

4 Stoorsignalen, aarding en afscherming

Verbindingslijnen vormen een belangrijke bron voor ruis(opname) in meetsystemen. Wanneer de 'communicatielijnen' verkeerd uitgevoerd zijn, kunnen elektrische stoorsignalen van motoren, van een elektrische storm of van nabij gelegen elektronische uitrusting opgevangen worden. Dit stoorsignaal is dan niet meer van het meet- of controlesignaal te onderscheiden.

Afscherming en een juiste aarding van de meetkring moet het opvangen van stoorsignalen zoveel mogelijk onderdrukken. De volgende paragrafen bespreken eerst de invloed van het stoorsignaal in Norton- en Thévenin-equivalente meetkringen. Vervolgens komen de stoorbronnen aan bod, waarbij bijzondere aandacht gaat naar een juiste aarding van de meetkring. De laatste paragraaf bespreekt de mogelijke technieken om storingen te onderdrukken of te vermijden.

4.1 Invloed van het stoorsignaal op de meetkring

Paragrafen 3.1 en 3.2 geven aan hoe een meetsysteem voorgesteld kan worden door haar Norton- of Thévenin-equivalent. In een industriële omgeving echter staan bron en opnemer vaak enkele 100 m uit elkaar en kunnen ruis- of stoorsignalen aanwezig zijn, waardoor bijkomende meetfouten ontstaan.

Figuur 1.17 toont een spanningstransmissiesysteem welk onderworpen is aan een verschilmode stoorspanning (Eng.: Serie Mode interference). De stoorspanning V_{SM} staat in serie met de meetsignaalspanning E_{Th} . De stroom i doorheen de belasting van de opnemer is

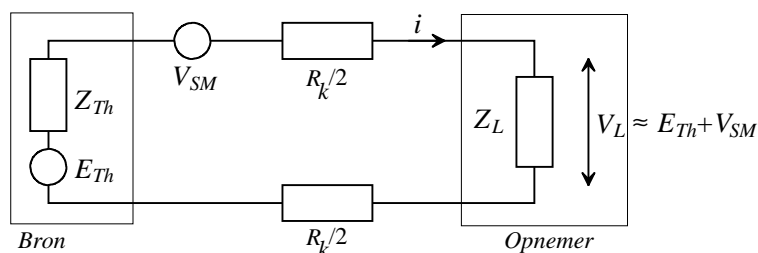
$$i = \frac{E_{Th} + V_{SM}}{Z_{th} + R_k + Z_L}$$

en de overeenstemmende spanning over de belasting is

$$V_L = Z_L i = \frac{Z_L}{Z_{th} + R_k + Z_L} (E_{Th} + V_{SM})$$

Normaal nemen we $Z_L \gg Z_{Th} + R_k$, zodat $V_L \approx E_{Th} + V_{SM}$.

Dit betekent dat in een spanningsmeetsysteem de meetfout gelijk is aan het volledig (verschilmode) stoorsignaal.



Figuur 1.17: Verschilmode stoorspanning in spanningsmeetkring.

De verhouding van meet- tot stoorsignaal of ruis S/N in dB (Eng.: Signal to Noise ratio) is:

$$\frac{S}{N} = 20 \log \left(\frac{E_{Th}}{V_{SM}} \right) \text{ waarbij } E_{Th} \text{ en } V_{SM} \text{ de RMS waarden zijn van de spanningen.}$$

Als bijvoorbeeld $E_{Th} = 1$ volt en $V_{SM} = 0,1$ volt, dan is $S/N = +20$ dB.

Figuur 1.18 toont een stroomtransmissiesysteem welk onderworpen is aan de verschilmode spanning V_{SM} . De (Norton-) stroom i_N verdeelt zich over de twee takken, bestaande uit de stroombronimpedantie Z_N en de belasting Z_L . De stroom i doorheen de opnemer ten gevolge van de bron is:

$$i = i_N \frac{Z_N}{Z_N + R_k + Z_L}$$

Daarenboven vloeit er een stoorstroom doorheen de opnemer:

$$i_{SM} = \frac{V_{SM}}{Z_N + R_k + Z_L}$$

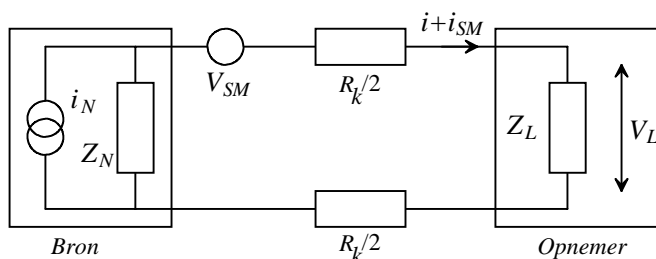
De totale spanning over de opnemerimpedantie is nu:

$$V_L = iZ_L + i_{SM}Z_L = i_N Z_L \frac{Z_N}{Z_N + R_k + Z_L} + V_{SM} \frac{Z_L}{Z_N + R_k + Z_L}$$

