

Coaxiale kabels

Coaxiale kabels hebben veel toepassingen in de elektronica: audio- en video-verbindingen, TV-bedrading, meetkabels, CCTV-bedrading. Een overzicht van de soorten en hun eigenschappen is dus nuttig voor iedere elektronicus.

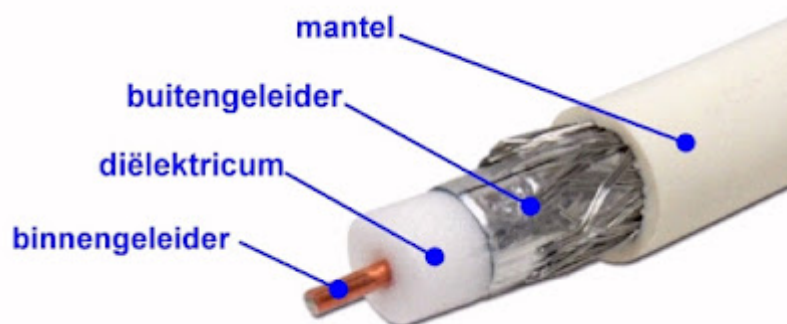
<p>Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland Email: josverstraten@live.nl Publicatiedatum: 19-12-2022</p>

Eerst wat achtergrond-informatie

Wat is een coaxiale kabel?

Het woord '*coaxiaal*' betekent letterlijk dat twee of meer dingen concentrisch om een gemeenschappelijk as zitten of draaien. Zo bestaan er helikopters met coaxiale rotoren en horloges met een coaxiaal echappement. In de elektronica betekent het begrip '*coaxiale kabel*' dus een kabel waar twee geïsoleerde geleiders concentrisch rond een gemeenschappelijke as zijn aangebracht. Deze twee geleiders worden '*binnengeleider*' en '*buitengeleider*' genoemd. De binnengeleider bestaat bij de meeste coaxiale kabels uit een flexibele of een volle kern uit koperdraad. De buitengeleider kan bestaan uit een geweven kous van uiterst dunne koperdraadjes, uit een gewikkelde aluminium folie of uit een combinatie van beide systemen. Tussen beide geleiders zit een elektrisch isolerende laag, het '*diëlektricum*' genoemd. Deze laag kan bestaan uit diverse materialen, zelfs uit lucht. Rond de buitengeleider zit nog een isolerende laag, de mantel, die de kabel beschermt tegen externe invloeden.

In de onderstaande figuur wordt duidelijk geïllustreerd wat u zich bij zo'n coaxiale kabel moet voorstellen. De binnengeleider bestaat bij dit voorbeeld uit een volle koperen kern en de buitengeleider uit een aluminium folie waarop nog eens een geweven kous als extra afscherming is aangebracht.



Een voorbeeld van een coaxiale kabel. (© 2022 Jos Verstraten)

De geschiedenis

Coax kabel werd reeds gebruikt bij de aanleg van de eerste transatlantische oceaankabel in 1858. De theoretische verklaring van de eigenschappen van de coaxiale kabel werd echter eerst in 1880 beschreven door de Engelse natuur- en wiskundige Oliver Heaviside, die het ontwerp in dat jaar patenteerde. Vier jaar later, in 1884, registreerde Siemens & Halske in Duitsland een patent dat opvallend veel leek op dat van Heaviside.

Waarvoor worden coaxiale kabels gebruikt?

U hebt ongetwijfeld de nodige meters van dit soort kabels in huis. Coax wordt bijvoorbeeld gebruikt als afgeschermd kabel bij het onderling verbinden van analoge audio-apparatuur, zoals een versterker met een actieve luidsprekerbox. De buitengeleider wordt dan met de massa's van de apparaten verbonden en zorgt ervoor dat storende signalen van de buitenwereld niet tot de binnengeleider kunnen doordringen. Ook voor digitale audio (S/PDIF) worden coaxiale kabels toegepast.

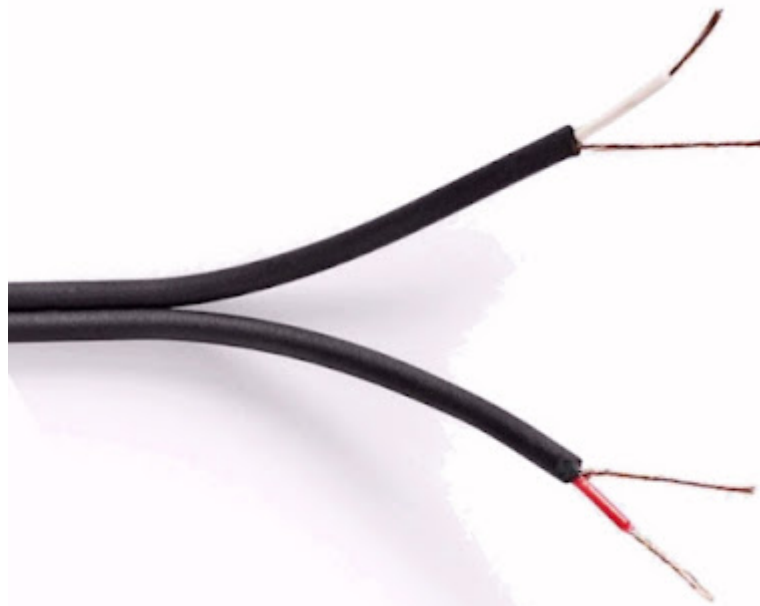
Coax kabel gebruikt u ongetwijfeld nog steeds voor het aansluiten van uw TV op de IEC-einddoos in de muur. Als u een satellietdish op uw dak hebt staan is deze via een coax kabel verbonden met de decoder in uw huis. Ook uw auto-antenne gaat via een coax kabel naar de audio-apparatuur in uw auto. Als u ergens een bedrade bewakingscamera hebt hangen moet u het video-signaal via een coax kabel verbinden met de monitor.

Tot slot, maar vaak vergeten: de meetprobes van uw oscilloscoop zijn met een stuk coax-kabel verbonden met uw meetapparaat! En als u uw functiegenerator rechtstreeks aansluit op één kanaal van uw oscilloscoop gebruikt u daar ook een coaxiale kabel voor.

Kortom, coaxiale kabels worden nog steeds vaak toegepast en het is belangrijk dat u de mogelijkheden en vooral de onmogelijkheden van dergelijke kabels begrijpt.

Soorten coaxiale kabels

Er zijn diverse soorten coax kabels in de handel. De goedkoopste worden niet eens coax genoemd maar gewoon '*afgeschermd kabel*' en u gebruikt deze voor verbindingen tussen uw audio-apparatuur. Soms worden deze kabels ook '*diode-kabel*' genoemd. U kunt dit soort coax in allerlei uitvoeringen, prijzen en diktes kopen. Omdat bij audio meestal twee signalen worden getransporteerd, het linker en het rechter kanaal, worden deze kabels vaak als tweelingsnoer aangeboden, zie de onderstaande afbeelding. De geweven koperen draadjes van de buitengeleider zijn hier uit elkaar gepulkt en nadien getordeerd, zodat deze gemakkelijk aan een connector kunnen worden gesoldeerd.



