

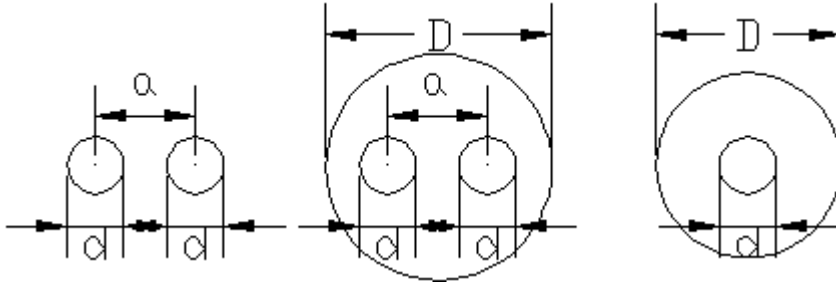
De techniek van kabels

Inleiding

In dit hoofdstuk vind je uitleg over de belangrijkste kabel-eigenschappen. Er zijn wat formules, maar ik heb de eigenschappen ook zoveel mogelijk in grafieken uitgedrukt.

Ik behandel slechts drie typen kabel, twee-aderig onafgeschermd, twisted pair afgeschermd (TwinaX) en coaxiaal c.q. enkeladerig afgeschermd.

N.B. Op dit moment is alleen de coax kabel behandeld. De andere komen later aan de beurt. De principes zijn daar eender, alleen de formules zijn afwijkend.



a is de hartafstand van de aders van een aderpaar.

d is de buitendiameter van het metaal van een ader

D is de binnen diameter van de afschermmantel.

l is steeds de lengte van de kabel, of van het beschouwde deel.

R is de weerstand in Ohm, R' de weerstand per meter lengte (heen en weer)

L is de zelfinductie in Henry, L' de zelfinductie per meter lengte (heen en weer)

C is de capaciteit in Farad, C' de capaciteit per meter lengte (nee, dat gaat niet heen en weer)

De belangrijke materiaaleigenschappen in dit verband zijn:

- ρ : de soortelijk weerstand van een geleider in Ohm per meter.
- μ_r : de relatieve magnetische permeabiliteit van het materiaal in een magnetisch circuit
- μ_0 : de absolute magnetische permeabiliteit van het vacuüm : $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Henry / meter
- ϵ_r : de relatieve dieëlektrische constante van een isolatie materiaal
- ϵ_0 : de absolute dieëlektrische constante van het vacuüm : $8.85 \cdot 10^{-12}$ Farad/meter

Materiaal	ρ (ohm / meter)	μ_r	ϵ_r
lucht	zeer hoog	1	1
koper	0.017	1 (zie noot)	1
zilver	0.016	1	1
goud	0.022	1	1
ijzer	0.13	100 .. 1000	1
mu-metaal	~0.13	1000..30000	1
aluminium	0.03	1 (zie noot)	1
PVC	zeer hoog	1	3.2
PE	zeer hoog	1	ca. 3
Teflon	zeer hoog	1	ca. 6

