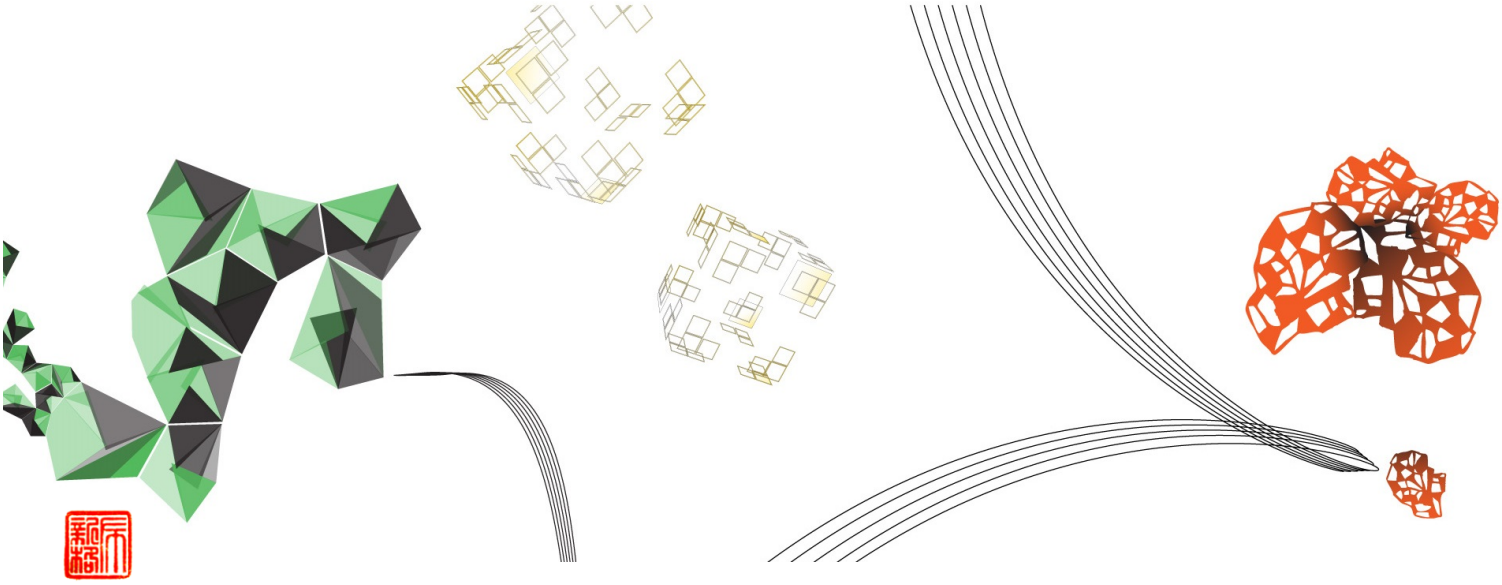


Experiments to educate EMC Basic principles

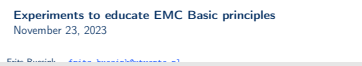
November 23, 2023

Frits Buesink frits.buesink@utwente.nl

UNIVERSITY OF TWENTE.
HSC Department EDUCATION LEGACY

2023-11-29

Experiments to educate EMC Basic principles



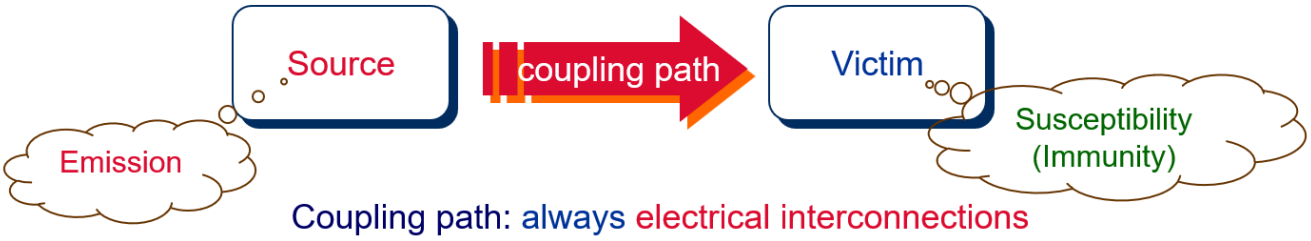
geen notes bij deze dia

Introduction

geen notes bij deze dia

Necessary elements for an interference situation

EMI, electromagnetic interference model: source–victim and coupling path

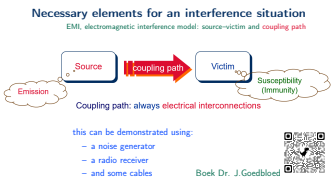


Coupling path: always electrical interconnections

this can be demonstrated using:

- a noise generator
- a radio receiver
- and some cables

Boek Dr. J.Goedbloed



Dit is wat Dr. J. Goedbloed[1] het "EMC drieluik" noemt.
Om een stoor-probleem te kunnen hebben zijn deze drie elementen nodig:

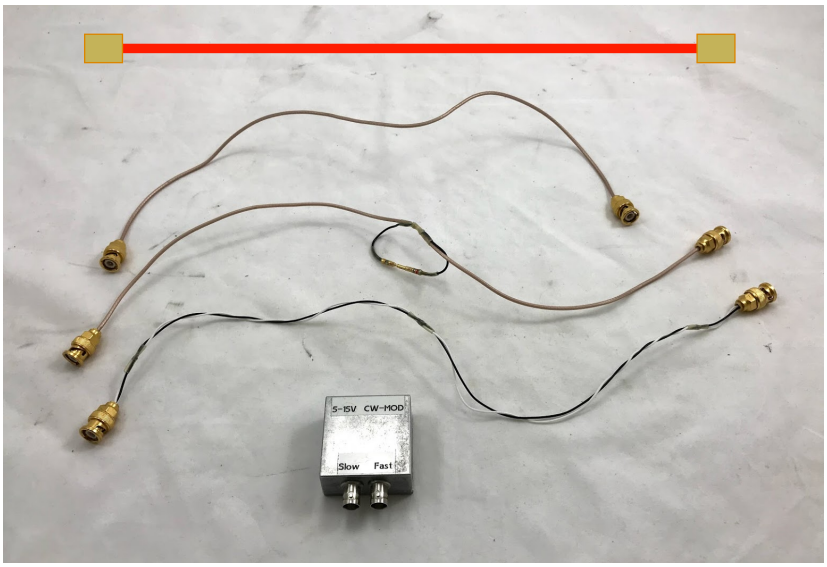
- Een bron van storing
- Een slachtoffer dat daar gevoeliog voor is
- Een koppel-weg

Die koppel-weg is altijd "draad", oftewel: verbindingen.
Dit speelt op elke schaal van heel klein, bv. in een geïntegreerd circuit tot héél groot, bv. een fregat van de Marine.

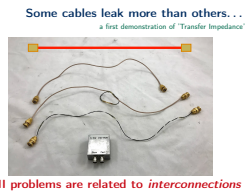
[1] In zijn boek "EMC" dat in het Nederlands alleen nog tweedehands te koop is, zie QR-code.

Some cables leak more than others. . .

a first demonstration of 'Transfer Impedance'



All **EMI problems are related to *interconnections***

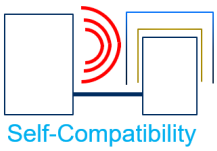


Demonstratie generator met draad (antenne) en diverse kabels die storen op een radio. Begin met een enkele draad –antenne– op de "snelle" uitgang.
Boodschap: niet elke kabel is geschikt voor elk signaal-transport (Aspect 1).