Normaal nemen we $R_k + Z_L \ll Z_N$ om een maximale stroomoverdracht te realiseren. Onder deze voorwaarden geldt:

$$V_L \approx i_N Z_L + V_{SM} \frac{Z_L}{Z_N}$$

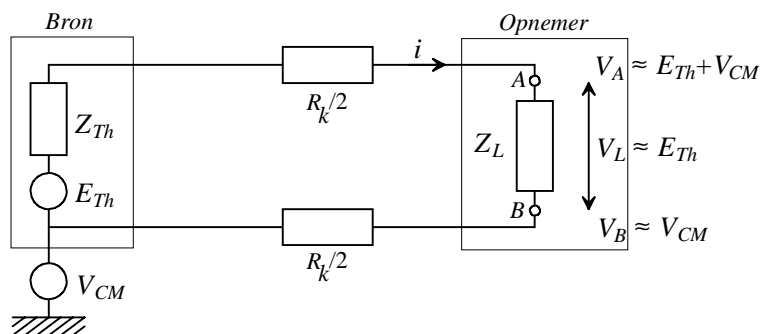
Vermits $Z_L / Z_N \ll 1$, zal bij een stroommeetkring slechts een klein deel van de stoorspanning V_{SM} als meetfout door de opnemer worden waargenomen. Een stroommeetkring is dus beter bestand tegen verschilmode stoorspanningen dan een spanningsmeetkring. Daarom is het vaak beter het spanningsmeetsignaal eerst om te zetten in een stroomsignaal alvorens het door te zenden.



Figuur 1.18: Stroommeetkring met verschilmode stoorspanning.

Figuur 1.19 toont tenslotte een spanningsmeetkring welke onderworpen is aan een sommode stoorspanning V_{CM} (Eng.: Common Mode interference). De potentialen van beide kanten van de

meetkring worden verhoogd met V_{CM} relatief t.o.v. de gemeenschappelijke aardpotentiaal. De spanningsval over de opnemerimpedantie blijft dan ongewijzigd. De sommode spanning heeft bijgevolg geen invloed op de meting. Er bestaat echter de mogelijkheid dat de sommode spanning wordt omgezet in een verschilmode spanning, bijvoorbeeld door meerdere (verkeerde) aardingspunten (zie later).



Figuur 1.19: Sommode spanning in spanningsmeetkring.

4.2 Stoorbronnen

Mogelijke stoorbronnen zijn:

- ♦ Thermische ruis
- ♦ AC- (DC-) vermogenkringen
- ♦ Vermogenschakelingen en TL-verlichting
- ♦ Radiozenders, lasapparatuur ...

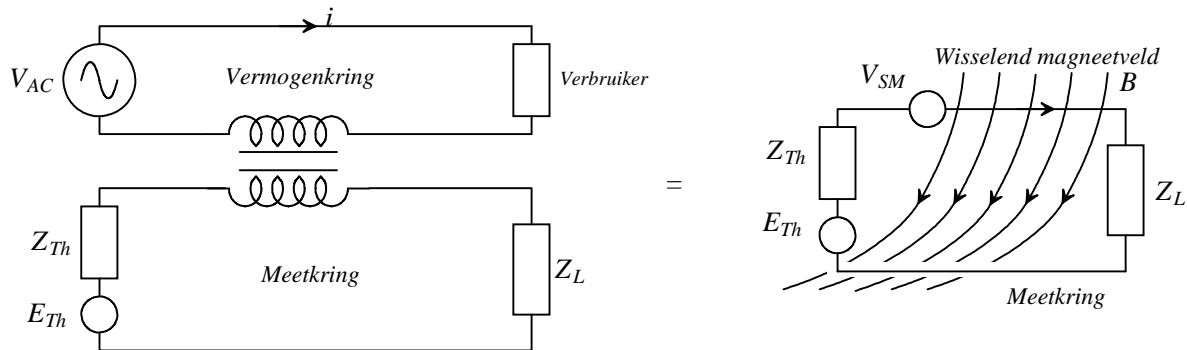
Thermische ruis is witte ruis (uniform over alle frequenties) welke in amplitude proportioneel is met de absolute temperatuur van bijvoorbeeld de geleider. Ze ontstaat door de willekeurige beweging van de ladingdragers. Nabijgelegen AC-vermogenkringen (240V, 50 Hz), zoals distributielijnen en zware elektrische machines, veroorzaken wisselstoorsignalen (Eng.: pick-up of hum). DC-vermogenkringen daarentegen veroorzaken zelden stoorsignalen omdat deze niet capacitief of elektromagnetisch met de meetkring gekoppeld kunnen worden. Geduchte stoorbronnen zijn hoog vermogen thyristor-brug-schakelingen. Radiozenders en lasapparatuur veroorzaken stoorsignalen in het MHz bereik.