De bekende afgeschermd audio-kabel als tweelingsnoer. (© Nedis)

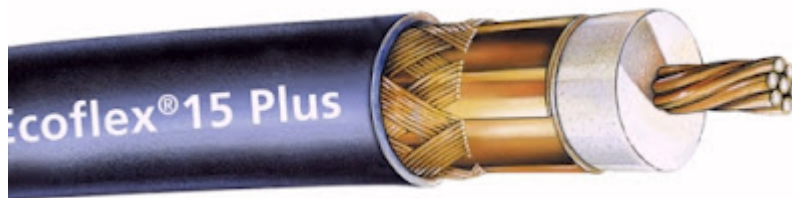
Deze dunne kabels voldoen uitstekend voor het transport van audio-frequenties, maar zijn niet bruikbaar voor het transport van de hoge frequenties tot tegenwoordig 1 GHz die komen kijken bij video- en TV-ontvangst. Dan moet u coax kabels gebruiken met een dikker diëlektricum. Een beroemde kabel is de COAX9 (KOKA9) van Hirschmann/Technetix die een drievoudige afscherming heeft. Dank zij deze afscherming dringen 4G-signalen niet door tot de binnengeleider, zodat uw beeld niet wordt ontsierd door allerlei interferentiepatronen die door instraling van de 4G-frequenties kunnen ontstaan. De KOKA9 wordt ook aangeboden onder de naam FEKAB9. Dat is een volledig geconfectioneerde kabel, hetgeen wil zeggen dat deze kabel is voorzien van twee connectors, een vrouwelijke IEC-connector aan de ene

kant en een mannelijke IEC-connector aan de andere kant.



COAX9 (KOKA9) van Hirschmann/Technetix. (© Nedis)

Deze kabel is dan weer niet geschikt voor de ontvangst van satelliet-TV. De bandbreedte van dergelijke kabels moet namelijk gaan tot minimaal 3 GHz. Een bekend type kabel is de Ecoflex15. Deze is bruikbaar tot niet minder dan 5 GHz en heeft bij deze frequentie een demping (lees verder) van slechts 25 dB per honderd meter. Deze kabel heeft een diameter van 14,6 mm en bij de aanschaf van connectors moet u er op letten dat een dergelijke dikke kabel door de connectors kan worden verwerkt. Deze antennekabel heeft een zevenaderige hybride binnengeleider. De buitenmantel is ultraviolet gestabiliseerd voor een langere levensduur buitenshuis. De elektrische eigenschappen zijn veel beter dan die van gangbare RG213/U en RG58 kabels.



*Ecoflex15 kabel voor het aansluiten van een schotel antenne.
(© Conrad Electronic)*

Tot slot geeft de onderstaande foto een impressie van de coax kabel die op de markt is voor het aansluiten van een bewakingscamera op een monitor. Het speciale aan deze kabel is dat er een normale twee-aderige voedingskabel in de coax kabel is geïntegreerd. Via deze kabel kunt u de voedingsspanning (meestal 12 V_{dc}) voor de bewakingscamera aanvoeren. Dergelijke kabels worden ook wel 'CCTV-kabels' genoemd en worden volledig geconfectioneerd geleverd in standaard lengten van vijf tot wel vijftig meter. Het letterwoord 'CCTV' staat voor '**C**losed **C**ircuit **T**V'.



Een CCTV-kabel voor het aansluiten van een TV-camera. (© Bol.com)

Speciale coaxiale kabels

De besproken coaxiale kabels kunt u 'huis, tuin en keuken'-kabels noemen die in ieder huis worden aangetroffen. Voor de volledigheid bespreken wij in dit paragraafje nog een aantal

kabels die uitsluitend in de professionele elektronica worden toegepast.

Cellflex kabel, ontwikkeld door het bedrijf Radio Frequency Systems (RFS), maar inmiddels ook door een heleboel andere leveranciers op de markt gebracht, bestaat uit een holle verkoperde aluminium binnengeleider en een buitengeleider die uit een solide zeer dunne koperen pijp bestaat. Om de kabel toch enige flexibiliteit te geven is deze koperen pijp op een speciale manier geribbeld. Als diëlektricum wordt een dikke laag polyethyleen schuim toegepast. Bij 5 GHz heeft deze kabel een demping van slechts 10 dB per honderd meter. Hij is bruikbaar voor het transport van signalen met een frequentie tot niet minder dan 15,8 GHz. Bovendien is deze kabel in staat grote vermogen te transporteren, gespecificeerd wordt ongeveer 1 kW bij 5 GHz. De kabel is met zijn diameter van meer dan 25 mm, zijn minimale buigradius van 250 mm en zijn prijs van meer dan tien euro per meter niet iets dat u even in uw woonkamer wilt aanleggen. Dergelijke kabels worden wél toegepast voor het voeden van microgolf zendantennes die een flink vermogen uitstralen.



Een voorbeeld van een Cellflex kabel. (© Alibaba)

Tot slot de Air Dielectric Coaxial Cable, ontwikkeld door Helix Dielectric. Beide geleiders zijn vervaardigd van holle koperen geribbelde pijpjes die door een spiraalvormig aangebrachte kunststof profiel op een constante onderlinge afstand worden gehouden. Deze coax maakt dus gebruik van de lucht als diëlektricum en kan als gevolg van de grote doorslagspanning van lucht zeer hoge spanningen tussen zijn binnen- en buitengeleiders verdragen. De kabel wordt getest op een doorslagspanning van 21 kV! Het frequentiebereik is met 1 GHz niet erg hoog te noemen, maar daar tegenover staat dat deze kabel in staat is een piekvermogen van 1.100 kW te transporteren.



Een voorbeeld van een Air Dielectric Coaxial Cable. (© Helix Dielectric)

Coaxiale connectors

Inleiding

Coaxiale kabels moeten op een speciale manier worden afgesloten met coaxiale connectors die de goede eigenschappen van de kabel niet mogen beïnvloeden. De twee aansluitcontacten van zo'n connector moeten dus ook concentrisch om een gemeenschappelijk as zijn aangebracht. Om de goede afscherming van een coax kabel niet te verstoren moet het lichaam van de connector volledig van metaal zijn gemaakt. Dat laatste is zeer belangrijk, het heeft geen enkele zin veel geld uit te even aan kwalitatief hoogwaardige kabel en deze te verbinden met goedkope plastic connectors! Coaxiale connectors bestaan zowel in een mannelijke als in een vrouwelijke uitvoering. Bij de

mannelijke, male genaamd, zij de contacten uitgevoerd als pennetjes. De vrouwelijke, female genoemd, hebben uiteraard gaatjes waar de mannelijke pennetjes in passen.

Het grote probleem bij de behandeling van coaxiale connectors is dat er tientallen verschillende soorten zijn ontwikkeld die vaak maar op kleine detailpunten van elkaar verschillen, maar toch niet compatibel zijn. In de onderstaande paragraafjes zullen wij de meest toegepaste connectors bespreken:

- De RCA-, tulp- of cinch-connectors.
- De Belling-Lee of IEC-connectors.
- De F-connectors.
- De Motorola- of DIN-connectors.
- De BNC-connectors.
- De MCX-connectors.
- De UHF-connectors.

De RCA-, tulp- of cinch-connectors

Deze connector is dé standaard voor het transporteren van audio- en videosignalen van het ene naar het andere apparaat. Dit onderdeel werd in de jaren dertig van de vorige eeuw ontwikkeld door de Radio Corporation of America'en vandaar de naam RCA. Deze connector bestaat, in de male uitvoering, uit een centrale pen omgeven door een tulpvormig tweede contact. Vandaar dat deze connectors ook wel eens 'tulpstekkers' worden genoemd. De diameter van het buitenste contact bedraagt 8,3 mm en de diameter van de centrale pen 3,2 mm. De typische bandbreedte van zo'n connector wordt door de meeste fabrikanten gespecificeerd als 100 MHz.




