Three criteria for EMC

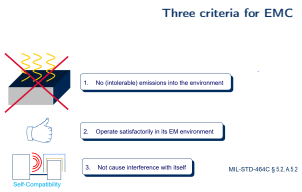
1. No (intolerable) emissions into the environment

2. Operate satisfactorily in its EM environment



3. Not cause interference with itself

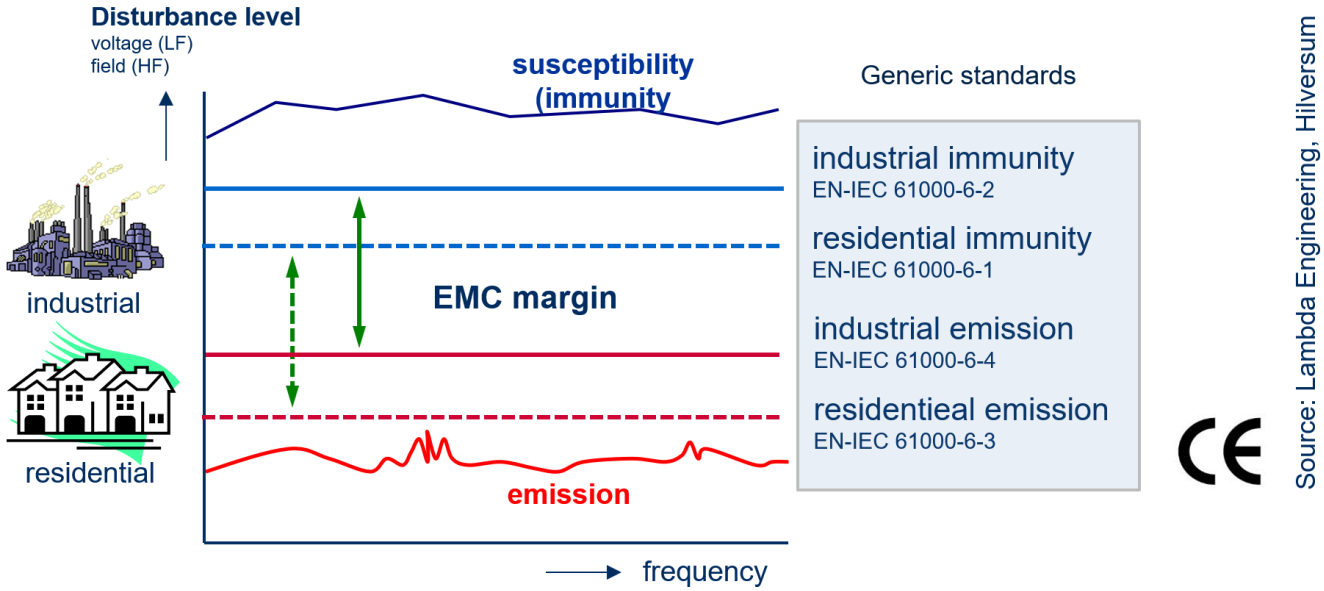
MIL-STD-464C § 5.2, A.5.2

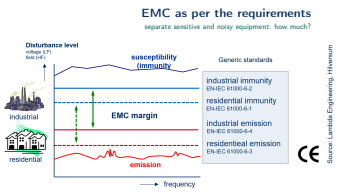


Gij zult niet storen (emissie)
–Geen voor de elektromagnetisch (EM)-omgeving onacceptabele stoorsignalen genereren–
Gij zult niet gevoelig zijn voor EM-verschijnselen (immuniteit)
–Het systeem moet blijven werken volgens zijn specificaties in de EM-omgeving waar het voor bedoeld is–
Uw systeem mag zichzelf niet storen m.a.w. moet ook zonder externe stoorbronnen werken volgens zijn specificaties (zelf-compatibiliteit)
Essentiële vereisten voor elektromagnetische compatibiliteit (EMC).

EMC as per the requirements

separate sensitive and noisy equipment: how much?

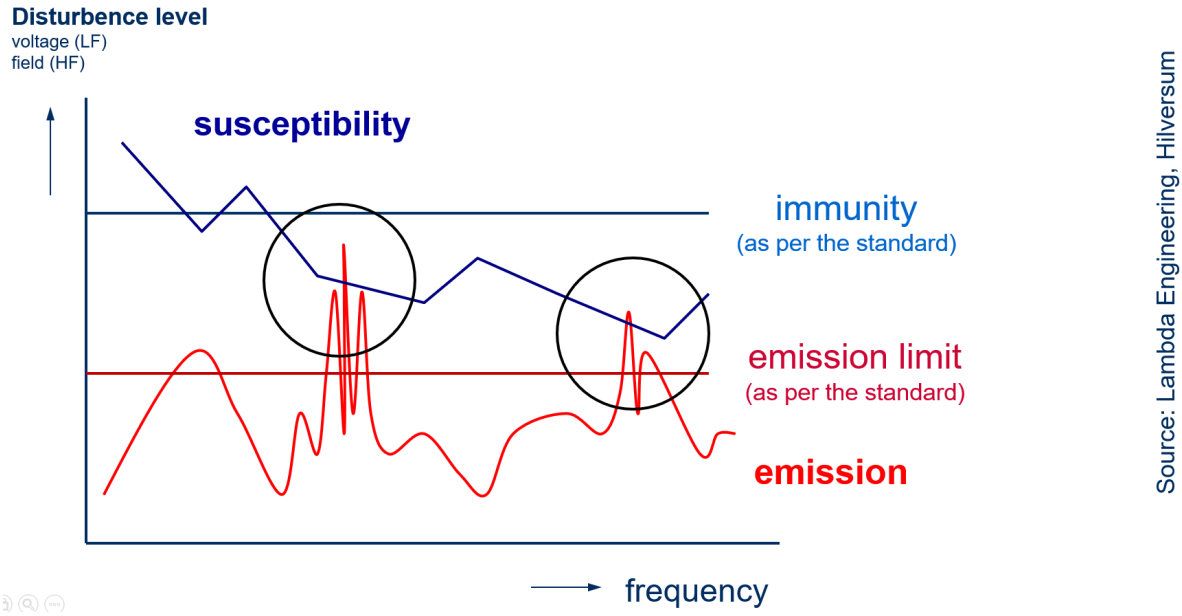


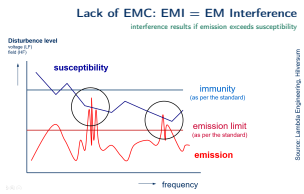


De essentiële eisen voor EMC zijn opgenomen in de Europese Unie (EU) richtlijn 2013/30/EU.
Die richtlijn –de wet– besteed het "hoeveel" uit aan internationale standaarden.
Er zijn product-standaarden die voor een bepaald type product aangeven hoeveel storing mag worden veroorzaakt en tegen welk niveau van storing het apparaat zelf moet kunnen accepteren terwijl het goed blijft werken.
Als er geen product-standaarden zijn wordt verwezen naar generieke standaarden voor emissie en immuniteit.
Zo'n generieke standaard is gekoppeld aan een bepaalde omgeving. Dat kan zijn de industriële omgeving of de huishoudelijke –residential–.
Beide type standaarden kennen emissie eisen en immuniteits eisen.
Voldoen aan een standaard geeft voor de rechter het vermoeden van overeenstemming.

Lack of EMC: EMI = EM Interference

interference results if emission exceeds susceptibility





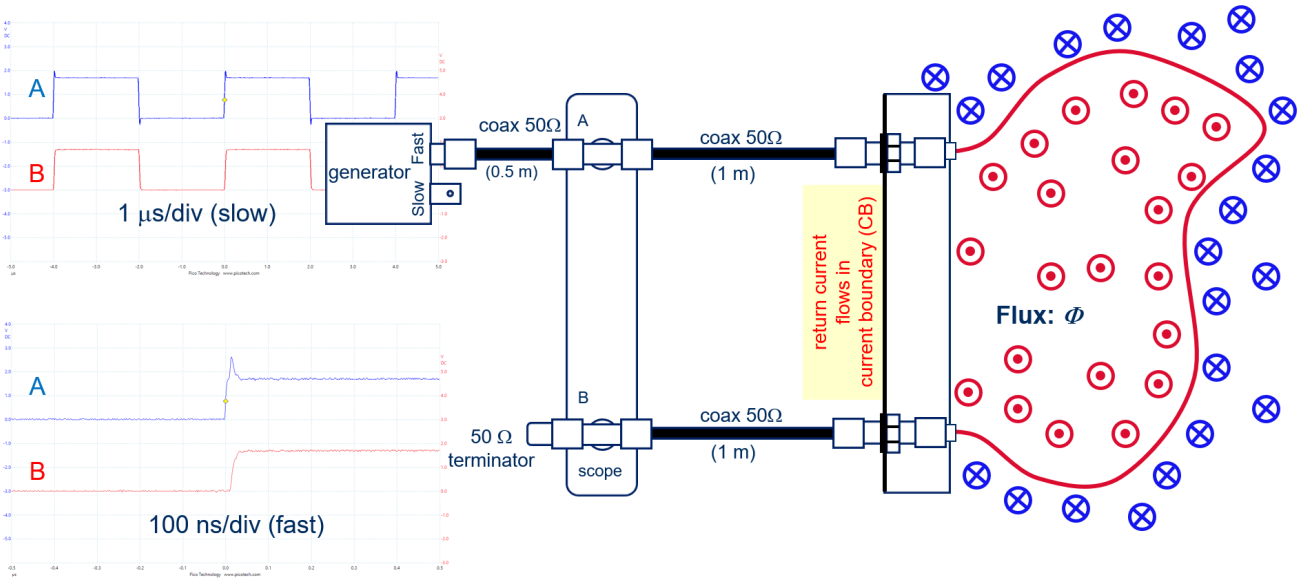
In de standaarden worden limieten gegeven voor emissie en immuniteit.
Tussen die limieten zit een "leeg gebied" soms –ten onrechte– de EMC-marge genoemd.
De gedachte daarachter is dat als de emissie beneden de –maximum– emissie-limieten blijft en de immuniteit hoger is dan de –minimum– immuniteits-limieten, er geen storing kan optreden.
De officiële definitie van de EMC marge is het verschil tussen de feitelijke emissie of immuniteit waarde en de in de standaard genoemde limietwaarden.