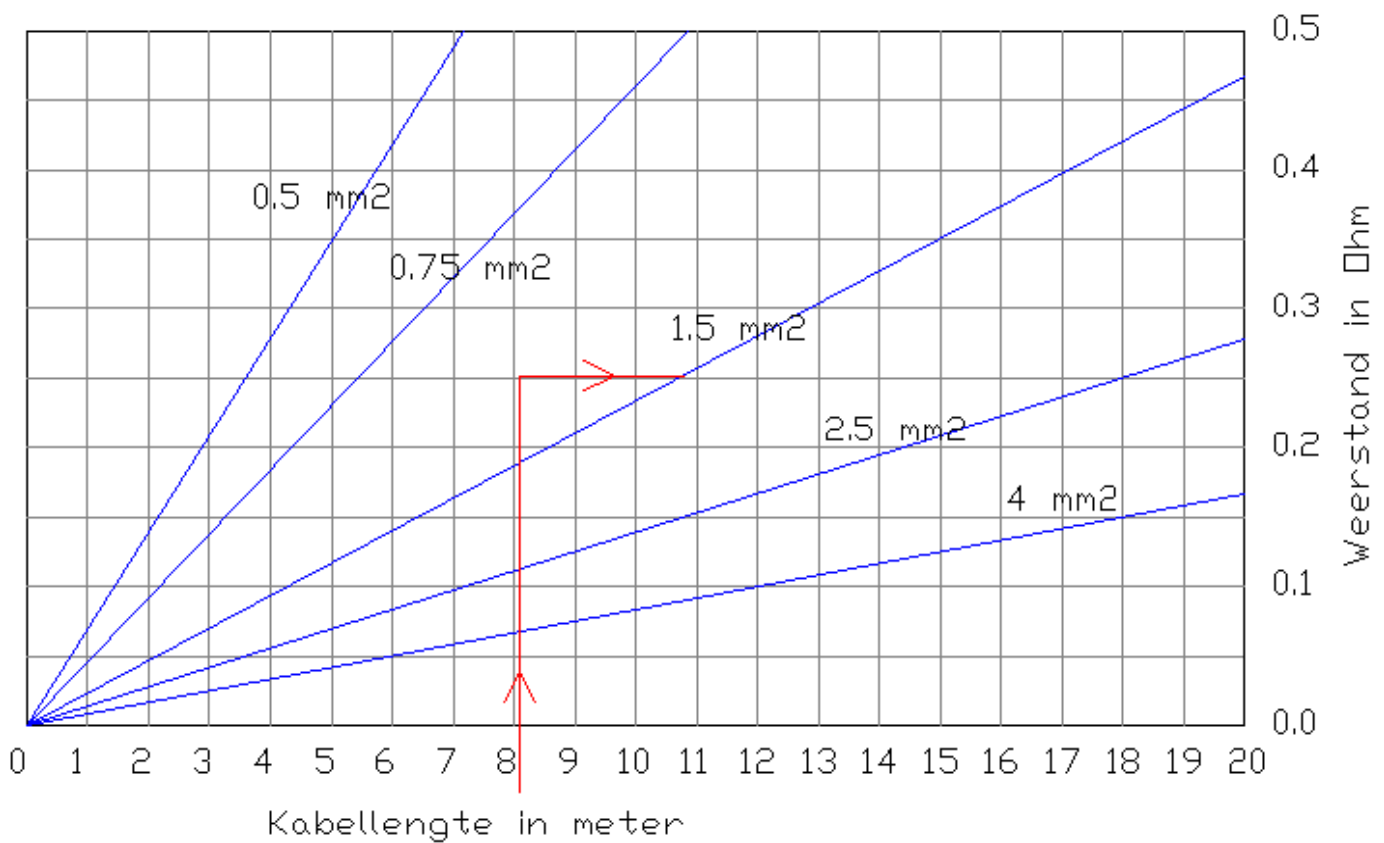
Noot: Bij hogere frequenties iets kleiner dan 1

Weerstand

De weerstand van een kabel wordt bepaald door de aderdoorsnede (de oppervlakte) en de lengte van de kabel. Bij een twee-aderige kabel moet je de lengte twee maal nemen, bij een coax kabel is de weerstand van de mantel meestal flink wat minder dan die van de binnen-ader, zodat je ze apart moet bepalen.

Er geldt de volgende formule: $R = \rho \cdot \text{lengte} / \text{aderdoorsnede}$. Alles in Ohms en (vierkante) meters

Hieronder de grafiek voor koper. Voor andere materialen moet je de waarde vemenigvuldigen met de verhouding van de ρ 's. Het bereik van de grafiek is toegespitst op het bepalen van de benodigde draaddikte voor luidspreker leidingen.



De weerstand is de totale weerstand heen-en terug.

Hoe meet je de weerstand van een gegeven kabel.

Als je flink wat lengte ter beschikking hebt kun je de weerstand met een eenvoudige multimeter bepalen. Sluit 1 einde kort en meet aan het andere eind.

Bij een coax kabel moet je weerstand van de binnen-ader en die van de mantel apart gemeten worden van begin tot eind.

Controleer eerst de nul-instelling van de multimeter door de meetpennen kort te sluiten. Dit moet 0 Ohm opleveren.