4.3 Koppelmechanismen

Figuur 1.20 toont de *inductieve of elektromagnetische* koppeling tussen het meetsysteem en de nabijgelegen vermogenkring. Indien beide kringen voldoende dicht bij elkaar liggen bestaat er een aanzienlijke wederzijdse inductantie M . Dit houdt in dat een wisselstroom i in de vermogenkring een verschilmode stoorspanning in de meetkring induceert:

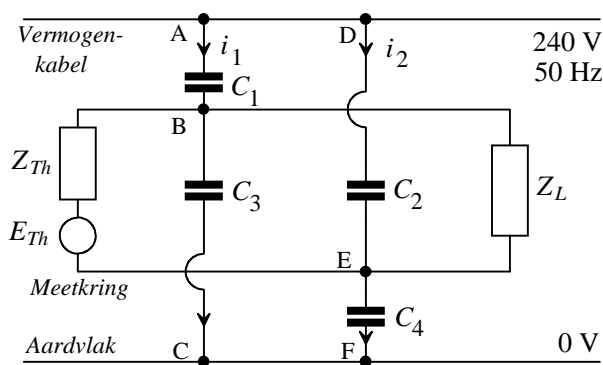
$$V_{SM} = M \frac{di}{dt}$$

De wederzijdse inductantie M hangt af van de geometrie van de twee kringen, maar is verdeeld over de volledige lengte van de meetkring, in tegenstelling tot de enkelvoudige symbolische spoelen uit figuur 1.20. Merk op dat inductieve koppeling ook voorkomt als de meetkring volledig van de aarde geïsoleerd is.



Figuur 1.20: Elektromagnetische koppeling van stoorsignaal.

Een ander belangrijk koppelmechanisme is *elektrostatische of capacitieve* koppeling, weergegeven in figuur 1.21. De figuur toont een meetkring in de nabijheid van een 240 V lijn (RMS relatief t.o.v. aarde). De vermogenkabel, het aardvlak en de signaallijnen zijn allemaal geleiders. Zij vormen onderling capaciteiten. Deze capaciteiten zijn verdeeld over de volledige lengte van het meetsysteem, maar worden in de figuur door enkelvoudige equivalente capaciteiten voorgesteld. C_1 en C_2 zijn de capaciteiten tussen vermogenkabel en signaallijnen, en C_3 en C_4 zijn de capaciteiten tussen signaallijnen en het aardvlak. Alle vier de capaciteiten zijn evenredig met de lengte van de kabels.



Figuur 1.21: Elektrostatische koppeling.

Indien we de signaalspanning E_{Th} even buiten beschouwing laten, worden de potentiaalwaarden in B en E bepaald door de spanningsdelers ABC en DEF :

$$V_B = 240 \left[\frac{1/(j\omega C_3)}{1/(j\omega C_1) + 1/(j\omega C_3)} \right] = 240 \left[\frac{C_1}{C_1 + C_3} \right]$$

$$V_E = 240 \left[\frac{1/(j\omega C_4)}{1/(j\omega C_2) + 1/(j\omega C_4)} \right] = 240 \left[\frac{C_2}{C_2 + C_4} \right]$$

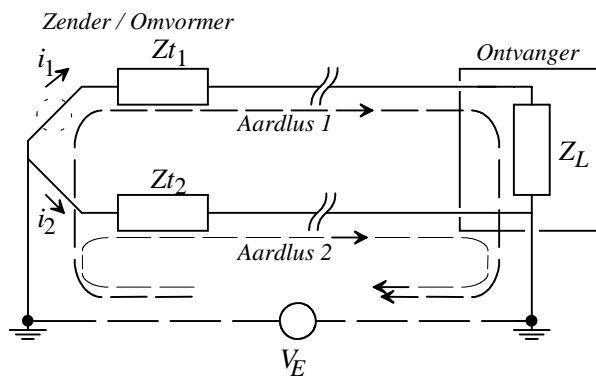
De sommode stoorspanning $V_{CM} = V_E$ en de verschilmode stoorspanning is:

$$V_{SM} = V_B - V_E = 240 \left[\frac{C_1}{C_1 + C_3} - \frac{C_2}{C_2 + C_4} \right]$$

Dit wil zeggen dat er geen verschilmode storing is bij een perfect evenwicht tussen de koppelcapaciteiten: dit is bij $C_1 = C_2$ en $C_3 = C_4$. In de praktijk zal er echter steeds een zekere onbalans bestaan ten gevolge van minimale afstandsverschillen tussen signaallijnen en vermogenkabel / aardvlak.