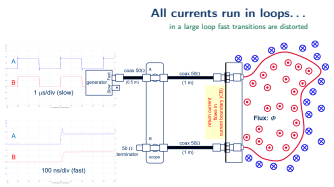
Part 1: Phenomena

We gaan aan de hand van experimenten een aantal fenomenen langs: natuurverschijnselen die een rol spelen bij de opwekking en overdracht van storingen.

All currents run in loops. . .

in a large loop fast transitions are distorted

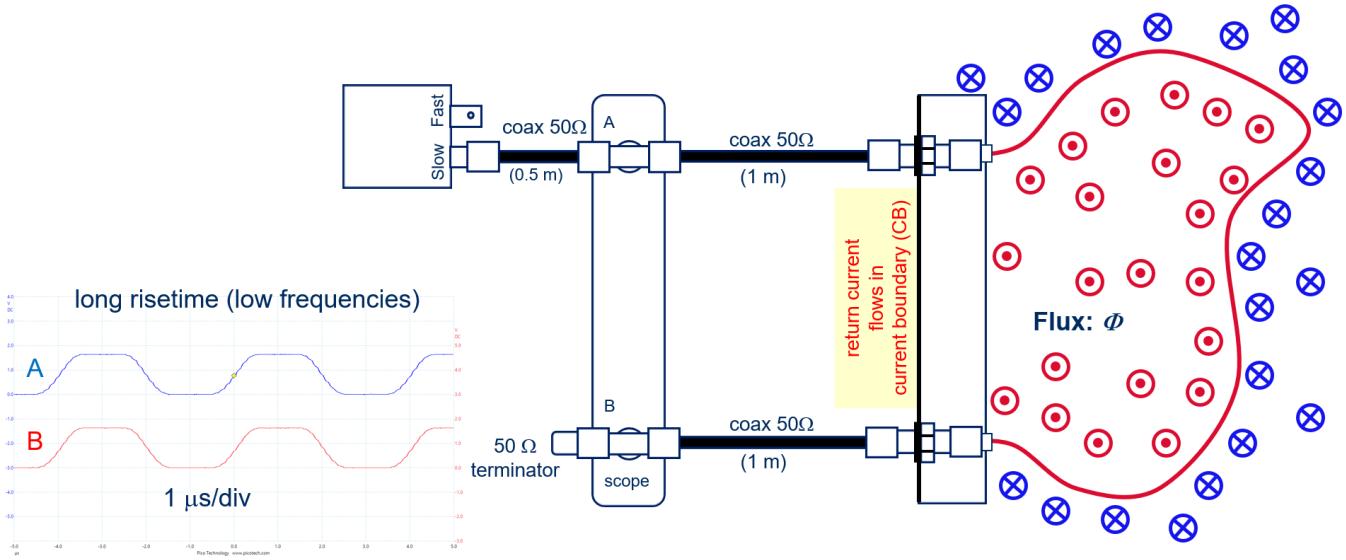


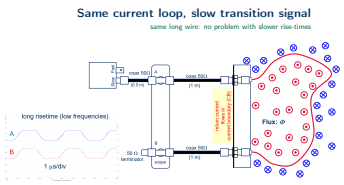


Demonstratie met een lange draad aangestuurd met verschillende signalen.
Voordat de draad aan weerszijden is aangesloten, loopt er geen stroom.
Zodra er stroom loopt, is duidelijk verschil waar te nemen wanneer hetzelfde signaal wordt aangeboden met steile flanken of langzame flanken: de eerste leidt tot vervorming.
Door beide uiteinden van de draad op de oscilloscoop te tonen, kun je zien dat:
Er geen stroom loopt als de draad *open* is (Aspect 2)
De eventuele vervorming aan weerszijden zichtbaar is, zij het *complementair* (Aspect 3).

Same current loop, slow transition signal

same long wire: no problem with slower rise-times

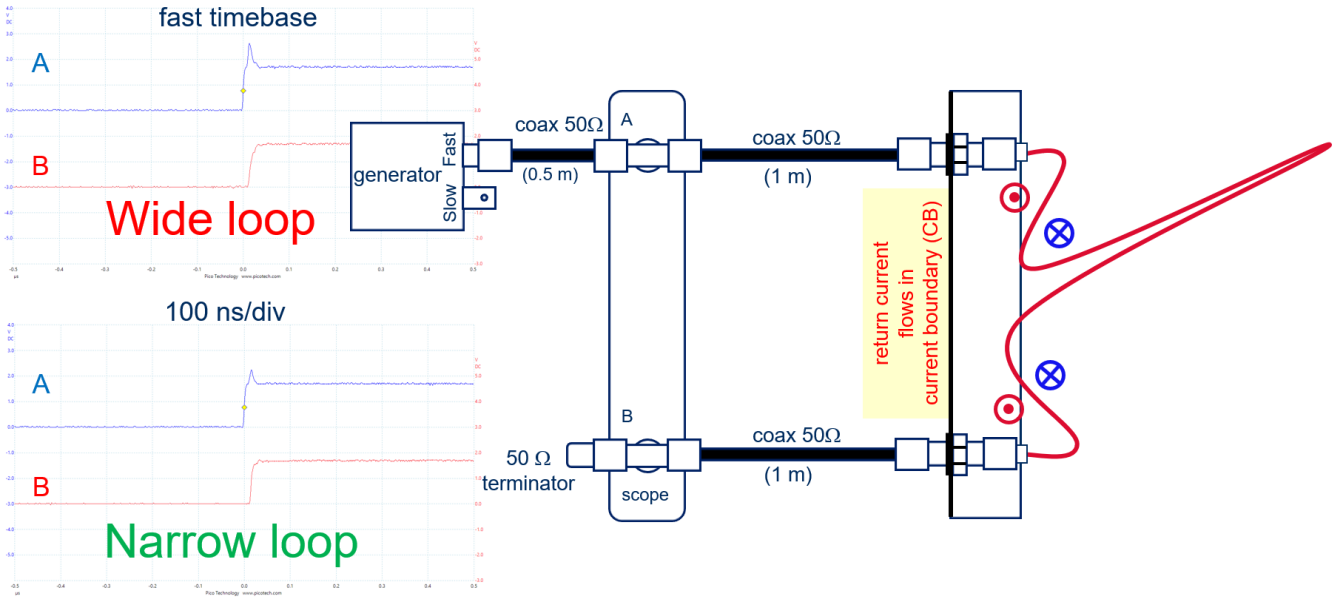


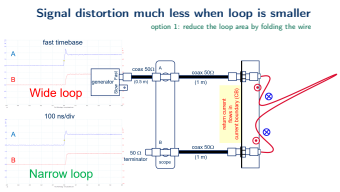


Sturen we een blokgolf met lange stijgtijden, –langzame veranderingen in de stroom– dan zien we geen vervorming.