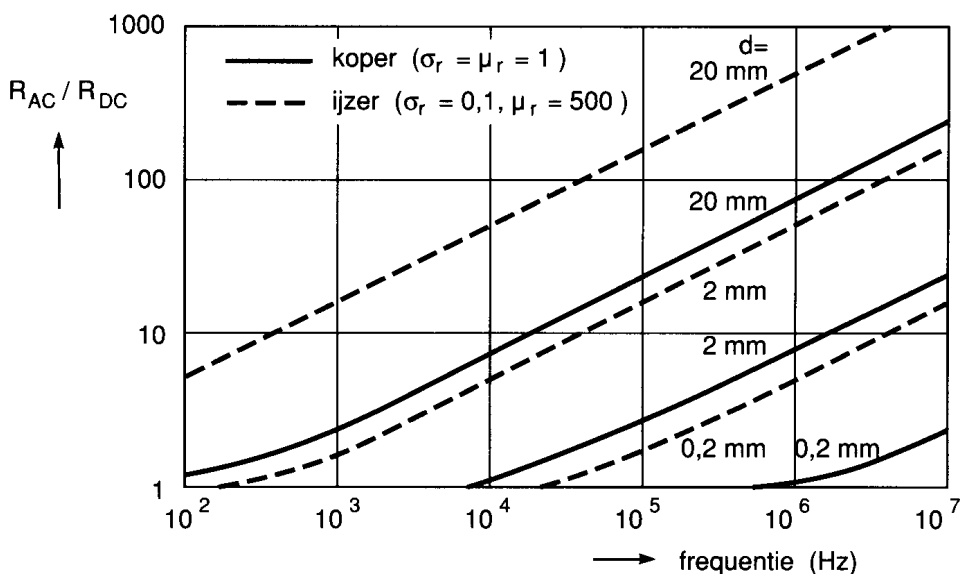
Bij korte kabels is het meetbereik van een multimeter meestal ongeschikt om een goede nauwkeurigheid op te leveren. Je moet dan een bekende gelijkstroom door de kabel sturen en de spanning over de kabel meten. Met de wet van Ohm kun je dan de weerstand berekenen.

Skin-effect

Bij wat hogere frequenties veroorzaakt het magneetveld in de geleider zelf dat de stroom meer in de buitenkant van de draad gaat lopen. Het effect wordt uitgedrukt in de indringing diepte, dat is gezien vanuit de buitenkant van de geleider de diepte waarin 37% van de stroom loopt. ($1/e$)

Het effect hangt uitsluitend af van de rho en de mu van het materiaal.

Hieronder een grafiek van de weerstands-stijging voor verschillende draaddiameters bij ijzerdraad en koperdraad. Let erop dat de verticale as de verhouding tussen de gelijkstroom weerstand en de wisselstroom weerstand aangeeft. Je ziet dat het skin-effect bij een kabel van 2 mm diameter (dat is 3.14 mm²) net bij 10 kHz iets begint te doen



Hoe meet je het skin-effect van een kabel.

Het meten van het skin-effect gaat eigenlijk alleen goed met een network-analyser waarmee je tegelijkertijd het reële en het imaginaire deel van de impedantie kunt zien. Je ziet dan vanaf een bepaalde frequentie het reële deel toenemen. Dat is het skin-effect. Als het imaginaire deel toeneemt is dat de zelfinductie.

Doe de meting heen-en-weer aan een kabel die aan het eind kortgesloten is, zodat je zo weinig mogelijk last hebt van de capaciteit.

Capaciteit

De capaciteit hangt af van de geometrie van de kabel en van de epsilon van het isolatie materiaal.

Voor een coaxiale kabel geldt:

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

Je ziet dat de capaciteit verminderd kan worden door de diameter van de binnen-ader te verkleinen. Helaas wordt daardoor de zelfinductie of de weerstand groter.

Ook het kleiner maken van de epsilon helpt, zonder de zelfinductie te beïnvloeden.

Om die reden zie je soms kabels met schuimplastic als isolatie, of soms soms zelfs voornamelijk lucht. De binnen ader wordt dan op z'n plaats gehouden door een plastic draadje dat er met een grote tussenruimte (spoed) omheen gewikkeld is.

Zelfinductie

De zelfinductie hangt af van de geometrie van de kabel en van de mu-r van het isolatie materiaal. Gezien de materialen die in kabels gebruikt worden is deze laatste bijna altijd 1.

Voor een coaxiale kabel geldt:

$$L' = \frac{\mu_0 * \mu_r * \ln(D / d)}{2 * \pi}$$

Je ziet dat de zelfinductie verminderd kan worden door de binnen ader een grotere diameter te geven. Helaas wordt daardoor de capaciteit groter.

