½ λ-dipoolantenne.

De antenne is het middelpunt van de cirkels. Trek een lijn vanaf het middelpunt naar een bepaalde richting, zeg 30 graden. Die snijdt de blauwe grafiek op ongeveer -2 dB. In die richting is de vermogensdichtheid 2 dB lager dan in de richting 0 graden. Door de symmetrie vind je dezelfde uitkomst bij 150, 210 en 330 graden. Bij 60 graden wordt de uitkomst ongeveer -8 dB. Er zijn nog 3 punten van -8 dB. Zoek en vind ze. Bij 90 en 270 graden wordt niets uitgestraald. Dat is de lengterichting van de antenne.

Soms is dit soort diagrammen lineair. Dan staat de omtrek voor het getal 1 en lopen de waarden op de as van omtrek naar middelpunt van 1 naar 0 in plaats van in dB. Alle waarden worden gedeeld door de hoogste waarde en de uitkomst wordt weergegeven. Bij weergave in dB gebeurt dat ook, maar worden de uitkomsten omgezet in dB. Figuur 14.4-8 toont een lineair stralingsdiagram van een antenne met reflector en director(en).

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA



Figuur 14.4-8. Lineair stralingsdiagram van een antenne met straler en reflector. Dat wil zeggen dat de waarden evenredig zijn met het in de gegeven richting uitgestraald vermogen, zonder omzetting naar dB zoals in Figuur 14.4-7 wel is gedaan.

In het diagram zien we dat de lob naar 0 graden ongeveer 9x zo lang is als de lob richting 180 graden. De voor/achter-verhouding is dan 9,5 dB, afgerond 10 dB. Deze uitkomst toont het nut van diagrammen in dB. In een dB-diagram zijn veel grotere verschillen zichtbaar te maken dan in een lineair diagram als Figuur 14.4-8. In Figuur 14.4-7 loopt de schaal tot -36 dB en is zonder problemen verder uit te breiden. In Figuur 14.4-8 kom je wat afleesbaarheid betreft niet veel verder dan ongeveer 0,05, dat is -13 dB.

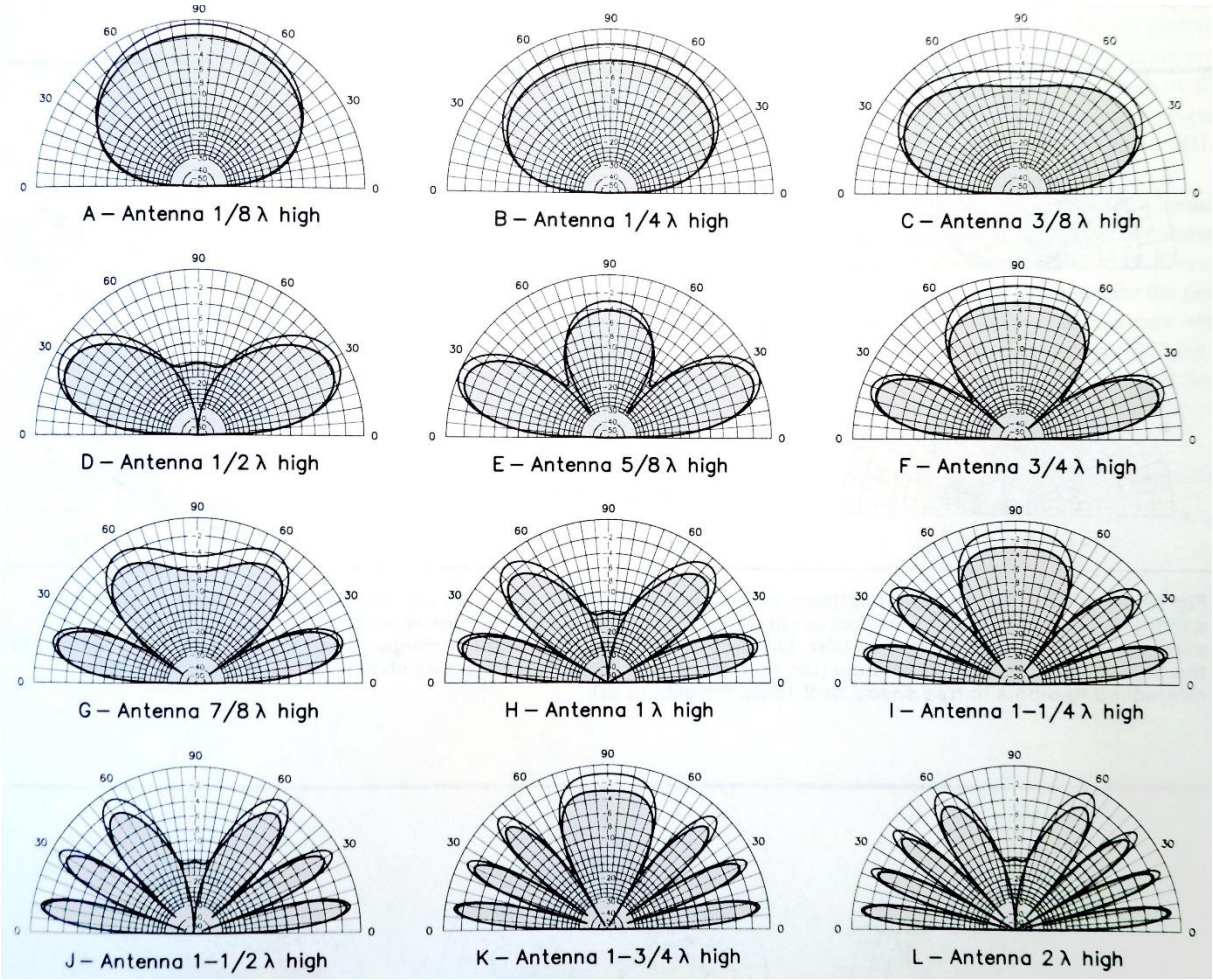
Verticale stralingsdiagrammen; effect van antennehoogte op de stralingshoek