Signal distortion much less when loop is smaller

option 1: reduce the loop area by folding the wire



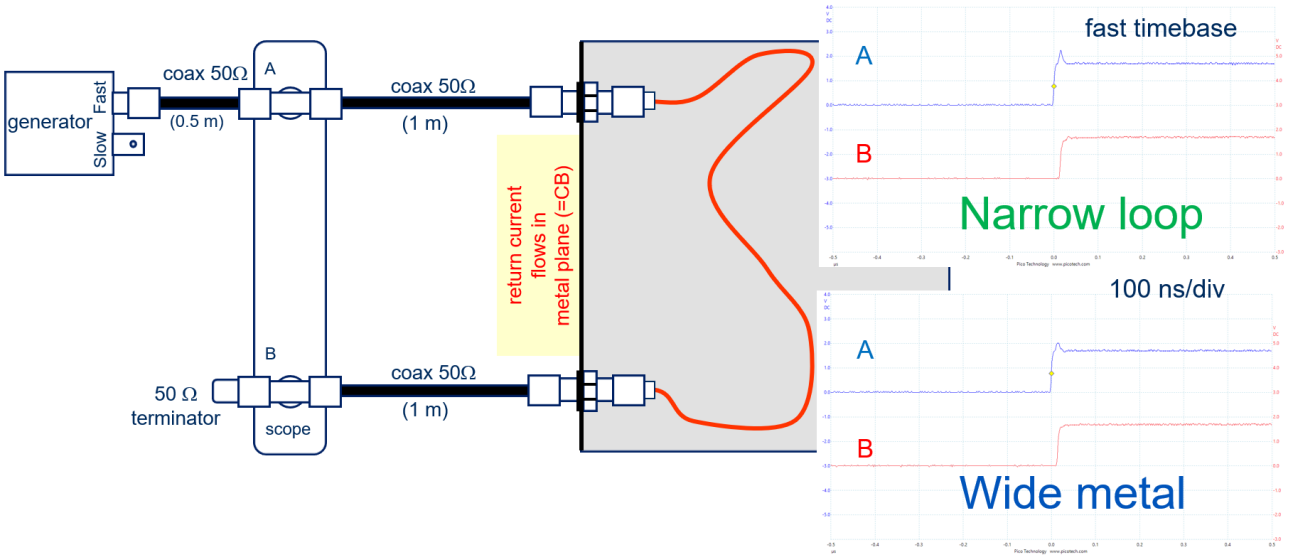


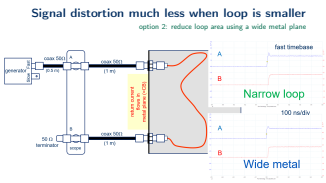
Op de oscilloscoop is te zien wat de invloed is van de vorm —geometrie– van de draad:
Langzame flank: weinig problemen ongeacht de geometrie (Aspect 4)

Snelle flank, grote kring: sterke vervorming van het signaal (verschil tussen begin en einde)
Kleine kring, vervorming neemt af

Signal distortion much less when loop is smaller

option 2: reduce loop area using a wide metal plane

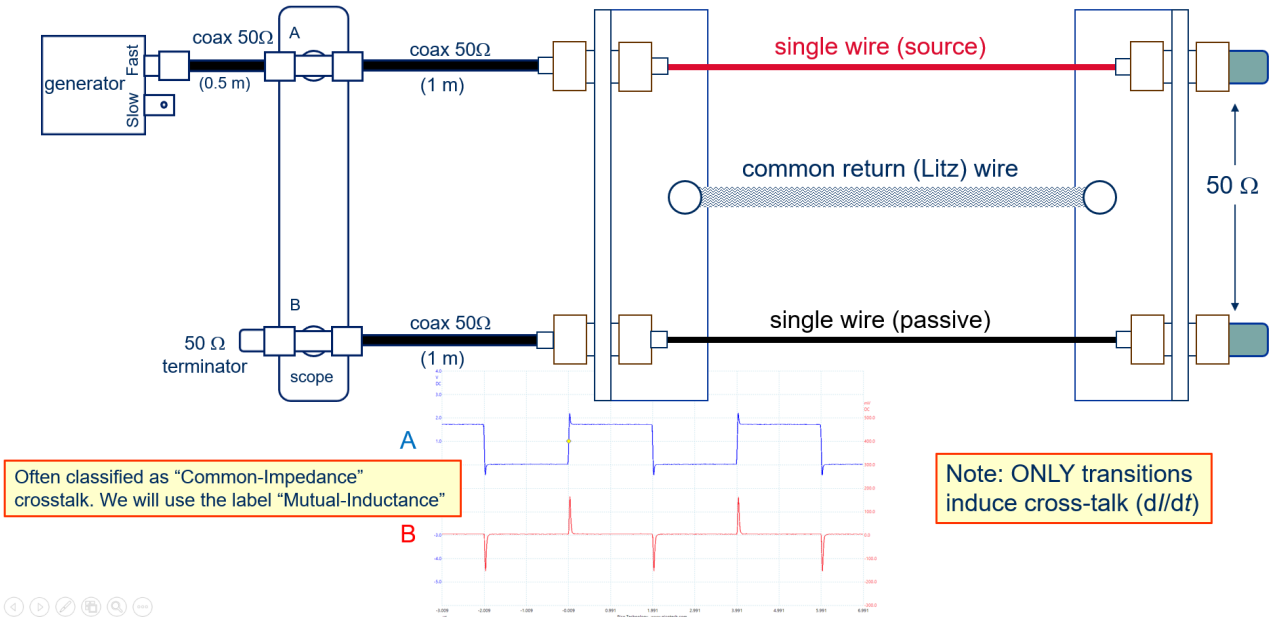


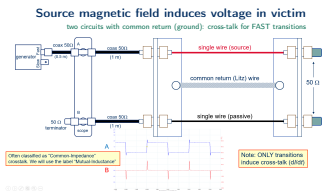


Alternatief: metalen plaat tegen de kring, effectief verkleinde kring
Laat ook zien, dat *gedeeltelijk* afdekken met metaal ook slechts *gedeeltelijk* verbetering geeft (Aspect 5)
Reden voor de vervorming is het feit dat voordat stroom in een kring kan lopen, er een magnetisch veld moet worden opgebouwd. Tot dat moment loopt er géén of minder stroom
Geen stroom betekent dat de generator onbelast is, 50 Ω impedantie. Zodra belast (met 50 Ω) zakt de spanning in tot de helft.
Mogelijk kan de *radio* gebruikt worden om aan te tonen dat een sterk vervormd signaal aanleiding is (kenmerkend is) voor de ontwikkeling van EM-velden (Aspect 6)