4.4 Aarding

Tot nu toe hebben we verondersteld dat de aardpotentiaal overal 0 volt bedraagt. Zware elektrische machines en elektrische stormen brengen echter stromen teweeg die doorheen de aarde vloeien en waardoor verschillende potentialen ontstaan op verschillende punten van het aardvlak. Indien de meetkring volledig geïsoleerd is van de aarde, is er geen probleem. In de praktijk kan er echter een verbinding zijn (bijvoorbeeld via een lekweerstand) met de aarde aan de bron en aan de kant van de ontvanger. Indien de twee aardingspunten verschillende potentialen hebben, dan ontstaan er sommode en verschilmode spanningen in de meetkring. Figuur 1.22 illustreert het probleem van meerdere aardingspunten.



Figuur 1.22: Aardlussen door dubbele aarding.

Door de dubbele aarding van de meetkring ontstaan twee aardlussen. Ten gevolge van de spanning V_E vloeien hierin de stromen i_1 en i_2 . Deze stromen zijn niet gelijk en veroorzaken dus een verschillende potentiaalval over Z_{t1} en Z_{t2} , hetgeen overeenstemt met een verschilmode spanning.

Bijvoorbeeld: neem $V_E = 1 \text{ V}$, $Z_{t1} = Z_{t2} = 10 \text{ } \Omega$, $Z_L = 10^6 \text{ } \Omega$. De spanningsvallen over Z_{t1} en Z_{t2} zijn: $V_1 \approx 10 \text{ } \mu\text{V}$ en $V_2 = 1 \text{ V}$. De sommode spanning $V_{CM} = 0 \text{ V}$, de verschilmode stoorspanning $V_{SM} = 1 \text{ V} - 10 \mu\text{V} \approx 1 \text{ V}$. De volledige aardspanning V_E komt als fout in de meting. Dit is enkel zo, omdat beide aardingsweerstand gelijk aan nul verondersteld worden. Reken zelf eens uit hoe groot de verschilmode spanning is indien beide aardingsweerstand gelijk zijn aan $5 \text{ } \Omega$. (Oplossing $V_{SM} \approx 0,5 \text{ V}$).

In dit voorbeeld is de bronspanning buiten beschouwing gelaten om enkel het effect van de aardlus in rekening te brengen.

Indien één van beide aardingspunten verbroken wordt of vervangen wordt door een zeer grote lekweerstand, wordt de aardspanning V_E een sommode stoorspanning welke slechts een zeer beperkte invloed heeft op de meting.

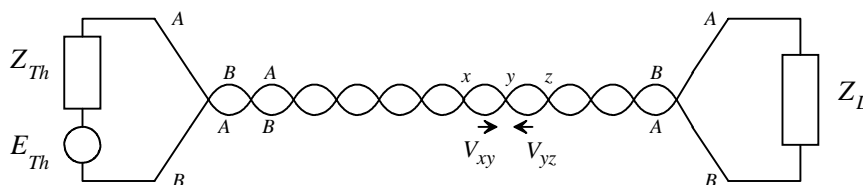
4.5 Methoden om stoorspanningen uit het meetsysteem te houden

Fysische scheiding

Vermits wederzijdse inductanties en parasitaire capaciteiten tussen vermogenkring en meetsysteem omgekeerd evenredig zijn met de afstand tussen beide kringen, moet deze afstand zo groot mogelijk zijn

Elektromagnetische afscherming - 'Twisted pairs'

De meest eenvoudige manier om elektromagnetische koppeling met een externe stoorbron te verminderen bestaat in het gebruik van 'twisted pairs' verbindingen, zoals aangegeven in figuur 1.23. De grootte van de stoorspanning opgewekt in twee opeenvolgende 'lussen' is gelijk in amplitude, maar tegengesteld in teken. De stoorspanningen heffen elkaar dus op. Of ook: daar de as van beide signaallijnen gelijk is zal de stoorinvloed op beide lijnen ook gelijk zijn. De verschilmode stoorspanning is dan in het ideale geval gelijk aan nul.



Figuur 1.23: Vermindering van elektromagnetische koppeling door 'twisted pairs'.