Verticale stralingsdiagrammen tonen de hoek met het aardoppervlak, waaronder hoeveel vermogen door de antenne wordt afgestraald. Verticaal is 90 graden. De hoek loopt in zulke diagrammen links en rechts van 90 graden af naar 0.

De afstralingsrichting in het verticale vlak wordt vooral bij horizontale antennes bepaald door de hoogte van de antenne boven de grond. Wordt de hoogte gegeven in golflengten, dan volstaat één diagram voor alle frequenties. Voor verbindingen over grote afstand (DX) hebben we het liefst een zo vlak mogelijke afstraling. Dan is de kans op reflectie in de ionosfeer het grootst.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Figuur 14.4-9 toont de afstraling van een horizontaal geplaatste halvegolf-dipool in afhankelijkheid van de plaatsingshoogte (in golflengten λ)



Figuur 14.4-9. Afstralingsrichting van een horizontale halvegolf-dipool in relatie tot de hoogte in golflengtes λ boven het aardoppervlak. De lezer kijkt in de lengterichting van de antenne (ARRL Antenna Book, 2002)

De langsrichting van de antenne is loodrecht op de figuur. De schaal is bij alle diagrammen gelijk en gebaseerd op de grootste uitstraling in één richting in de figuur. Dat is in diagram E met antennehoogte 5/8 λ. Zo zijn de diagrammen onderling vergelijkbaar.

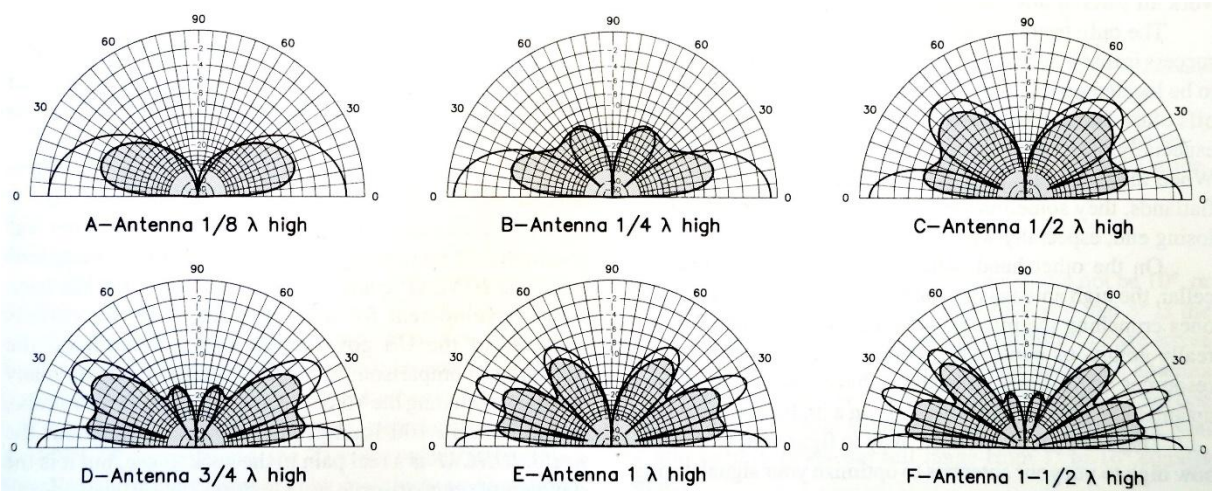
De buitenste krommen geven de situatie bij een theoretisch aardoppervlak dat volkomen vlak en perfect geleidend is. De lijnen daarbinnen, rond het iets donkerder deel in elk diagram geven de situatie bij een “gemiddelde” bodemgesteldheid.