Source magnetic field induces voltage in victim

two circuits with common return (ground): cross-talk for FAST transitions

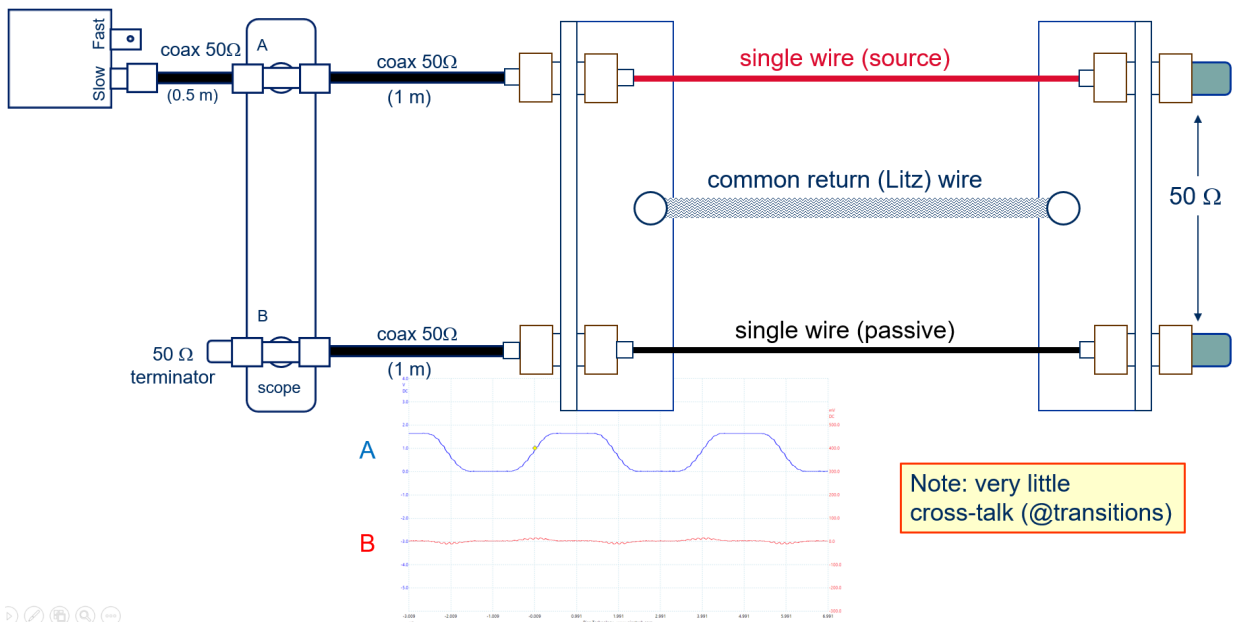


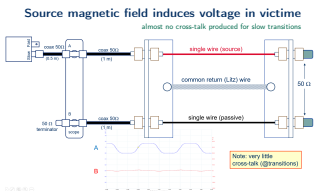


Demonstratie met twee kortere draden parallel, rood en zwart.
De beide stroomgrenzen (brackets) zijn verbonden met een retour draad.
Rood zit op de generator én de scope, zwart alleen op de scope.
Aan de andere kant zitten 50 Ω loads.
Rode draad gedraagt zich in principe als de lange draad in het eerste experiment.
Op de zwarte draad zien we, bij *steile flanken*, spijker vormige storingen op de flanken van het signaal op de rode draad : overspraak (Aspect 7).
Door de kring gevormd door de rode draad en de retourleiding tussen de stroomgrenzen wordt een magnetisch veld gegenereerd.
Dit veld wordt vervolgens opgepikt door de kring gevormd door de zwarte draad en de retourleiding.
Merk op, dat alleen een *verandering* in het magnetisch veld zichtbaar is (Aspect 8).

Source magnetic field induces voltage in victime

almost no cross-talk produced for slow transitions

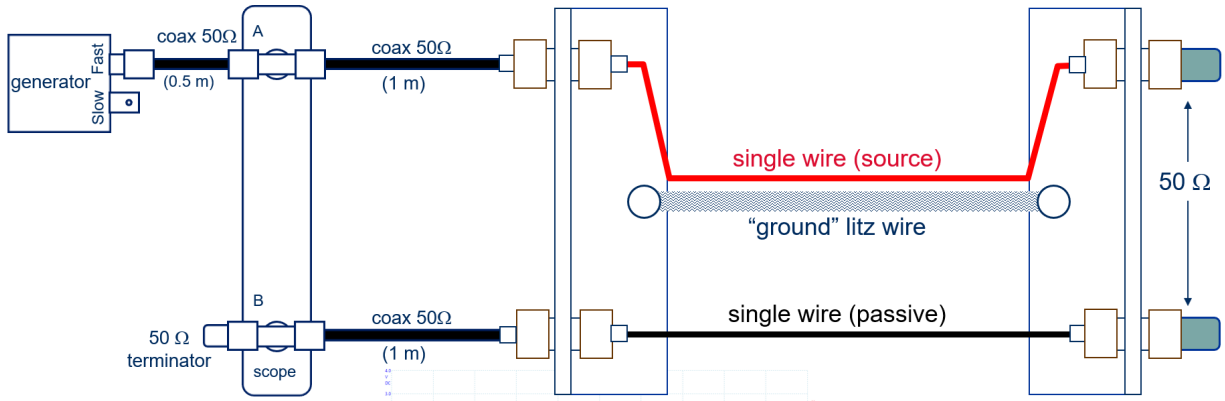




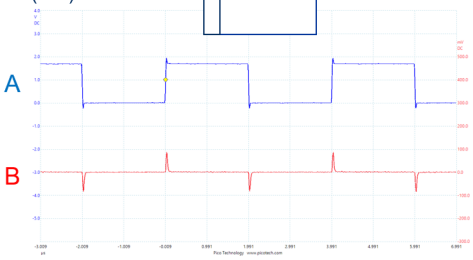
Vergroten van de afstand tussen de draden helpt niet om de overspraak te verminderen (Aspect 9).
Een veel tragere flank wél (Aspect 10).

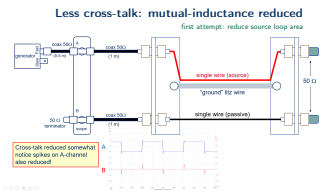
Less cross-talk: mutual-inductance reduced

first attempt: reduce source loop area



Cross-talk reduced somewhat
notice spikes on A-channel
also reduced!



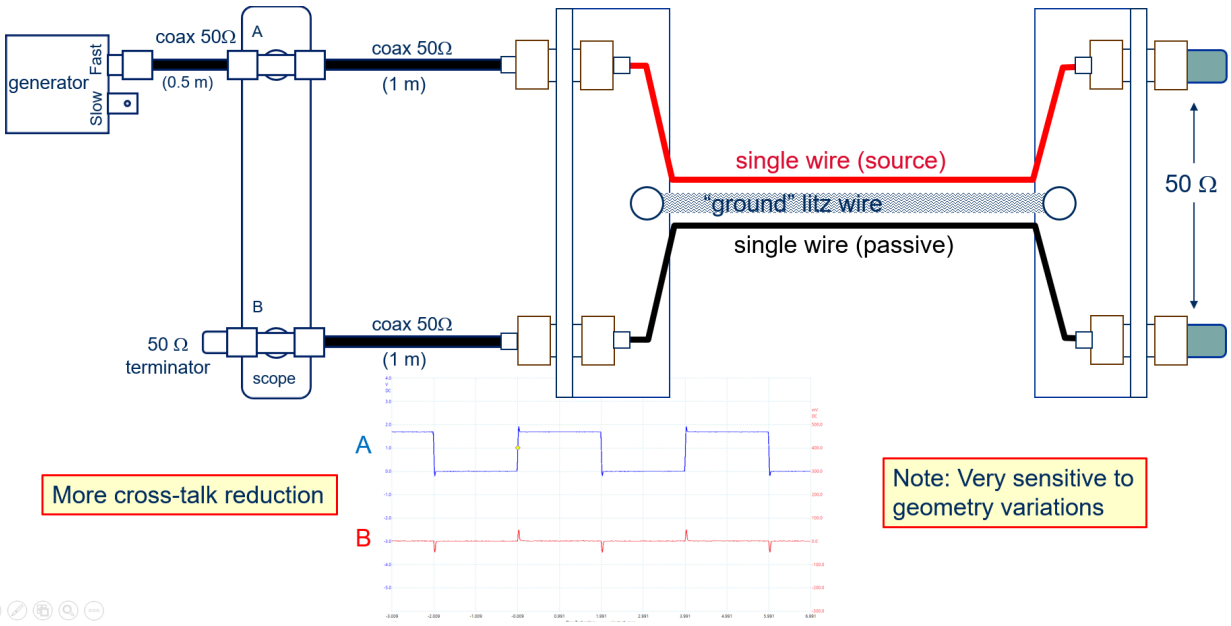


Klein maken van één of beide stroomkringen bij steile flank helpt ook
Leg eerst de rode draad tegen de retourleiding

De overspraak neemt af doordat het oppervlak van de –veroorzakende– stroom kring kleiner wordt (Aspect 11)