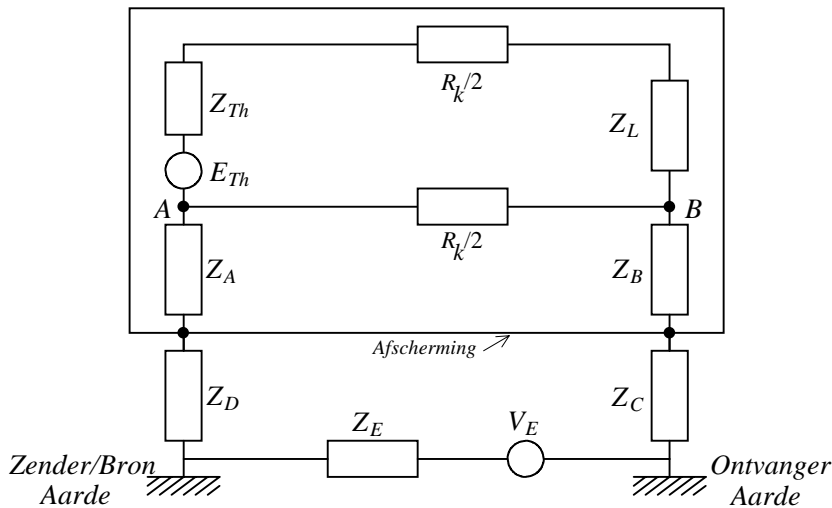
(Elektrostatische) afscherming (Eng.: Screening)

De beste manier om capacitieve koppeling te vermijden is het meetsysteem te omsluiten met een geaarde metalen afscherming. De afscherming is rechtstreeks verbonden met de aarde. Er is geen onmiddellijke verbinding tussen afscherming en meetkring. Eventuele stoorspanningen en -stromen worden door de afscherming naar de aarde afgeleid.

Het ideale meetsysteem is er dan een dat volledig geïsoleerd is van de afscherming en waarbij de afscherming slechts in één enkel punt geaard is. De realisatie van zulk een geheel is vaak onmogelijk omwille van de volgende redenen:

- Het meetsysteem kan van die aard zijn dat de sensor (of zender) rechtstreeks met de aarde verbonden is: bv. een thermokoppel in een smeltbad welk geaard is.
- De ontvanger kan rechtstreeks verbonden zijn met de aarde, bv. in een computer gebaseerd systeem, waar aarding noodzakelijk is om grote statische spanningen te vermijden.
- Er kunnen ook onrechtstreekse verbindingen met de aarde zijn via lekweerstand.

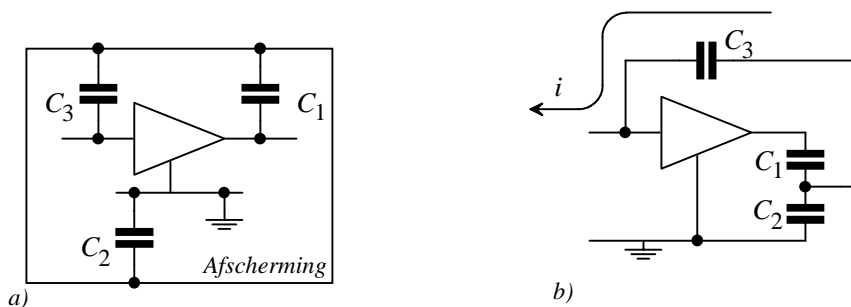
Merk op dat, ook indien er geen rechtstreeks zuiver resistief pad bestaat, er steeds een parasitaire capaciteit gedacht kan worden tussen twee geleiders. Dit geeft volgend algemeen schema voor een eenvoudig afgeschermd meetsysteem (figuur 1.24).



Figuur 1.24: Afscherming van een meetsysteem.

Om in bovenstaande figuur laagimpedante gesloten paden te vermijden en toch een aarding van de afscherming, om stoorstromen af te leiden, te verzekeren, moet de impedantie van hetzij Z_D , hetzij Z_C , maar niet beide, zeer klein zijn, en moet de impedantie van Z_A of Z_B (eventueel beide) zeer groot zijn.

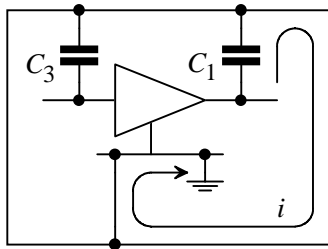
Bij elektronische meetapparatuur moeten we deze regels verder verfijnen! De introductie van een scherm (of schild) rond een operationele versterker heeft immers ook enkele nadelige effecten. Figuur 1.25.a toont een afgeschermd operationele versterker met de afschermingscapaciteiten t.o.v. de ingang, de uitgang en de grond, voorgesteld door individuele capaciteiten. Figuur 1.25.b geeft een equivalent schema.



Figuur 1.25: a) Versterker met afscherming en b) equivalent schema.

De capaciteiten C_1 en C_2 vormen een belastingimpedantie voor de versterker. De spanning tussen de twee impedanties in serie, dit is ter hoogte van de afscherming, is $V_{uit} \cdot Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ (met Z_1 en Z_2 de impedanties van de capaciteiten C_1 en C_2). Deze spanning wordt teruggekoppeld over capaciteit C_3 naar de ingang van de versterker. Door deze terugkoppeling zal de versterking bij hoge frequenties verzwakken, hetgeen een zeer ongewenst neveneffect is van afscherming. Om

dit neveneffect te onderdrukken moeten we het schild aarden, zoals weergegeven in figuur 1.26, waardoor het terugkoppelpad 'onderbroken' wordt.