Als we diagrammen nader bezien, blijkt dat bij geringe antennehoogte, hier voorgesteld door 1/8 λ, veel vermogen vrijwel recht omhooggaat. Voorbeeld: een antenne voor de 80-meterband die 10 m hoog hangt.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

Bij een antennehoogte van ½ λ ontstaan twee lobben waarvan het midden 30 graden omhoog wijst. Deze hoogte wordt vaak gezien als een goed compromis tussen wens en realiteit. Bij grotere antennehoogtes ontstaan meer lobben die deels ook minder steil zijn.

De afstraling van verticale antennes is ook hoogte-afhankelijk, maar anders dan die van horizontale antennes. Figuur 14.4-10 geeft verticale grafieken voor een groundplane-antenne met vier radialen.



Figuur 14.4-10. Hoogte-afhankelijkheid van de afstraling van een groundplane met 4 radialen. (ARRL Antenna Book, 2002)

Er vallen enkele dingen op:

- De aardverliezen zijn groter dan bij de horizontale dipool. Dat komt doordat tussen vier radialen door nog veel vermogen de grond bereikt. Zeker een vlak bij de grond geplaatste groundplane moet liefst meer radialen hebben dan 4. Dat beperkt de aardverliezen. De radialen zijn bij voorkeur ook wat langer dan ¼ golflengte.
- Verticale antennes ontwikkelen net als horizontale antennes meer lobben naarmate ze hoger staan. De aardverliezen worden wat kleiner dan bij lage plaatsing, maar blijven groter dan bij een horizontale antenne.
- Bij hogere plaatsing wordt de afstraling iets minder vlak. Dat is dus anders dan bij horizontale antennes.

Horizontale antennes hebben bij amateurs vaak de voorkeur. Redenen: een flinke antenne-gain met bijbehorende hoge ERP en een gunstige voor/achter-verhouding is met een horizontale antenne gemakkelijker te behalen dan met een verticale. Door een horizontale antenne te draaien, kan (over)last van sterke stations worden verminderd, kunnen zwakke stations beter worden beluisterd en wordt men in de stralingsrichting gemakkelijker gehoord. Een groundplane is in alle horizontale richtingen even gevoelig.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA

14.4.9 De effectief ontvangende oppervlakte van een antenne

Waarom hebben VHF- en vooral UHF-yagi's vaak zoveel elementen? Een voor de hand liggende reden is dat ze ook met veel elementen niet onhanteerbaar groot worden, want de golflengte is klein. Met veel elementen heb je een mooie antennewinst. Een tweede reden is de grootte van hun effectief ontvangende oppervlakte.

Stel je een EM-golf voor als een groot oppervlak dat zich vanaf de zendende antenne met de lichtsnelheid verplaatst. De ontvangende antenne snijdt als het ware een stukje uit dat oppervlak. Hoe kleiner de golflengte, des te kleiner wordt dat stukje. De oppervlakte A van het uitgesneden stukje is te berekenen volgens

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \qquad (14.4\text{-}2)$$

Daarin is G de antennewinst ten opzichte van een isotrope straler. Voor een isotrope straler geldt daarom dat G=1. Voor een halvegolf-dipool is G 2,15 dB hoger. Dat komt overeen met een factor 1,64, afgerond 1,6. Als we met dat gegeven vergelijking (14.4-2) uitwerken voor een halvegolf-dipool, dan vinden we

$$A \approx 0{,}13\ \lambda^2 \qquad (14.4\text{-}3)$$

We zien dat de oppervlakte A van het "venster" voor het door de antenne opgevangen vermogen evenredig is met het kwadraat van de golflengte. Bij een half zo grote golflengte wordt met een halvegolf-dipool 4x zo weinig vermogen opgevangen.

Versterking door reflector(en) en director(en) leidt tot een grotere waarde voor A. Wat geldt bij zenden, geldt ook bij ontvangen. Heeft een zendantenne 10 dB gain, dan heeft diezelfde antenne dat ook bij gebruik voor ontvangst. Dat is het volledige antwoord op de vraag in de eerste zin van deze sub-paragraaf.

© 2021-2026, Vereniging van RadioZendAmateurs VRZA