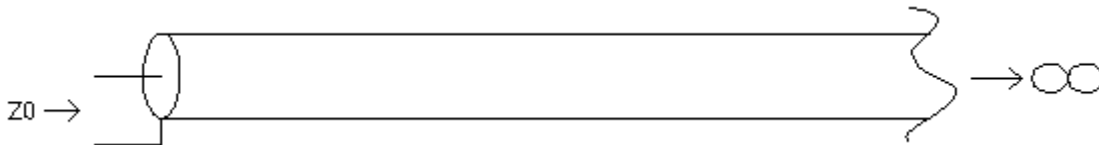
Hoe meet je de zelfinductie van een gegeven kabel.

Het meten van de zelfinductie gaat eigenlijk alleen goed met een network-analyser waarmee je tegelijkertijd het reële en het imaginaire deel van de impedantie kunt zien. Je ziet dan vanaf een bepaalde frequentie het imaginaire deel toenemen. Dat is de zelfinductie. Als het reële deel toeneemt is dat het skin-effect.

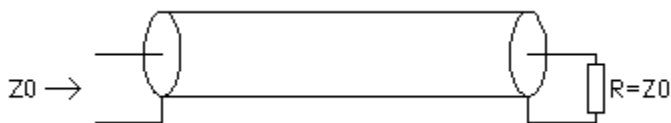
Doe de meting heen-en-weer aan een kabel die aan het eind kortgesloten is, zodat je zo weinig mogelijk last hebt van de capaciteit.

Karakteristieke impedantie

Iedere kabel heeft een karakteristieke impedantie. Dat is de impedantie die je aan de ingang van de kabel "ziet" als die oneindig lang is. Bij een ideale kabel is de K.I. reëel (Ohms, een zuivere weerstand) We noemen de K.I. ook vaak Z₀ (Z - nul)



Als je nu van zo'n oneindig lange kabel een eindig stuk afknijpt en je vervangt de (nog steeds oneindige) rest door een weerstand ter grootte van de K.I. dan ziet dat er vanaf de ingang identiek uit.



De K.I. is niet afhankelijk van de lengte van de kabel. Hij wordt uitsluitend bepaald door de zelfinductie per meter lengte en de capaciteit per meter lengte.

De Ohmse weerstand van de kabel veroorzaakt slechts verliezen. (daarover verderop in dit hoofdstuk)

De karakteristieke impedantie van enkele veel voorkomende kabel typen:

Coaxiale antenne kabel voor kabel-TV e.d.	75 Ohm	vereist
Lint kabel voor TV- en FM-antennes	260 .. 300 Ohm	vereist

Coax-Kabels voor elektronische meet opstellingen	Meestal 50 Ohm	
Eenvoudig lichtnet snoer 2 x 0.75 mm ²	50 .. 200 Ohm	varieert
Lichtnet (stopcontact)	50 .. 200 Ohm	varieert
Standaard signaalkabeltje (veterdrop)	26 Ohm	wel eens zo gemeten
Signaal kabel voor digitaal audio (coax, SP/DIF)	75 Ohm	vereist
Signaal kabel voor digitaal audio (twisted pair, AES-EBU)	110 Ohm	vereist

Als een kabel belast wordt met iets anders dan z'n karakteristieke impedantie zal een deel van het signaal aan het einde reflecteren. Alleen bij de juiste belasting (elektronici noemen dat afsluiten) gaat alle signaal-energie de belasting in.

Van reflecties heb je alleen last als de lengte van de kabel niet meer klein is ten op zichte van de golflengte van het signaal.

Bij 10 KHz hoort een golflengte van ongeveer 30 Km. Bij analoge audio signalen maken we ons dan ook nooit druk om het karakteristiek afsluiten, want de kabels zijn altijd extreem veel korter dan de golflengte.

Digitale audio verbindingen zoals S/PDIF werken op ca. 6 Mhz, dat is een golflengte van ca. 50 meter. Bij een kabellengte van meer dan tien meter mag je je wat zorgen gaan maken.

Bij FM antennes en kabel-TV hebben we met golflengtes van 3 meter tot 70 cm te maken, en bij satelietschotels nog korter. Daar is correct afsluiten en het gebruik van de juiste kabel absoluut nodig.

Het afsluiten gebeurt vrijwel altijd door het apparaat waar het signaal naar toe gaat. Gebruik dus de voorgeschreven soort kabel (en zeker bij hoge frequenties) de goede connector.