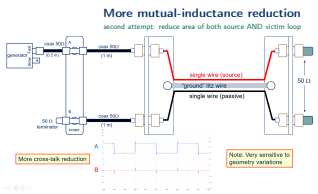
More mutual-inductance reduction

second attempt: reduce area of both source AND victim loop



More cross-talk reduction

Note: Very sensitive to geometry variations

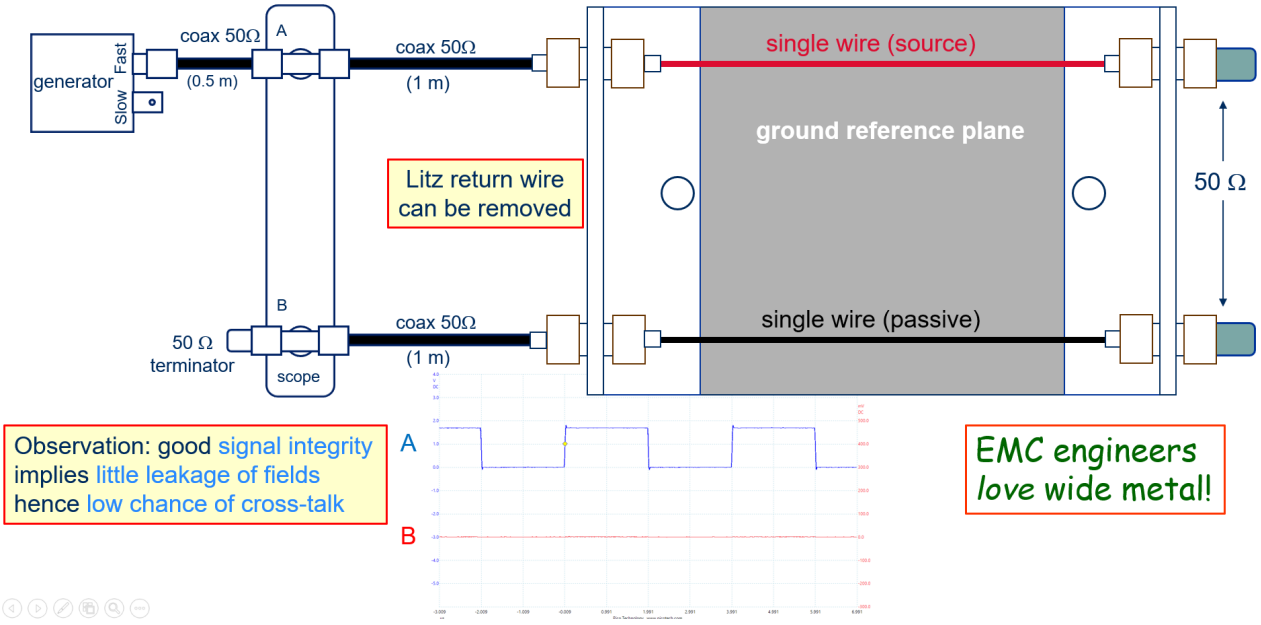


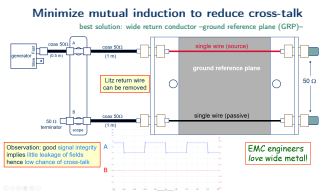
Doe dat vervolgens met de zwarte draad. Zelfde effect: een ontvangende kring/lus met een kleiner oppervlak, pikt minder veld op (Aspect 12).

Allebei de draden tegen de retour is het beste maar dan liggen ze wel erg dicht bij elkaar!

Minimize mutual induction to reduce cross-talk

best solution: wide return conductor –ground reference plane (GRP)–

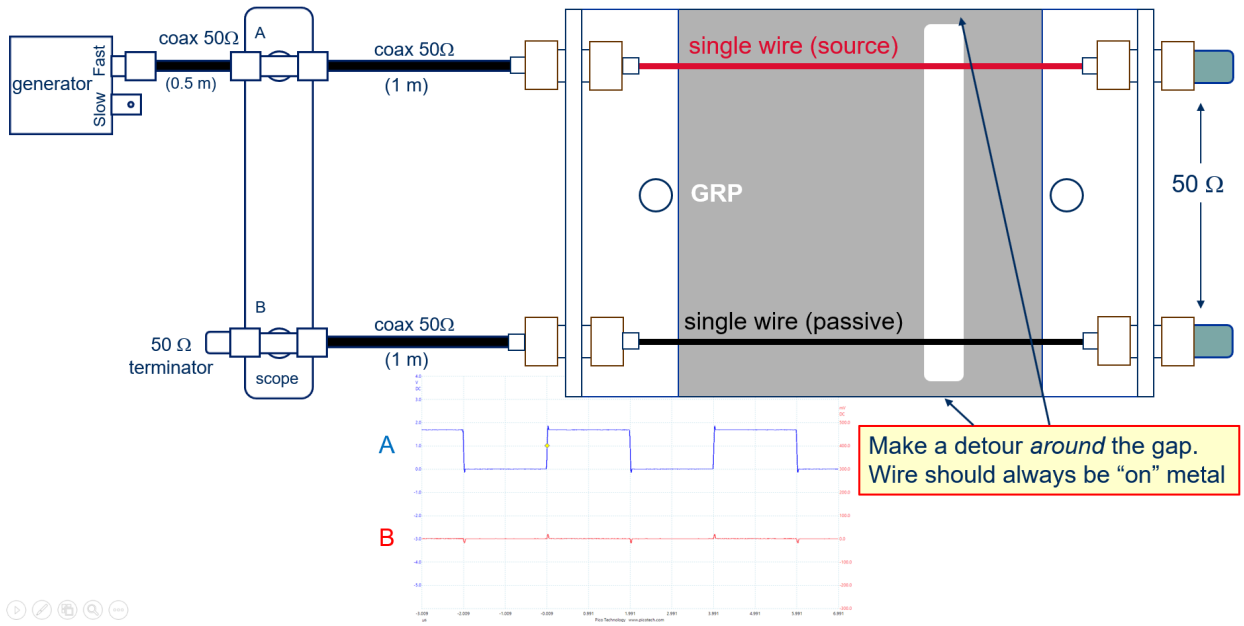


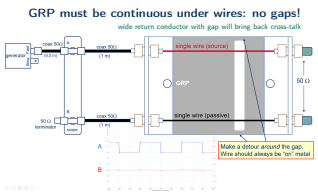


Een betere oplossing is het gebruik van een breed metalen vlak onder de draden
Dit brede metalen vlak vormt de nieuwe retour geleider van de *beide* draden –in plaats van de *dunne* draad-verbinding–
De rode én de zwarte draad worden nu tegen het metalen vlak gelegd
Dat vermindert de overspraak dramatisch ten opzichte van de situatie met de dunne retour-draad
Dat komt omdat nu niet alleen de rode en zwarte kring klein zijn maar ook omdat die –kleine– kringen ver uit elkaar gelegd kunnen worden (Aspect 13)
Laat zien dat naar elkaar toe bewegen of op-tillen de overspraak direct vergroot!

GRP must be continuous under wires: no gaps!

wide return conductor with gap will bring back cross-talk

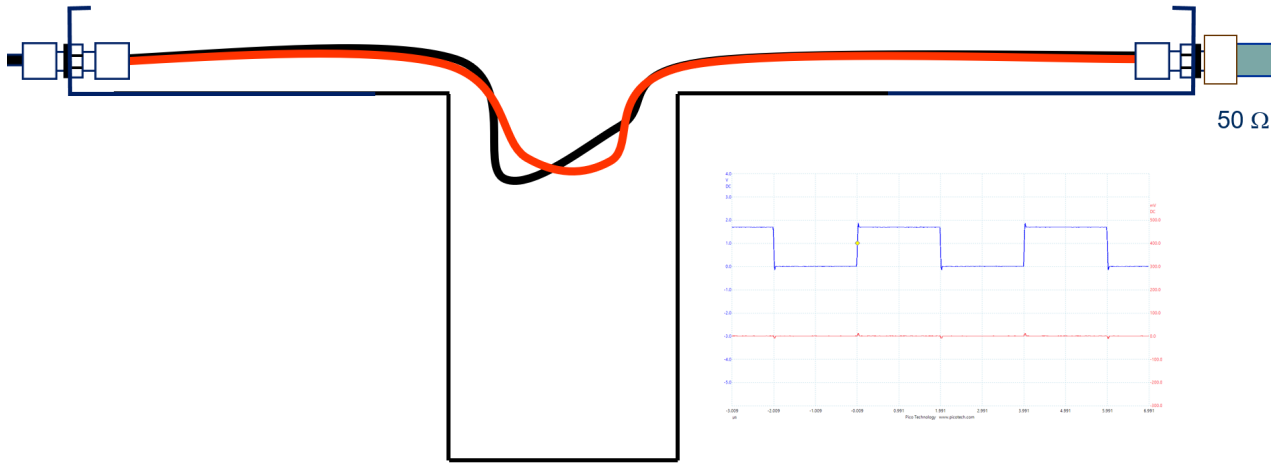


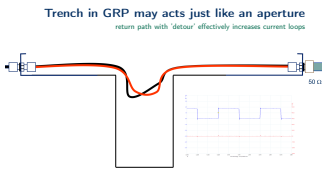


Een opening in het metalen *referentie* vlak geeft onmiddelijk meer overspraak.
N.B. zorg wel dat de metalen verbinding als zodanig in stand blijft anders hebben de draden helemaal geen retour meer!
Alternatief voor opening: til de draden plaatselijk op of gebruik een metalen bakje onder de opening