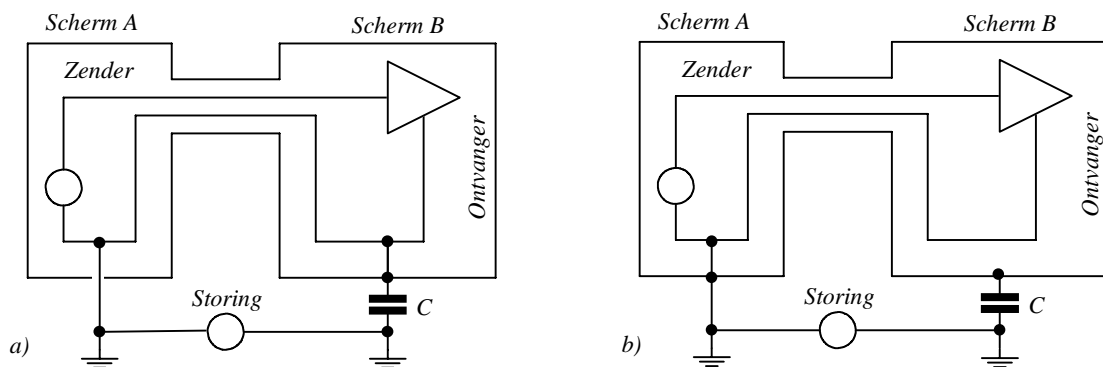


Figuur 1.26: Juiste aarding van afscherming elimineert ongewenste terugkoppeling.

Weerom moet de afscherming geaard zijn, maar ditmaal niet om externe storingen af te leiden maar wel om intern geen ongewenste neveneffecten op te wekken. Dit geeft de eerste regel van Morrison (1977) met betrekking tot aarding en afscherming:

De afscherming van een elektronische schakeling moet verbonden worden met de signaal nullijn (aarde) van deze schakeling om ongewenste terugkoppelingen, geïntroduceerd door de afscherming, te verminderen of te elimineren.

Indien de aarde of de nullijn overal dezelfde potentiaal zou bezitten, zou deze eerste regel volstaan. Dit is echter niet noodzakelijk het geval, zoals we reeds eerder vermeld hebben bij de bespreking van aardlussen. Algemeen geldt dat een stroom doorheen de referentie- of nullijn van de schakeling zoveel mogelijk vermeden moet worden. Dit is vooral van belang bij lange transmissielijnen. Neem als voorbeeld de schakeling uit figuur 1.27.



Figuur 1.27: a) Foutieve en b) juiste aarding van scherm.

Door de parasitaire capaciteit C tussen aarde en scherm B ontstaat er een gesloten lus. In figuur a) omvat deze gesloten lus de referentie-signaallijn. In figuur b) niet! De stroom zal in de schakeling van figuur a) een spanningsval veroorzaken in de signaal-nullijn met een meetfout tot gevolg. In de schakeling van figuur b) loopt de eventuele stroom over het scherm en blijven de signaallijnspanningen onveranderd. De tweede regel van Morrison zegt daarom:

Het scherm moet met de aarde verbonden worden in het aardingspunt van de (nul-) referentielijn.

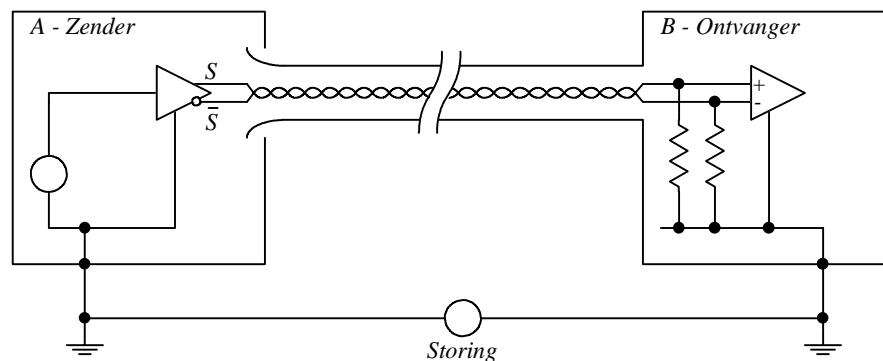
Alhoewel in figuur 1.27.b) scherm *A* verbonden is met de aarde, samen met de nullijn, dit is beide aardingspunten aan de kant van de zender, mogen deze beide verbindingen ook naar de kant van de ontvanger verschuiven (of dus naar scherm *B*).