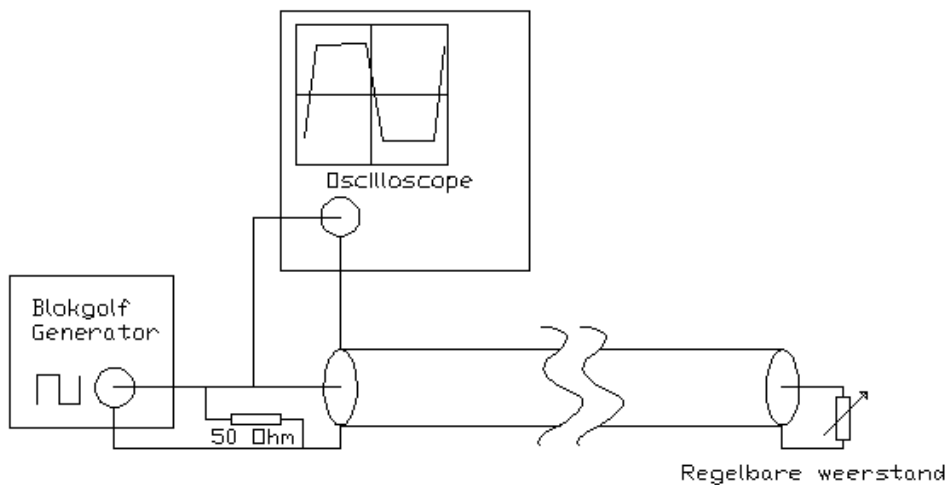
Karakteristiek afgesloten kabels mag je ook nooit zomaar aftakken, om het signaal naar meerdere bestemmingen te sturen. Voor TV/FM-antenne signalen bestaan er speciale splitters, en als het signaal naar veel bestemmingen moet is een tussenversterker gewenst.

Hoe meet je de karakteristieke impedantie van een kabel?

Je kunt de karakteristiek impedantie van een kabel niet direct meten met een multimeter of zo.

Benodigd: blokvolfgenerator, oscilloscoop, variabele weerstand, en een flinke lengte van de te onderzoeken kabel.

De meting berust op het principe dat een correct afgesloten kabel zo goed als geen signaal reflecteert.

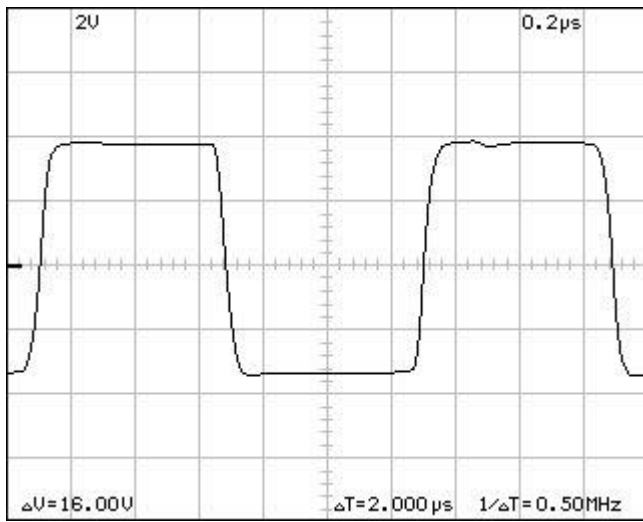


Begin met de variabele weerstand op 0 of op heel groot. Kies de herhalingstijd van de blokvolfgenerator in de buurt van 100 nano-seconden per meter kabel.

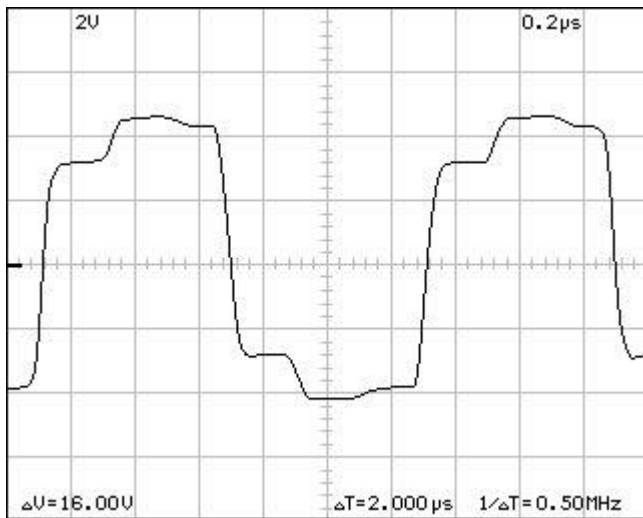
Varieer de weerstand tot je zo weinig mogelijk reflecties ziet

Meet dan de weerstand met een ohmmeter.