Trench in GRP may acts just like an aperture

return path with 'detour' effectively increases current loops



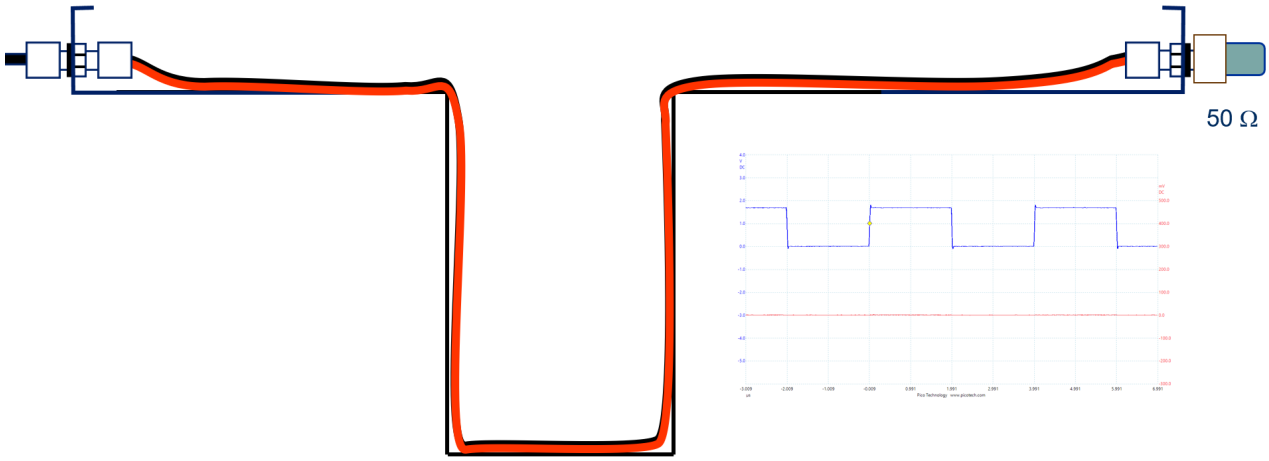


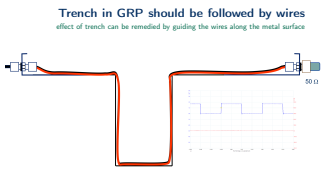
Dat metalen bakje aan het eind van de opstelling is in feite een geometrische verandering in het retour- of referentievlak onder de draden

De retour-stroom moet nu een *omweg* maken wat in feite een vergroting van beide stroomlussen geeft –de rode en de zwarte–

Trench in GRP should be followed by wires

effect of trench can be remedied by guiding the wires along the metal surface





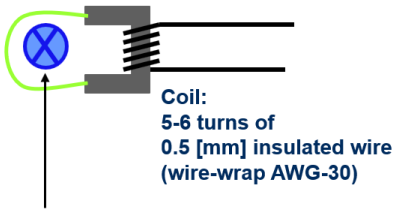
Om overspraak afdoende te onderdrukken, moeten de rode en de zwarte draad over hun volle lengte langs het metalen retour-vlak liggen

Als daar een bocht of uitstulping in zit –om welke reden dan ook– dan moeten de beide draden die volgen –ook al lijkt dat een omweg–

A coil can detect magnetic fields

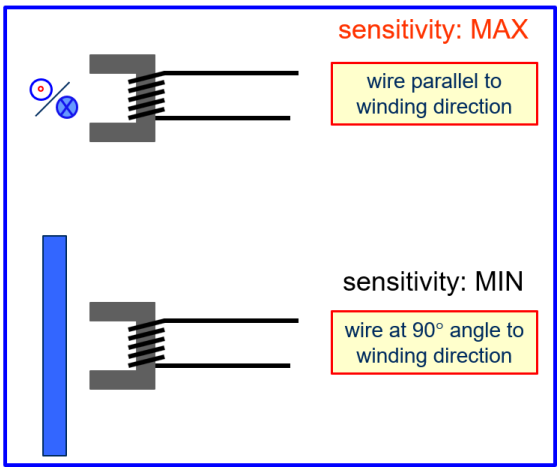
5-turn 'sniffer' probe with ferrite core to concentrate flux lines

Small C-shaped core



Conductor under test
(or external field)

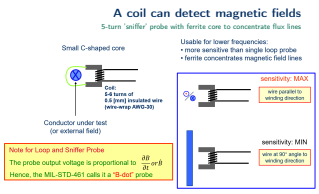
Usable for lower frequencies:
- more sensitive than single loop probe
- ferrite concentrates magnetic field lines



Note for Loop and Sniffer Probe

The probe output voltage is proportional to $\frac{\partial B}{\partial t}$ or $\dot{B}$

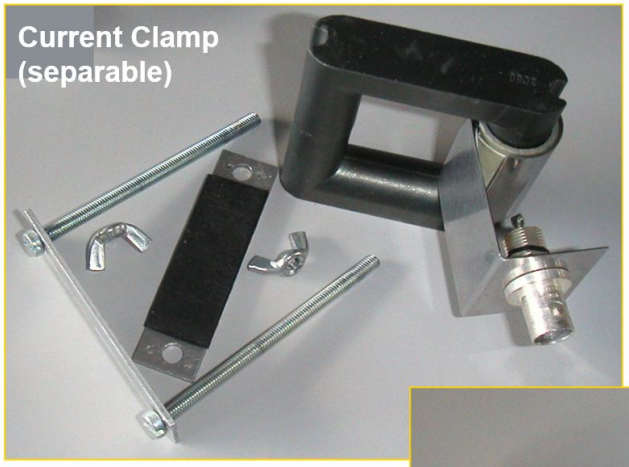
Hence, the MIL-STD-461 calls it a "B-dot" probe

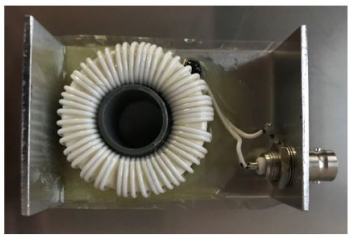


Een spoel –een aantal wikkelingen draad– kan gebruikt worden om een magnetisch veld te detecteren
Een ferriet-kern wordt toegepast om de magnetische veldlijnen uit de omgeving in de spoel te concentreren waardoor de sensor gevoeliger wordt

Example magnetic field based transducers

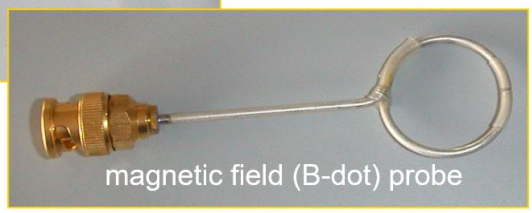
'home made' current and magnetic field probes

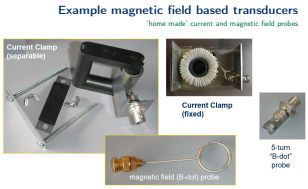




Current Clamp
(fixed)

5-turn
"B-dot"
probe

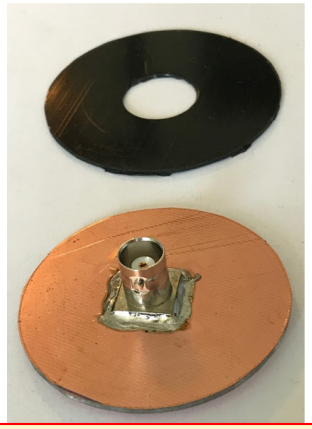


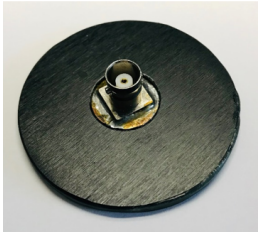


Hierboven nog een aantal magnetisch veld sensoren:
Twee "stroomtangen", current-transducers
Dit zijn gesloten ferriet kringen met daarop een spoel
De te bemeten stroomdraad wordt daar doorheen geleid
Twee magnetisch-veld sensoren
1. De zojuist getoonde sensor met connector
2. Een speciale ring sensor –1 winding– met elektrisch veld afscherming
Dit type veld sensoren worden wel aangeduid als "B-dot" probes
Ze werken namelijk op de verandering van het magnetische veld
Die verandering wekt een spanning op
De werking wordt beschreven met de wet van Faraday

A metal plate can detect electric fields

plate could have any shape, rods can also do the trick





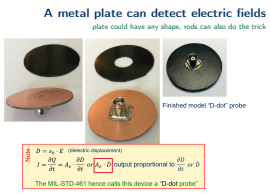
Finished model “D-dot” probe

Note

$D = \varepsilon_0 \cdot E$ (dielectric displacement)

$I = \frac{\partial Q}{\partial t} = A_e \cdot \frac{\partial D}{\partial t}$ or $\boxed{A_e \cdot \dot{D}}$ output proportional to $\frac{\partial D}{\partial t}$ or $\dot{D}$