Gebalanceerde verbindingen

Wanneer zender en ontvanger enkele honderden meters van elkaar staan is de opstelling uit figuur 1.27.b) niet meer aangewezen. Scherm *B* kan dan een potentiaalverschil vertonen t.o.v. de lokale aarde, hetgeen gevaarlijk is. Daarom moeten de schermen zowel aan de kant van de zender als aan de kant van de ontvanger geaard worden. Beide schermen mogen dan echter niet meer doorverbonden worden door de afscherming rond de transmissiekabel (hetgeen een klassieke BNC connector steeds doet). Zo zou immers een gesloten aardlus ontstaan over de afscherming. In deze aardlus zouden de stoorsignalen weliswaar over de afscherming vloeien en niet door de signaallijnen, maar door de grote afstand kunnen de opgewekte stromen, bv. bij een elektrische storm, zeer groot worden en schade aanrichten.

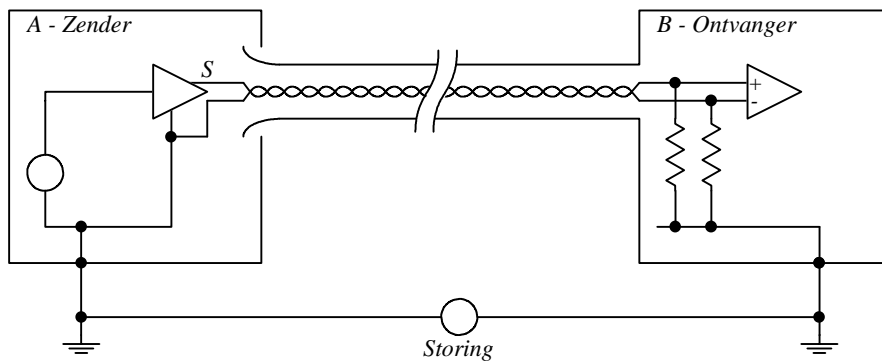
Ook voor de transmissielijnen welke over een grote afstand lopen dienen er extra voorzorgsmaatregelen genomen te worden. De mogelijke manieren om elektrische storingen te vermijden zijn o.a. het gebruik van *optische signaallijnen*, van *optische ont koppeling* of van *gebalanceerde zenders en ontvangers*.

We bespreken in deze cursus enkel de laatste (en goedkoopste) optie. Figuur 1.28 geeft de opstelling weer.



Figuur 1.28: Juiste verbinding bij gebruik van gebalanceerde zender en ontvanger. De transmissielijnen zijn 'twisted pairs'. De gebalanceerde ontvanger heeft twee gelijkeingangsimpedanties naar de aarde.

Een belangrijk gegeven bij deze opstelling is het feit dat de storingen van buitenuit een even grote invloed hebben op beide transmissielijnen. Omdat beide belastingimpedanties van de ontvanger gelijk zijn, zullen de eventuele storingen gelijke stromen en daardoor ook gelijke spanningsvallen veroorzaken in de twee geleiders. De verschilversterker zal het ruis- of stoorsignaal onderdrukken. De gebalanceerde zender stuurt het signaal *S* en het tegengestelde signaal *-S* uit. Ook een ongebalanceerde zender is mogelijk, zoals aangegeven in figuur 1.29. Hier wordt de nul-referentielijn als tweede transmissiesignaal overgezonden. De ontvanger gebruikt nu ook deze nullijn als referentie en niet de lokale aarde.



Figuur 1.29: Juiste verbindingen bij ongebalanceerde zender.

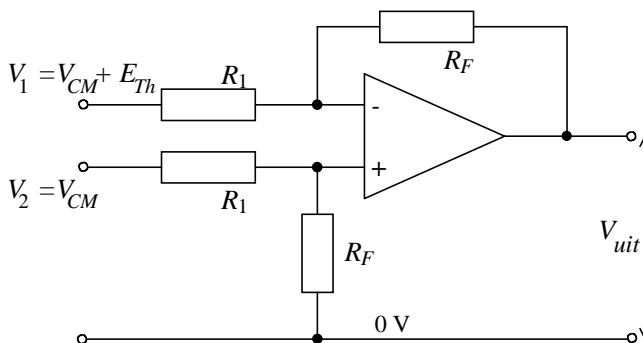
De signaal-ruisverhouding is bij gebruik van een gebalanceerde zender beter dan bij een ongebalanceerde zender. Dit volgt uit volgende redenering: neem als signaal $S(t)$ en als storing $n(t)$. Bij de gebalanceerde zender is het ontvangen signaal $(S(t) - n(t)) - (-S(t)-n(t)) = 2 S(t)$. De signaal-ruisverhouding is $2S(t)/n(t)$. Bij de ongebalanceerde zender is het ontvangen signaal $(S(t) - n(t)) - (0 -n(t)) = S(t)$. De signaal-ruisverhouding is hier $S(t)/n(t)$ en is half zo groot.