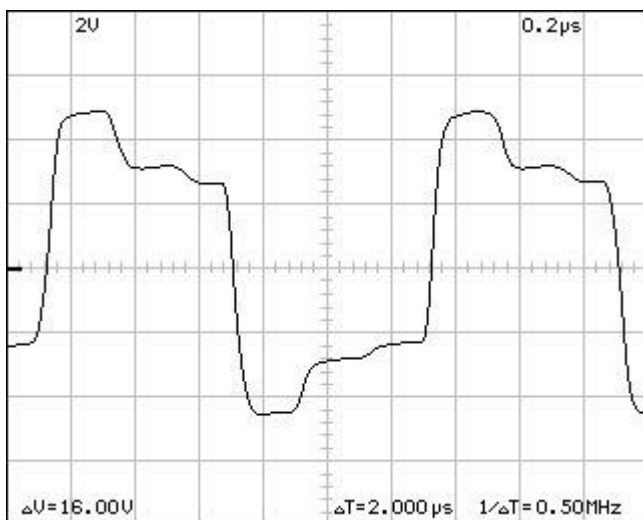
Hieronder zie je wat er op de oscilloscoop te zien was bij een 75 Ohm kabel van 20 meter lengte



Afsluit weerstand correct (75 Ohm)



Afsluit weerstand te groot (200 Ohm)



Afsluitweerstand te klein (ca. 30 Ohm)

Looptijd

In een kabel gaat het elektrische signaal altijd langzamer dan in de vrije ruimte. Elektromagnetische golven gaan met de lichtsnelheid van 300 Km/sec, of 300 meter per microseconde, of 30 cm per nanoseconde.

In het bovenstaande voorbeeld was de kabel 20 meter lang, de heen-en weer looptijd zou dus $40/300 = 133$ usec moeten zijn in de vrije ruimte. We zien echter ca. 200 usec voor de eerste reflectie. Deze verhouding $133/200$ heet de "verkortings factor", en een waarde van 0.65 is heel gebruikelijk.

De verkortings factor hangt alleen af van de epsilon van het isolatie materiaal in de kabel, niet van de kabel geometrie.

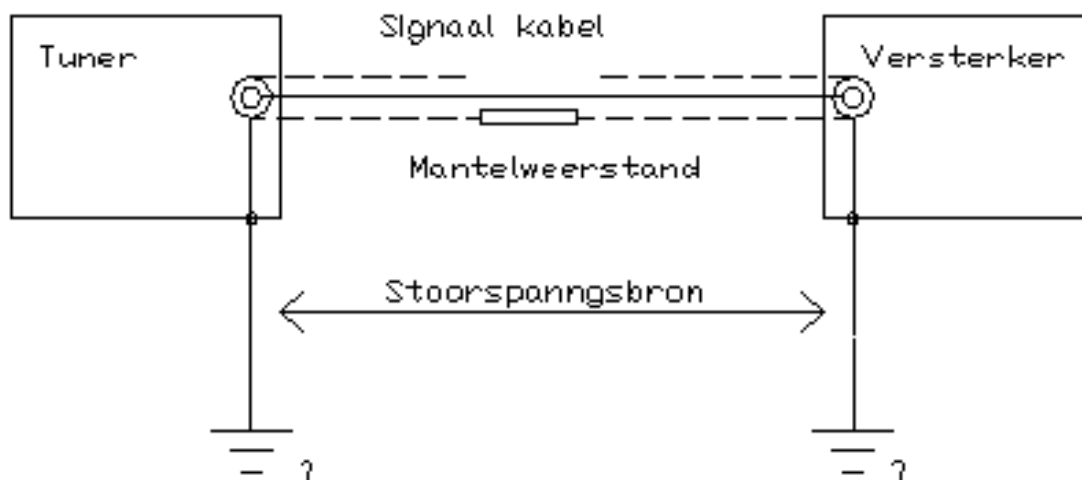
Kabelverliezen

De Ohmse weerstand van de ader(s) en de buitenmantel veroorzaken dat er een signaal verzwakking optreedt. Ook de dielectrische verliezen in het isolatie materiaal veroorzaken signaalverlies bij lange kabels. Al deze verliezen nemen doorgaans toe met de frequentie.