De naam 'cinch' voor deze connector zou zijn ontstaan omdat het zo eenvoudig is een verbinding met dergelijke connectors tot stand te brengen. De Engelse uitdrukking 'it is a cinch' heeft immers als vertaling 'het is een makkie'.

Een nadeel van de RCA-connector is dat als u een mannetje in een vrouwtje plukt eerst het centrale contact wordt gesloten en even later het buitenste tulpcontact. Als u de kabel gebruikt voor het verbinden van audio is het gevolg dat er heel even een luide brom te horen is.



*Kwalitatief hoogwaardige male en female RCA-connectors.
(© PropAudio)*

Een RCA-connector is slechts in staat één signaal te transporteren. Bij een volwaardige surround-sound installatie hebt u dus acht kabels nodig! Om een en ander in goede banen te leiden heeft men een internationaal gestandaardiseerde kleurcodering afgesproken voor alle audio- en videosignalen die via cinch-kabels getransporteerd kunnen worden. Deze codering is samengevat in de onderstaande tabel (bron: Wikipedia). Deze kleuren zult u tegenwoordig bij vrijwel alle merken van audio- en video-apparatuur aantreffen.

SOORT SIGNAAL	SIGNAAL BENAMING	KLEUR	
Composiet analoge video	Composiet signaal	Geel	
	Analoge audio		
Analoge audio	Links (of opname bij tape)	Wit	
	Rechts (of opname bij tape)	Rood	
	Links (of weergave bij tape)	Zwart	
	Rechts (of weergave bij tape)	Geel	
	Centrum	Groen	
	Linksvoor surround	Blauw	
	Rechtsvoor surround	Grijs	
	Linksachter surround	Bruin	
	Rechtsachter surround	Beige	
	Subwoofer	Purper	
	Digitale audio	S/PDIF	Oranje
Component analoge video (Y P _B P _R)	Y	Groen	
	P _B /C _B	Blauw	
	P _R /C _R	Rood	
Component analoge video (VGA)	R	Rood	
	G	Groen	
	B	Blauw	
	Horizontale sync	Geel	
	Verticale sync	Wit	

Gestandaardiseerde codering van audio- en video-signalen. (© 2022 Jos Verstraten)

De Belling-Lee of IEC-connectors

Deze coaxiale stekkers worden gebruikt voor het verbinden van uw TV met de wandcontactdoos. Deze connector werd reeds in 1922 ontwikkeld door het Engelse bedrijf Belling & Lee Ltd en is met stip de oudste connector die nu nog standaard wordt toegepast. 'IEC' is het letterwoord van de '*International Electrotechnical Commission*', de organisatie die dergelijke standaarden definieert. De Belling-Lee connector is gespecificeerd in het normblad IEC 61169-2 en werd daardoor de wereldwijde standaard om splitters, antenneversterkers, wandcontactdozen en TV-ontvangers te koppelen. De originele connectors werden gespecificeerd tot 1,6 MHz, maar moderne productietechnieken hebben de bandbreedte verhoogd tot ongeveer 957 MHz.

De mannetjes worden simpelweg in de vrouwtjes geduwd. Er zijn echter ook uitvoeringen ontwikkeld waar de verbinding door middel van een schroefconnector wordt gezekerd. Om uw TV met de wandcontactdoos te verbinden hebt u een kabel nodig met aan het ene uiteinde een mannetje en aan het andere uiteinde een vrouwtje. Het mannetje gaat in de TV, het vrouwtje in de wandcontactdoos. Ook hier geldt dat er kwalitatief uitstekende en waardeloze connectors in omloop zijn. In de onderstaande foto geven wij van beide een voorbeeldje. U ziet wel zonder toelichting welke connectors tot de ene en welke tot de andere groep behoren.



Goede en slechte IEC-connectors. (© 2022 Jos Verstraten)

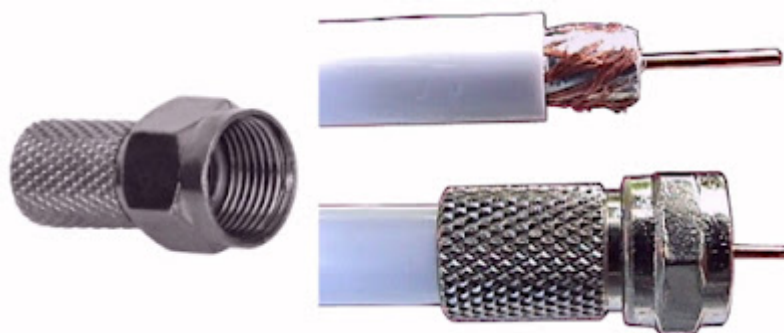
De F-connectors

De F-connector is een coaxiale stekker die in de jaren vijftig van de vorige eeuw werd ontwikkeld door Eric Winston van Jerrold Electronics. De bedoeling was een universele en tamelijk goedkope manier ontwikkelen waarmee de onderdelen van een kabel-TV installatie onderling konden worden verbonden. Om geld uit te sparen werden de mannelijke connectors niet voorzien van een centrale pen. Die rol wordt vervuld door de centrale ader van de coaxiale kabel die met de connector wordt verbonden. De binnengeleider van de kabel moeten dus steeds bestaan uit een volle kern koperen ader. Uit de aard van deze constructie bestaan er dus geen vrouwelijke F-connectors die u aan een kabel kunt monteren. Kabels gaan steeds van man naar man, de apparatuur is uitsluitend voorzien van vrouwelijke F-connectors.

Het voordeel van de F-connectors is dat de mannetjes niet alleen in de vrouwtjes worden geplugd, maar dat nadien het lichaam van het mannetje op het lichaam van het vrouwtje wordt geschroefd. Dat geeft een uiterst betrouwbare verbinding. De F-connector is speciaal ontwikkeld voor verbindingen die duurzaam zijn, die dus zelden of nooit weer losgeschroefd moeten worden. Een typisch voorbeeld van het gebruik van F-connectors is de verbinding tussen een antennesignaal versterker en een coax verdelers. Die verbinding maakt u eenmalig in de meterkast en deze laat u nadien vele jaren met rust.

Nadeel is wel dat deze connectors niet waterdicht zijn en dat u bij sommige uitvoeringen een speciale krimptang nodig hebt om de connector op de kabel te bevestigen. Door gebruik te maken van de Hirschmann SFC070 'twist-on' F-connector kunt u echter eenvoudig de coaxkabel op de connector vastschroeven. Deze twist-on's hebben echter een coax kabel met een welbepaalde diameter nodig. Voor de SFC070 moet u bij voorkeur gebruik maken van de KOKA-799 en COAX-12 kabels van Hirschmann.

De bandbreedte van F-connectors wordt gespecificeerd tot iets meer dan 2 GHz. U treft deze connectors u aan op allerlei onderdelen waarmee u een in-huis coax-distributie aanlegt, zoals antennesignaal versterkers, verdelers en afsluitweerstand.