CMRR bij verschilversterkers

In het voorgaande hebben we verondersteld dat een verschilversterker enkel de verschilspanning overhoudt en de sommode spanning volledig onderdrukt. Dit is enkel zo in het ideale geval. In de praktijk zal de uitgangsspanning van de verschilversterker ook afhankelijk zijn van de sommode spanning over de ingangspennen. De mate waarin de sommode spanning werkelijk onderdrukt wordt, is aangegeven in de 'Common Mode Rejection Ratio' - factor of CMRR. Voor de verschilversterker uit figuur 1.30 geldt:

$$V_{uit} = -\frac{R_F}{R_1} E_{Th} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{V_{CM}}{CMRR}$$

Als bijvoorbeeld $E_{Th} = 1 \text{ mV}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_F = 1 \text{ M}\Omega$, $V_{CM} = 1 \text{ V}$ en $CMRR = 10^5 (=100 \text{ dB})$, dan is $V_{uit} \approx -1 + 0,01 \text{ V}$. De resulterende verschilmode storing is hier dus 1 %.



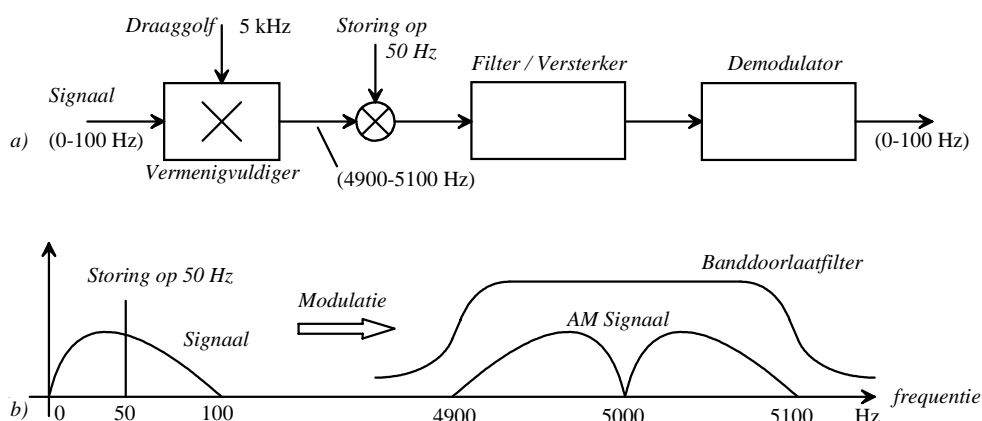
Figuur 1.30: Verschilversterker.

Filtertechnieken

Op voorwaarde dat het vermogenspectrum van het meetsignaal in een frequentiegebied ligt dat verschilt van de frequentieinhoud van het stoorsignaal of de ruis, biedt een filter een goede oplossing om de signaal-ruisverhouding te verbeteren. Zowel analoge als digitale filters zijn mogelijk.

Modulatie

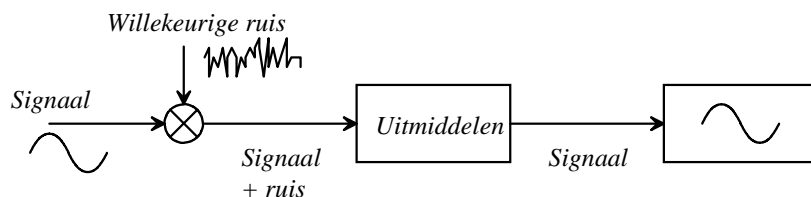
Indien het opgevangen stoorsignaal in hetzelfde frequentiegebied ligt als het meetsignaal, is filteren niet meer mogelijk. In zulk een geval kan moduleren van het signaal bij de zender en demoduleren bij de ontvanger een oplossing bieden. Door de modulatie wordt het nuttig spectrum verschoven. Figuur 1.31 geeft een schematisch voorbeeld.



Figuur 1.31: Gebruik van modulatie als filteren niet kan.

Uitmiddelen

Uitmiddelen van het meetsignaal kan gebruikt worden om ruis bij een *repetitief* signaal te onderdrukken. Figuur 1.32 geeft een voorbeeld.



Figuur 1.32: Signaaluitmiddeling

Verder bestaan er nog technieken op basis van autocorrelatie, lock-in-technieken, technieken welke aangepaste ingangssignalen gebruiken, enz. Dit enkel om aan te geven dat de bovenstaande lijst van mogelijke manieren om ruis en storingen te onderdrukken zeker niet volledig is.