Bij de gebruikelijke kabellengtes in woonhuizen heb je vrijwel nooit last van kabelverliezen, mits je de voor dat doel voorgeschreven kabel soorten gebruikt.

Transfer impedantie

De transfer impedantie is een eigenschap van kabels die vooral van belang is voor het EMC gedrag. Het gaat dan om de mate waarin een ongewenst signaal doordringt in het gewenste signaal. Je kunt dat in het onderstaande schema zien:



Tuner en versterker zijn beide geaard, de tuner bijv. via de antenne aansluiting op het kabelnetwerk, en de versterker op de lokale veiligheids aarde in je meterkast. Het komt veelvuldig voor dat er tussen die twee "aardes" een spanningsverschil bestaat, bijna altijd een 50 Hz lichtnet signaal.

Omdat de mantelweerstand van de signaalkabel altijd groter is dan nul blijft er een stoorspanning staan tussen de chassis' van de tuner en de versterker, en die stoorspanning telt op bij het gewenste (tuner) signaal. Resultaat: je hoort een brom- of zoem geluid door de muziek heen.

In dit voorbeeld vertegenwoordigt de mantelweerstand de transfer impedantie. Het is stellig zo dat hoe kleiner die transfer impedantie is, hoe kleiner het stoor probleem.

Maar let op! (voor dat je een signaalkabel met een betere transfer impedantie gaat kopen) Het verlagen van de transfer impedantie heeft alleen effect als je die beduidend kleiner kunt maken dan de bron impedantie van de stoorspanningsbron. En bij dit -meest voorkomende- aardlus probleem is die bronimpedantie meestal heel erg klein, vaak ruim minder dan 1 Ohm. Aardleidingen moeten nu eenmaal een erg lage weerstand hebben. De praktijk leert dat het enige wat goed werkt is het "ontaarden" van 1 van de apparaten. Het meest voor-de-hand-liggend is hier om de antenne aansluiting van de tuner galvanisch te scheiden van het kabelnetwerk d.m.v. een ferriet-koppeltrafo'tje.

Een andere methode om storing te vermijden is het gebruik van symmetrische verbindingen. De meest voorkomende toepassing daarvan is de symmetrische microfoon kabel.

In de EMC literatuur wordt het begrip transfer-impedantie veel uitgebreider beschreven, want bij frequenties boven zo'n 100 kHz gaan zelfinducties de hoofdrol spelen, en wordt vooral de koppeling tussen de zelfinductie van de mantel en die van de binnen-ader doorslaggevend. Hoe beter die koppeling, hoe lager de T.I. De koppeling kan verbeterd worden door de kabel door een ferrietkraal te leiden. Een toepassing van dit principe zie je aan de achterkant van je PC-monitor, die knobbels in de video kabel.

Ook spelen capaciteiten soms een rol. Ik ga daar niet verder op in; voor analoge audio signalen zijn de eigenschappen bij die hoge frequenties volstrekt oninteressant, en voor digitale audiosignalen spelen ze alleen een rol m.b.t. de emissie van stoorsignalen die de ontvangst van radio of TV zouden kunnen beïnvloeden. Op de geluidskwaliteit heeft e.e.a. volstrekt geen effect.

Als je meer wilt weten over de transfer-impedantie van kabels en het effect daarvan op het EMC gedrag bij hogere frequenties dan kan ik je het boek van J.J. Goedbloed aanbevelen.

Kijk ook in het hoofdstuk over storing bij "aardlussen"

Microfoon kabels

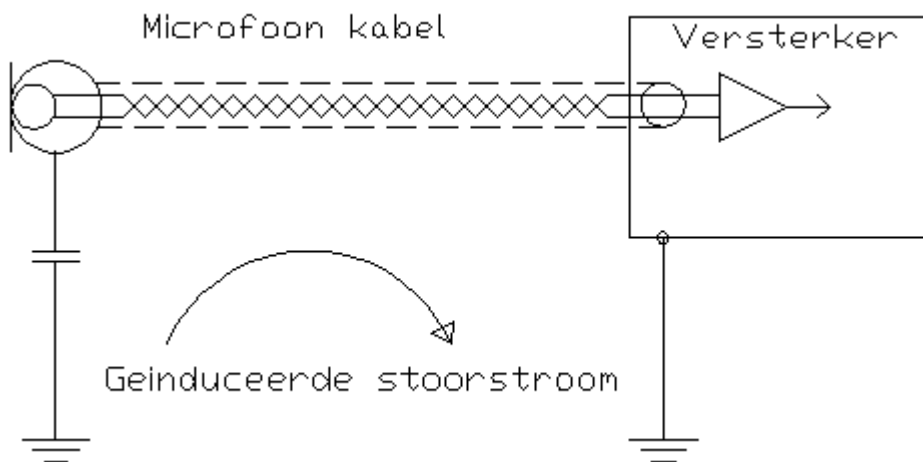
Microfoons en geluid opnemen valt weliswaar buiten het bestek van mijn website, maar ik noem het hier toch omdat er een goed voorbeeld in zit voor het omgaan met stoorsignalen op lange, gevoelige verbindingen.