*De SFC070 type F-connector van Hirschmann.
(© Hirschmann)*

De Motorola- of DIN-connectors

Deze connector zegt u waarschijnlijk niets en toch is de kans groot dat u er eentje hebt. Dit is namelijk de standaard connector waarmee een auto-antenne aan de autoradio wordt aangesloten. De buitengeleider bestaat uit een metalen huls met een lengte van 38 mm die

rond de coax kabel is aangebracht. Op deze huls is minstens één verend contact gemonteerd dat zorg draagt voor een stevige bevestiging in de vrouwelijke connector op de autoradio. Deze connector wordt ook DIN genoemd omdat hij beschreven is in het normblad DIN 41585. Sommige autoradio's hebben een ISO-connector. Dan moet u een DIN-naar-ISO adapter tussen de antennekabel en de radio opnemen.



*Motorola-connector, met rechts DIN-naar-ISO adapter.
(© 2022 Jos Verstraten)*

De BNC-connectors

Iedere elektronicus kent uiteraard deze connector die dé standaard is voor het aansluiten van elektronische meetapparatuur op de buitenwereld. Oscilloscoop, functiegenerator, sinusgenerator, pulsgenerator, millivolt meter, LCR-brug, zij zijn allemaal voorzien van een of meerdere vrouwelijke BNC-connectors.

Deze connector werd in de jaren veertig van de vorige eeuw in Amerika ontwikkeld voor militaire toepassingen. Het letterwoord 'BNC' staat voor 'Bayonet Neill Concelman', naar zijn bajonetsluiting en zijn uitvinders Paul Neill (Bell Labs) en Carl Concelman (Amphenol). Het BNC-systeem heeft twee bajonet pennen op de vrouwelijke connector. De mannelijke connector moet u eerst over de vrouwelijke schuiven waarna u met een draai van een kwartslag de uitsparingen in het mannelijke deel in de pennen op het vrouwtje laat klikken. Beide delen zijn dan muurvast met elkaar verbonden en de verbinding kan alleen worden verbroken door het mannetje iets in te drukken, weer een kwartslag te draaien en uit het vrouwtje te trekken.

De BNC-connector is bruikbaar, maar niet noodzakelijkerwijs stabiel tot ongeveer 11 GHz. Ze worden meestal toegepast voor frequenties onder de 4 GHz en spanningen onder de 500 V. BNC-connectors worden gemaakt in versies van 50 Ω en 75 Ω , afgestemd op gebruik met kabels met dezelfde karakteristieke weerstand (lees verder). Voor elektronische meetapparatuur wordt echter altijd gebruik gemaakt van 50 Ω kabels en connectors.

Een groot nadeel van de mannelijke BNC-connector is dat de connector op de kabel moeten worden gekrimpt met een speciale tang. Volledig geconfectioneerde BNC-kabels zijn echter te kust en te keur te koop, dus waarom zou u die moeite doen? Behalve op uw elektronische meetapparatuur kunt u BNC-connectors ook aantreffen op CCTV-camera's.



*Een vrouwelijke en mannelijke BNC-connector.
(© 2022 Jos Verstraten)*

De MCX-connectors

Door het steeds kleiner worden van meetapparatuur, zoals bij pocket oscilloscopen en generatoren het geval is, wordt de vrij forse BNC-connector een steeds grotere sta in de weg. Daarom besluiten sommige fabrikanten van miniatuur oscilloscopen het vertrouwde BNC-concept te verlaten en te kiezen voor de MCX-technologie. 'MCX' is het letterwoord van '*Micro CoaXial Connector*', een onderdeel dat vrij nieuw is want het kwam eerst in 1980 voor het eerst op de markt. Zij worden tegenwoordig gebruikt op GPS-ontvangers en DVB-T tuners voor laptops. Maar sinds een tiental jaren zijn zij dus ook doorgedrongen tot de geminiaturiseerde versies van de standaard benchtop meetapparatuur zoals oscilloscopen. De specificaties van deze connector zijn vastgelegd in het document European CECC 22220. Deze onderdelen worden gespecificeerd tot 6 GHz. Het verschil in afmetingen tussen een BNC- en een MCX-connector is vrij groot, zie de onderstaande afbeelding.



MCX

BNC

*Vergelijking van een MCX- en een BNC-connector.
(© 2022 Jos Verstraten)*

Omdat uw kabel arsenaal ongetwijfeld uit BNC-kabels bestaat doet zich het probleem voor hoe uw functiegenerator aan te sluiten op zo'n moderne miniatuur oscilloscoop. Gelukkig heeft men MCX-to-BNC adapters ontworpen, waarvan u er eentje ziet op de onderstaande afbeelding. U moet goed op de prijzen letten. Dergelijke adapters worden namelijk aangeboden voor prijzen tussen een paar euro (AliExpress) tot meer dan twintig euro (Distrelec).

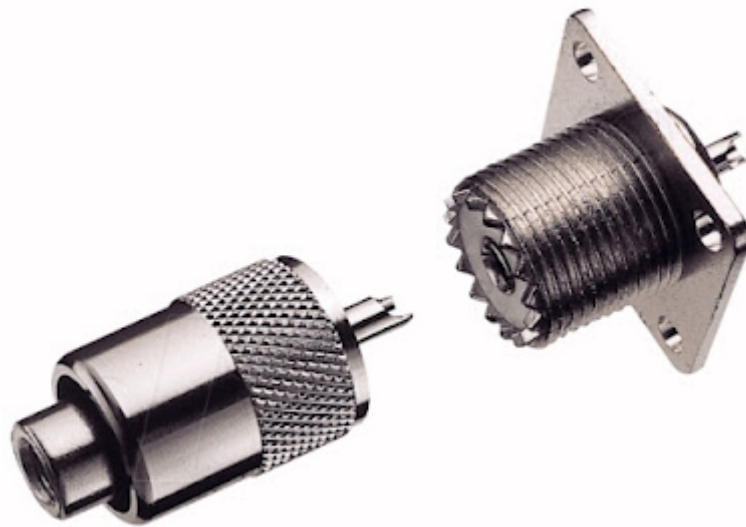


Een MCX-to-BNC adapter. (© AliExpress)

De UHF-connectors

Tot slot van deze alles behalve uitputtende bespreking van beschikbare coaxiale connectors nog een paar woorden over een ouwetje: de UHF-connector. Wij bespreken deze omdat u

deze connector nog kunt aantreffen op meetapparatuur uit de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw, zoals op de BEM-oscilloscopen, -buisvoltmeters en -sinusgeneratoren die door MBLE en Philips in die jaren werden aangeboden. Deze connector stamt uit de jaren dertig van de vorige eeuw en was bruikbaar tot ongeveer 30 MHz. Het meest opmerkelijke aan deze connector is dat de centrale pen een diameter heeft van 4,0 mm. Dat wil zeggen dat u ook een normale 4 mm banaanstekker in het vrouwtje kwijt kunt.



*Het mannetje en vrouwtje van de UHF-connector.
(© Reichelt Electronics)*

Eigenschappen van coaxiale kabels

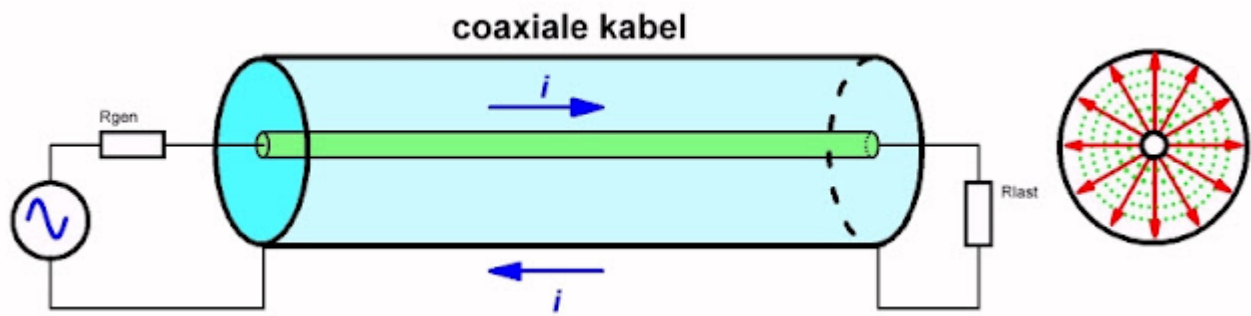
Inleiding

Een coaxiale kabel lijkt een eenvoudig en ongecompliceerd onderdeel, maar heeft tóch een aantal interessante eigenschappen die het gedrag van de kabel bepalen. In de volgende paragrafen zullen wij de onderstaande eigenschappen bespreken:

- Elektrische en magnetische velden in en rond de kabel.
- Specifieke capaciteit en zelfinductie van een coaxiale kabel.
- Het equivalent schema van een coaxiale kabel.
- De karakteristieke weerstand van een coaxiale kabel.
- De kabelverliezen of kabledemping (Insertion Loss).
- De bandbreedte van een coaxiale kabel.
- De invloed van het skin-effect.
- De looptijd (Velocity of Propagation) van een coaxiale kabel.

Elektrische en magnetische velden in en rond de kabel

In de onderstaande figuur is voorgesteld wat er gebeurt als u een wisselspanningsbron via een coaxiale kabel aansluit op een belasting R_{last} . De bron levert een stroom i via de binnengeleider aan de belasting. Deze stroom vloeit door de belasting en gaat via de buitengeleider weer retour naar de bron. Het elektromagnetisch wisselend veld van de kabel bevindt zich uitsluitend tussen de binnen- en de buitengeleider. Een coaxiale kabel levert dus geen storend veld aan de buitenwereld. Vandaar dat men de buitengeleider ook wel de afschermmantel noemt. In de rechter figuur is in een kabeldoorsnede voorgesteld hoe de twee velden verlopen in de kabel. Het elektrisch veld (rood) is radiaal gericht tussen de binnenste en de buitenste geleider. Het magnetisch veld (groen) vormt cirkels rond de binnenste geleider.



De elektrische en magnetische velden in een stroomvoerende coaxiale kabel.
(© 2022 Jos Verstraten)

Anderzijds is een coaxiale kabel ongevoelig voor externe velden. Een coax kabel gebruikt immers het principe van de Faraday-kooi: elektromagnetische velden van buitenaf komen niet door de mantel heen zodat het getransporteerde signaal ongestoord blijft.

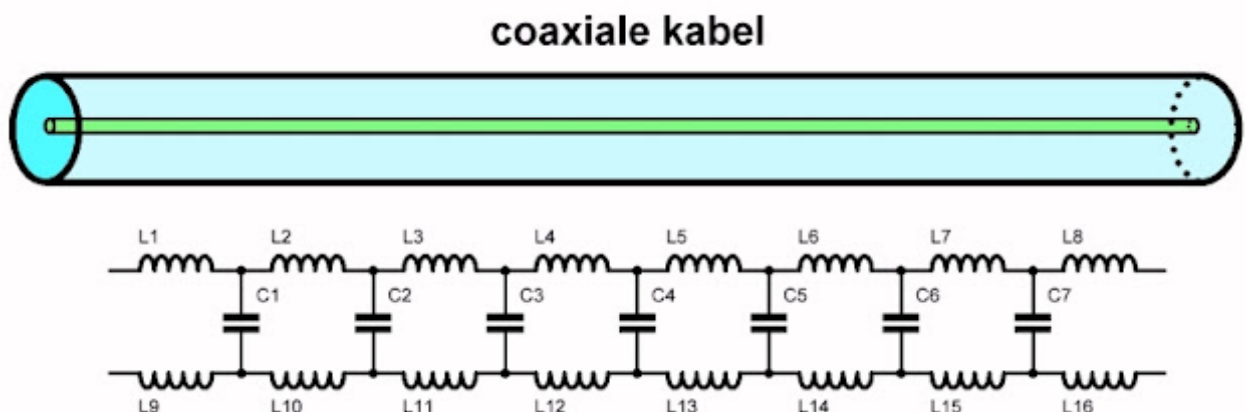
Specifieke capaciteit en zelfinductie van een coaxiale kabel

Een coaxiale kabel bestaat uit twee geleiders die op een bepaalde afstand van elkaar zijn opgesteld. Tussen deze geleiders bevindt zich een isolerende stof, diëlektricum genoemd. Dat is uiteraard exact de definitie van een condensator. U kunt een coaxiale kabel dus beschouwen als een soort van langgerekte condensator. Omdat hiermee in de praktijk niet te rekenen valt verdeelt men de kabel in een groot aantal kleine kabeltjes die ieder een identieke kleine capaciteit hebben. Die kleine stukjes kabel staan uiteraard allemaal achter elkaar. Al die kleine condensatoren staan dus parallel geschakeld. De 'specifieke capaciteit' C_i is de capaciteit van één meter van de kabel. Deze waarde kan vrij groot zijn, een waarde van 65 pF/m is geen uitzondering.

Als een stroom i op een bepaald moment via de binnenste ader wordt getransporteerd naar een belasting en via de buitenader weer terug stroomt naar de bron heeft dit een magnetische flux ϕ tussen beide geleiders tot gevolg. Beide geleiders zijn dus met elkaar gekoppeld door deze flux. Als er een wisselstroom door de kabel vloeit dan zal er een elektromotorische kracht van zelfinductie worden gegenereerd. Een coaxiale kabel heeft dus niet alleen een bepaalde capaciteit, maar ook een bepaalde zelfinductie. Ook nu kunt u zich dit verschijnsel voorstellen als de serieschakeling van een heleboel kleine zelfinducties in kleine kabeldeeltjes die achter elkaar staan. De 'specifieke zelfinductie' L_i is dan de zelfinductie per meter kabel, uitgedrukt in H/m.

Het equivalent schema van een coaxiale kabel

Als u deze beide eigenschappen van de kabel bij elkaar voegt kunt u een coaxiale kabel voorstellen door het onderstaand equivalent schema. Natuurlijk heeft het koper van de beide aders ook nog een ohmse weerstand. Deze laten wij hier buiten beschouwing omdat deze bij de verklaring van het gedrag van de kabel voor wisselspanningen nauwelijks een rol speelt.



Het equivalent schema van een coaxiale kabel. (© 2022 Jos Verstraten)

De karakteristieke weerstand van een coaxiale kabel

Stel dat u op een heel lange kabel, bijvoorbeeld eentje van hier tot op Mars, een spanning aanlegt. Deze spanning zal alle equivalente condensatoren die tussen de twee geleiders aanwezig zijn, een na een opladen. Dat opladen veroorzaakt een stroom die door alle equivalente zelfinducties van de kabel loopt. Maar... als u aan een systeem een spanning legt en het gevolg is dat er stroom door het systeem gaat lopen, dan kunt u besluiten dat er sprake is van een bepaalde weerstand. Dat volgt immers rechtstreeks uit de wet van Ohm die het verband legt tussen spanning en stroom.