Kenmerkend voor microfoon kabels is dat het steeds gaat om zeer zwakke signalen die meestal over flinke afstanden (tientallen meters) getransporteerd moeten worden. Niet zelden zijn er ook nogal wat potentiële stoorbronnen in de omgeving, zoals dimmers voor het (theater) licht, die nogal wat storing "in de band" kunnen produceren.

De praktijk heeft (al decennia lang) geleerd dat het ondoenlijk is om de transfer impedantie van de microfoon kabel zo laag te maken dat er geen stoort problemen optreden.

Er bestaat echter een zeer goede methode om deze problemen te ondervangen: Het symmetrische ader paar in een afscherming.

Je ziet het elementaire schema hieronder:



Er zijn enkele belangrijke aspecten om het goed te laten werken.

1. Het feitelijke microfoon kapsel moet elektrisch geheel vrij liggen van de afscherming.
2. Het microfoon kapsel moet symmetrische parasitaire impedanties hebben.
3. De versterker moet volstrekt "differentieel" zijn. D.w.z. hij moet alleen signalen tussen de microfoonleidingen onderling versterken, en ongevoelig zijn voor signalen die tussen "aarde" of het chassis en de microfoon leidingen staan, ook voor de hoogste audio frequenties.
4. Het aderpaar binnen de afscherming moet in elkaar gedraaid zijn (getwist / twisted pair) ca. 3 x per decimeter lengte om de invloed van magneetvelden te beperken.
5. Desondanks moet je microfoon kabels liever niet in dezelfde kabelgoot leggen als de power kabels naar de theater lampen e.d.

Voorwaarden 2 en 3 werden vroeger meestal bereikt met een "symmetrische transformator" die vaak ook nog een impedantie transformatie deed. Op modernere mengtafels zien we voorversterkers die voldoende onderdrukking van gemeenschappelijke signalen (common mode rejection) hebben.

De getekende stroom zal vooral door de mantel lopen als er capacatieve inductie is. Bij magnetische inductie van een stoorsignaal wordt er ook een signaal opgewekt in het aderpaar, maar door het in elkaar draaien (twisten) is die inductie in beide aders in hoge mate gelijk, en zal de differentiele versterker het niet of nauwelijks "zien".

Overspraak

Onder overspraak bij kabels verstaan we het verschijnsel dat het (gewenste) signaal dat door een kabel loopt gedeeltelijk terecht komt in een andere kabel, en daar ongewenst is. (er zijn diverse andere manieren waarop overspraak kan plaatsvinden, maar hier gaat het alleen over kabels).

Eigenlijk is overspraak in kabels niet meer dan een bijzonder geval van de aardlus, of een te grote transfer impedantie. In algemene zin is het een EMC probleem, en dient ook zo behandeld te worden.

In de analoge audio techniek hebben we vrij zelden te maken met overspraak door kabeleigenschappen, maar er zijn enkele situaties waarin er op gelet moet worden:

- Luidspreker kabels: Het is gelukkig ongebruikelijk, maar haal het dan ook niet niet in je hoofd om de retourleidingen van luidsprekers van verschillende groepen (links / rechts, of je 5.x systeem te combineren in een multi-ader-kabel o.i.d. Elke luidspreker-(groep) moet z'n eigen retourleiding naar de versterker hebben.
- Vinyl platenspelers met een "Moving Coil" element. Zulke elementen en de bijbehorende voorversterkers of impedantie trafo's hebben veelal een zeer lage impedantie van soms enkele Ohms. Als de mantels van de linker en rechter signaal kabel ook in de platenspeler of bij het element in de arm met elkaar verbonden zijn is er een potentieel overspraak probleem. Zie signaalkabels bij vinyl platenspelers.