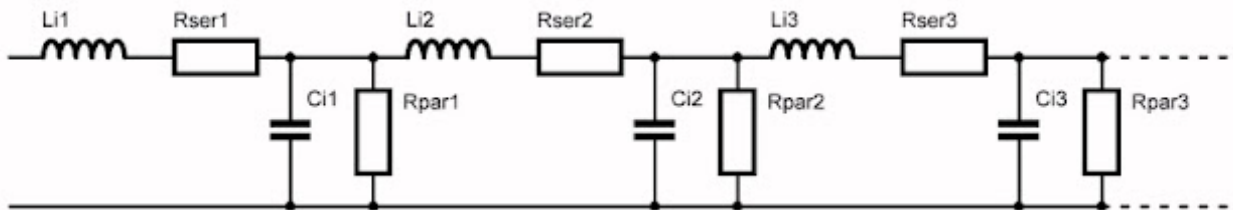
Men kan wiskundig bewijzen dat, voor een oneindig lange kabel, de verhouding tussen de aangelegde spanning U en de als gevolg daarvan lopende stroom I constant is. Deze verhouding noemt men de '*karakteristieke weerstand*' R_0 van de kabel. Men kan bovendien, alweer zuiver wiskundig, aantonen dat deze R_0 gelijk is aan de vierkantswortel uit de verhouding tussen de specifieke zelfinductie L_i en de specifieke capaciteit C_i . Onder formulevorm:

$$R_0 = \sqrt{[L_i / C_i]}$$

De karakteristieke weerstand van een coaxiale kabel is een van de voornaamste specificaties van een dergelijke kabel. Deze waarde wordt bij de meeste kabels om de zoveel centimeter op de kabel afgedrukt. Specifieke weerstandswaarden van bekende coaxiale kabels zijn 50 Ω , 75 Ω , 135 Ω en 300 Ω . De coax kabels die in de elektronische meettechniek worden toegepast hebben een karakteristieke weerstand van 50 Ω .

De kabelverliezen of kabeldemping (Insertion Loss)

Als u aan de kabel een bepaald signaal legt, zal er een bepaalde stroom door de kabel gaan vloeien. Waar stroom vloeit is er sprake van verliezen in allerlei parasitaire onderdelen van de kabel. Als u een schema tekent van een standaard coaxiale kabel met alle parasitaire onderdelen die een rol spelen bij het berekenen van het kabelverlies ontstaat onderstaand schema.

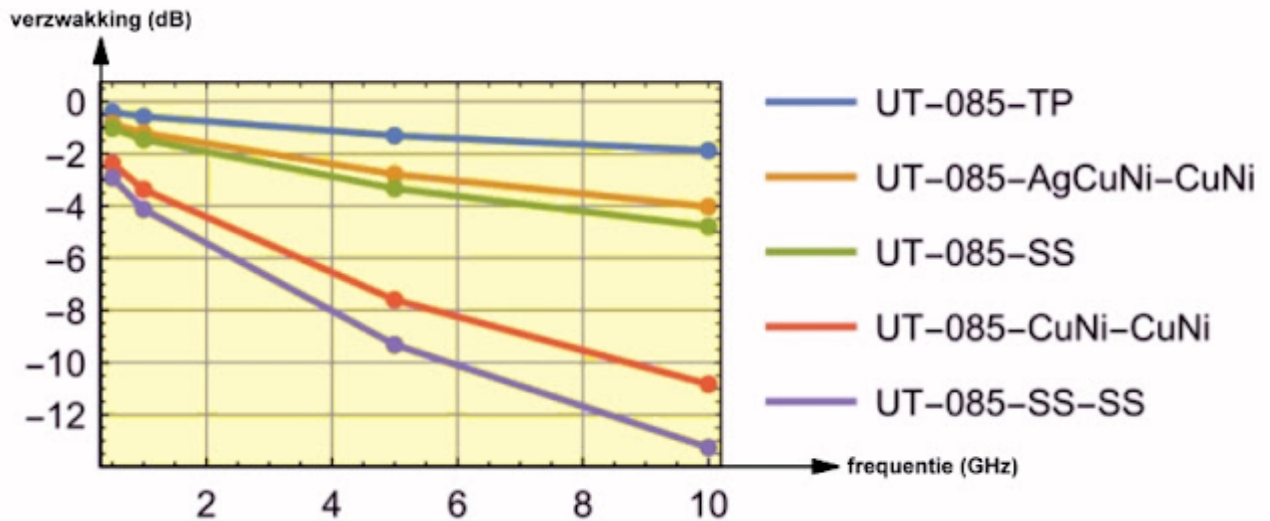


Parasitaire elementen die de demping van de kabel veroorzaken. (© 2022 Jos Verstraten)

De weerstand R_{ser} is de koperweerstand van de geleiders die wij tot nu toe hebben verwaarloosd. De weerstand R_{par} is de zeer hoge lekweerstand van het diëlektricum. Dat is immers geen ideale isolator. Het gevolg van deze parasitaire elementen is dat de spanning die u meet op het einde van de kabel kleiner is dan de spanning die u in de kabel stuurt. Ook de kortsluitstroom die u aan het einde van de kabel kunt meten zal lager zijn dan de stroom die de signaalbron in de kabel stuurt.

Die signaalverzwakking is uiteraard afhankelijk van de lengte van de kabel, maar ook van de frequentie van het signaal. Zowel de specifieke zelfinductie L_i als de specifieke capaciteit C_i hebben immers een frequentie-afhankelijke impedantie.

De signaaldemping wordt, uitgedrukt in dB, in een grafiek gespecificeerd bij diverse frequenties en voor honderd meter kabel. De demping van de kabel is ook afhankelijk van zijn structuur, om precies te zijn van de dikte en kwaliteit van de gebruikte materialen. Dit heeft directe invloed op de verliezen in de centrale ader en in het diëlektricum. Verdere verliezen worden veroorzaakt door het gebruik van de kabel, zoals materiaalmoetheid, vochtabsorptie, diameter van de eventuele bochten in de kabel en de leeftijd.



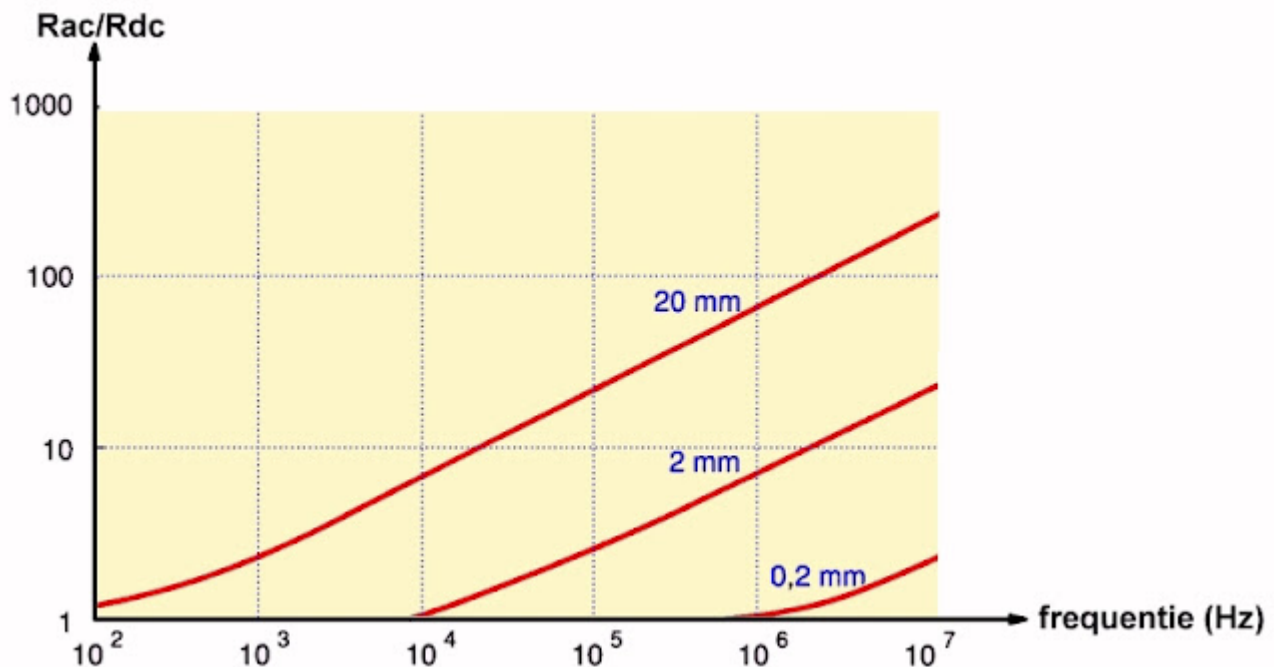
*De demping van een aantal bekende coaxiale kabels in functie van de frequentie.
(© EPJ Quantum Technology)*

De bandbreedte van een coaxiale kabel

Een kabel heeft uiteraard geen moeite met het transporteren van gelijkspanning. De bandbreedte van een kabel gaat dus altijd van 0 Hz tot de frequentie waarbij het signaal op de uitgang met 3 dB is gedaald ten opzichte van 1 kHz. Een signaaldemping van 3 dB betekent dat de kabel bij die bepaalde frequentie slechts de helft van het vermogen aan de uitgang levert dan bij de referentiefrequentie. Werkt u liever met spanningen, dan komt een signaalverzwakking met 3 dB overeen met een spanningsverlies tot 70,7 % van de grootte het ingangssignaal.

De invloed van het skin-effect

Elektrische stroom vloeit niet altijd door de gehele geleider! Bij hoge frequenties veroorzaakt het magnetisch veld van de geleider zélf dat de elektronen steeds meer naar de buitenkant van de draad worden gedwongen. Bij zeer hoge frequenties loopt er zelfs helemaal geen stroom door de kern van de geleider. Vandaar dat sommige coaxiale kabels die speciaal zijn ontwikkeld voor het geleiden van zeer hoge frequenties een holle binnengeleider hebben. De invloed van het skin-effect wordt uitgedrukt door de verhouding tussen de weerstand R_{ac} van de geleider voor wisselspanning en de weerstand R_{dc} voor gelijkspanning. Uiteraard is deze verhouding afhankelijk van de frequentie van het signaal. Vandaar dat ook deze grootheid alleen in een grafiek in functie van de frequentie kan worden uitgezet. In de onderstaande grafiek is dat gedaan voor koper.



De invloed van het skin-effect op de weerstand van de kabel. (© 2022 Jos Verstraten)

De looptijd (Velocity of Propagation) van een coaxiale kabel

Stel dat u op tijdstip t_1 een heel smalle eenmalige puls op de ingang van een coaxiale kabel met een lengte van honderd meter zet. Wanneer zal deze puls, of wat ervan over is, op de uitgang van de kabel verschijnen? Het antwoord op deze vraag heeft alles te maken met de 'looptijd' van de kabel. In een kabel gaat het elektrische signaal altijd langzamer dan in de ruimte. Zoals u wellicht weet verplaatsen elektromagnetische golven zich met de lichtsnelheid van 300.000 km/s door de ruimte. Omgerekend betekent dit dat licht 30 cm per nanoseconde aflegt. Als elektrische stroom net zo snel door een kabel zou gaan, dan zou die smalle puls die u op de ingang van de kabel hebt gezet na 3,3 ns op de uitgang verschijnen.

Als u dit experiment in de praktijk zou uitvoeren, dan zou u merken dat de puls er heel wat langer over doet om die honderd meter kabel te doorlopen. Dat is natuurlijk niet zo vreemd. Als wij, volgens de klassieke mechanica, elektrische stroom voorstellen door een stroom elektronen, dan moeten deze elektronen zich door de atomen van de draad persen. Bovendien vinden zij een ontelbaar aantal spoeltjes L_i op hun weg, die ieder het vloeien van stroom proberen tegen te werken. Bovendien staan er evenveel condensatorpjes C_i als hindernis op hun weg, die allemaal eisen dat zij worden opgeladen. Al die gebeurtenissen zorgen ervoor dat het vloeien van de stroom door een coaxiale kabel danig wordt vertraagd. Die vertraging wordt gedefinieerd door het begrip 'looptijd' of in het Engels 'Velocity of Propagation' (VP). Dit is een getal dat procentueel aangeeft met welke fractie van de lichtsnelheid het signaal door de kabel gaat.

De kabel RG59 met 75 Ω als karakteristieke weerstand heeft een VP van 82 %. Dat betekent dus dat signalen met een snelheid van 82 % van de lichtsnelheid door deze kabel worden getransporteerd, ofwel met een snelheid van 246.000 km/s.

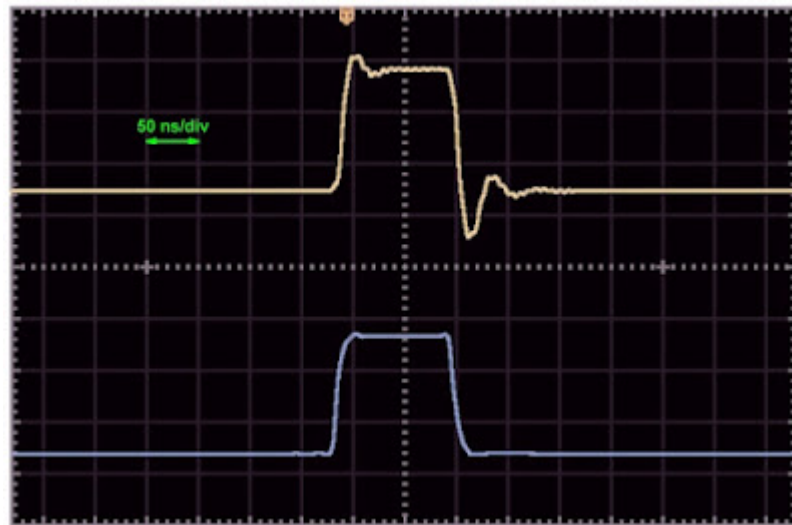
Reflecties en kabelaanpassing

U ziet niet altijd wat u zou moeten zien

Wij hebben een experimentje uitgevoerd. Wij hebben de uitgang van onze pulsgenerator PM5704 van Philips ingesteld op een pulsbreedte van 100 ns en een herhalingsperiode van 1 ms. Wij hebben deze generator door middel van een 50 Ω coaxiale kabel met aan weerszijden BNC-connectors rechtstreeks aangesloten op de ingang van onze oscilloscoop. Wat wij op het scherm te zien krijgen is weergegeven in het gele oscillogram op de onderstaande afbeelding. Een puls die nergens op lijkt en het schijnbare bewijs levert dat onze pulsgenerator defect is. Vervolgens hebben wij dat experimentje herhaald maar nu hebben

wij een 2,5 cm bij 2,0 cm bij 1,5 cm kastje, 'terminator' genoemd, aan onze meetopstelling toegevoegd. Wat op het scherm verschijnt ziet u in het blauwe oscillogram.

Welk van beide experimenten toont de echte uitgangsspanning van de pulsgenerator? Blijkbaar gaat er iets mis als u smalle, snelle pulsen via een coaxiale kabel rechtstreeks verstuurt van een generator naar een oscilloscoop.



Een 100 ns brede puls zonder en met 'terminator'.

(© 2022 Jos Verstraten)

Kabelreflecties en resonanties

Wat er misgaat is een van de voornaamste eigenschappen van coaxiale kabels. Een eigenschap waarmee u bovendien, zoals het bovenstaande experiment aantoont, in de praktijk terdege rekening moet houden: *kabelreflectie en -resonantie*.

Als u een signaal in een coaxiale kabel stuurt zal dit met een bepaalde snelheid naar het andere einde van de kabel reizen. Als het daar aankomt kan het gebeuren dat een deel van dit signaal wordt teruggekaatst naar de ingang van de kabel. Dat verschijnsel heet '*kabelreflectie*' en het ontstaat als u de kabel niet afsluit met een weerstand die exact gelijk is aan de karakteristieke weerstand van de kabel. Alleen als u dat wél doet zal het signaal door de afsluitweerstand volledig worden geabsorbeerd en wordt er niets van het signaal gereflecteerd. Bovendien kunnen aan de uitgang van een niet goed afgesloten kabel allerlei ongewenste resonanties ontstaan.

Het gereflecteerde signaal en de resonanties zullen zich mengen met het signaal dat werd uitgezonden door de pulsgenerator en er verschijnen allerlei volledig onvoorspelbare maar in ieder geval foutieve beelden op het scherm. Op zo'n manier valt te verklaren waarom in het eerste oscillogram zo'n afschuwelijk lelijk signaal op het scherm van de oscilloscoop verschijnt. De uitgang van de pulsgenerator heeft een weerstand van 50 Ω . Deze is aangesloten op een kabel met een karakteristieke weerstand van 50 Ω , niets aan de hand. De kabel wordt echter aangesloten op de ingang van de oscilloscoop die een ingangsweerstand heeft van 1 M Ω . Dat is niet zoals het hoort en de kabel reageert hierop door een deel van het signaal terug te sturen en er nog wat resonanties aan toe te voegen. De oscilloscoop registreert nu niet het originele signaal van de pulsgenerator, maar de menging van dit signaal met het gereflecteerde signaal.

Gebruik altijd een terminator!

U moet een coaxiale kabel **ALTIJD** afsluiten met een weerstand die gelijk is aan de karakteristieke weerstand R_0 van de kabel! Dit probleem kunt u gemakkelijk oplossen door tussen de male BNC-connector van de kabel en de female BNC-connector van uw oscilloscoop een zogenaamde '*50 Ω terminator*' op te nemen. In de onderstaande afbeelding ziet u hoe zo'n ding er uitziet. De drie voorgestelde terminators hebben, volgens de fabrikanten, identieke eigenschappen maar liggen wat prijs betreft ver uit elkaar:

- Links: HZ22 van Rohde&Schwarz voor € 60,00.
- Midden: PL-50 van Rigol voor € 34,00.
- Rechts: P57 van onbekende Chinees voor € 5,75.

In ieder geval raden wij u aan een terminator te kopen die volledig in een metalen behuizing is ondergebracht. Hoewel... het bovenstaande blauwe oscillogram is genomen met een oscilloscoop die is afgesloten met de goedkope Chinese P57. Als u niet super-hoogfrequent met zeer lage signaalniveaus gaat werken kunt u waarschijnlijk met deze goedkope terminator een heel eind komen.



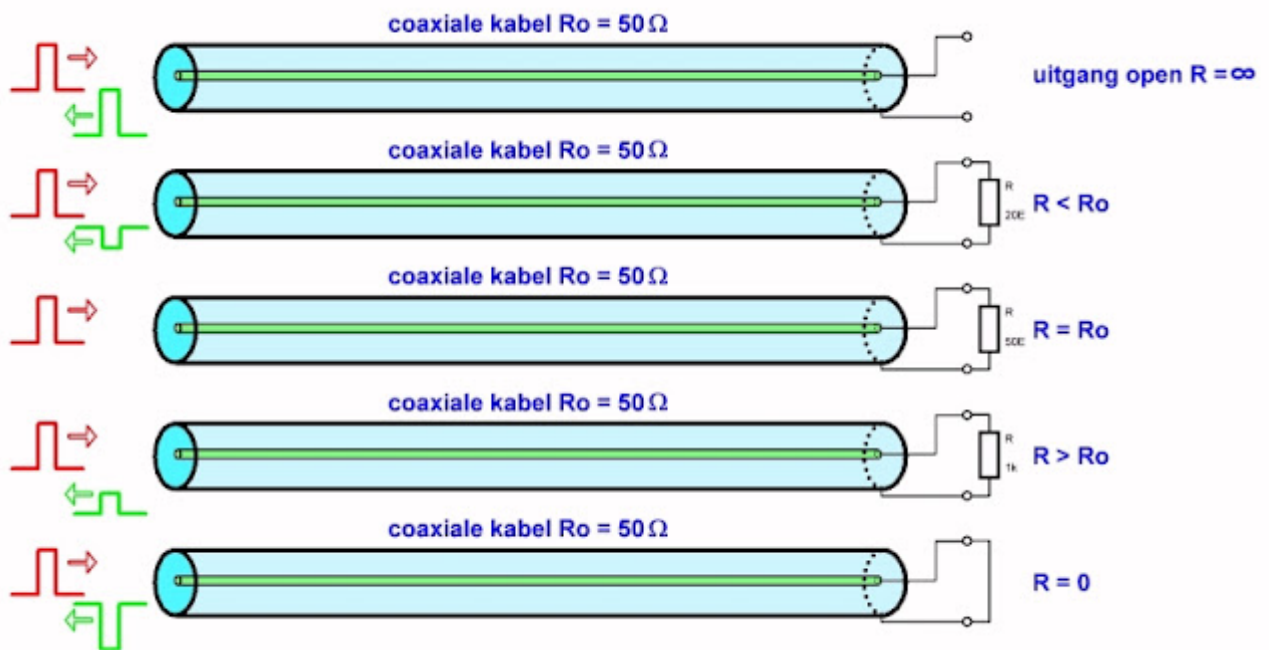
Drie terminators van uiteenlopende prijzen. (© 2022 Jos Verstraten)

Overzicht van de reflectie mogelijkheden

Er bestaan vijf mogelijkheden waarop u een kabel kunt afsluiten:

- De uitgang kortsluiten.
- De uitgang afsluiten met een kleinere weerstand dan R_0 .
- De uitgang afsluiten met een weerstand gelijk aan R_0 .
- De uitgang afsluiten met een grotere weerstand dan R_0 .
- De uitgang open laten.

In de onderstaande figuur hebben wij getekend wat voor soort reflecties u kunt verwachten.



Verskillende manieren om een coaxiale kabel af te sluiten en de optredende reflecties. (© 2022 Jos Verstraten)

Besluit

Coaxiale kabels moet u aan beide einden afsluiten met weerstanden die gelijk zijn aan de karakteristieke weerstand R_0 van de kabel. Doet u dat niet, dan ontstaan er in de kabel ongewenste reflecties en resonanties die u een volledig verkeerd beeld geven van wat er in uw schakeling gebeurt.