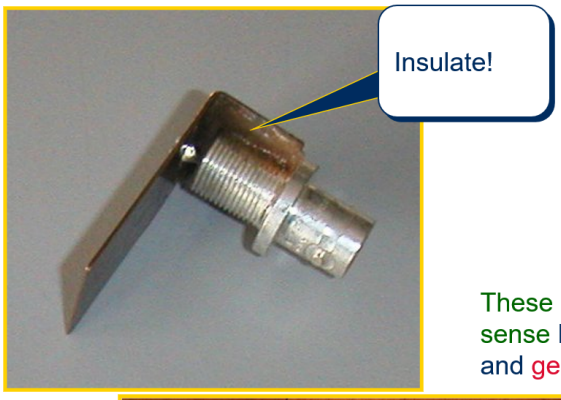
The MIL-STD-461 hence calls this device a “D-dot probe”

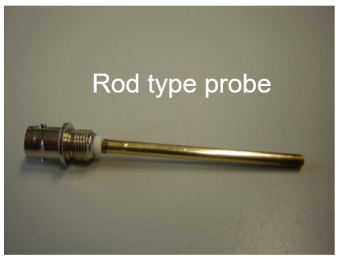


Een elektrisch veld kan worden gedetecteerd met een metalen plaat of staaf
Het werkt op basis van ladings-verschuiving –theorema van Gauss–
Als zo’n plaat in de buurt van een elektrisch veld komt, ontstaat aan het oppervlak van het metaal een lading
Die lading wordt onttrokken aan de aangesloten geleider –meetdraad–
Dat levert een stroom op die weer een spanning veroorzaakt in de meet-weerstand op/in het meetinstrument

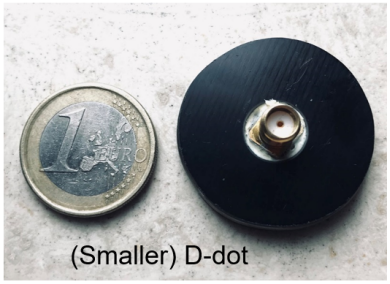
Example electric field probes

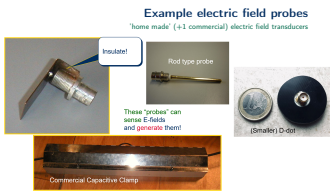
'home made' (+1 commercial) electric field transducers





These "probes" can sense E-fields and generate them!





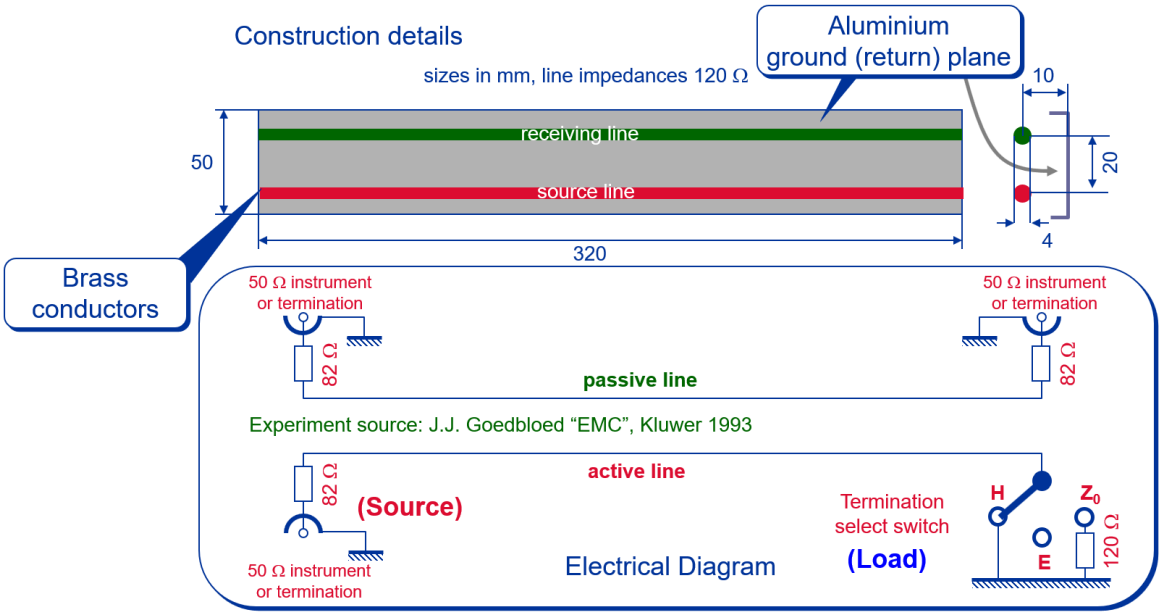
Hierboven zijn een aantal elektrisch-veld sensoren afgebeeld.

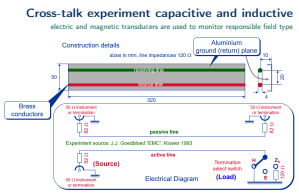
1. Een simpel plaatje koper
2. Een messing staafje
3. De zojuist getoonde ronde sensor gemaakt van printplaat
4. Een commerciële capacitieve clamp

Met die laatste kunnen elektrische velden op kabels gemeten worden en eventueel elektrische velden worden geïnjecteerd op kabels

Cross-talk experiment capacitive and inductive

electric and magnetic transducers are used to monitor responsible field type

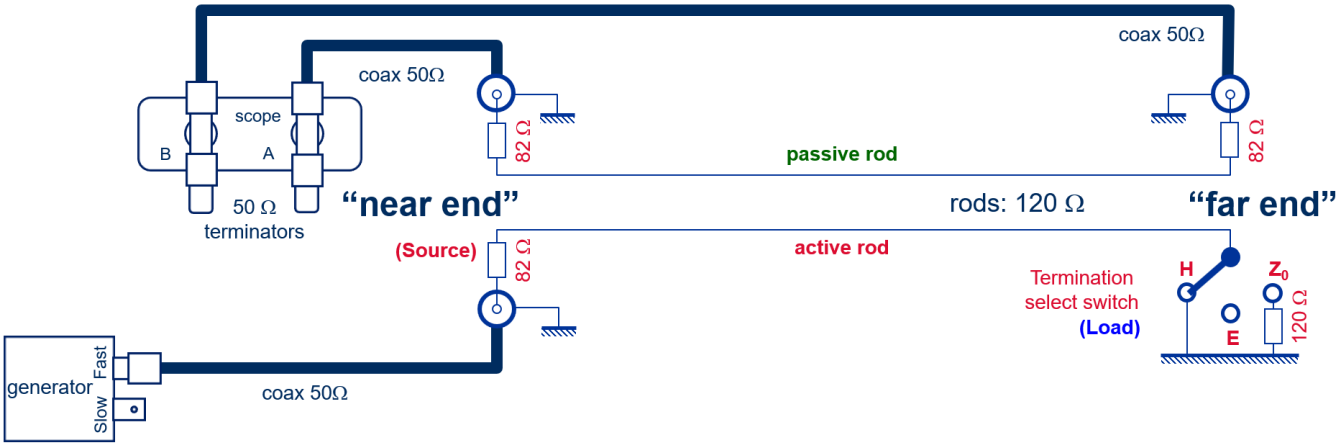




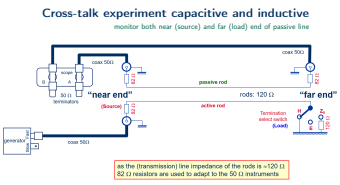
In deze demonstratie opstelling wordt aan weerszijden van de ontvangende of gevoelige geleider gemeten.
In beide gevallen over een afsluit-/belastingsweerstand/impedantie van 50 Ω.
De *storende* geleider heeft aan het eind een schakelaar met 3 standen:
1. Kortgesloten: dat geeft aanleiding tot een grotere stroom bij weinig spanning.
Dat betekent veel stroom en dat veroorzaakt een groot magnetisch veld –en vrijwel géén elektrisch veld– (Aspect 14)
2. Open: nu loopt er geen stroom en is er alleen een spannings verandering op de *storende* geleider.
Spanning is gekoppeld aan elektrisch veld (Aspect 15).
Ook elektrisch veld spreekt over naar de *gevoelige* geleider.
3. Belast met een gedefinieerde weerstand naar de retour geleider.
De technische benaming van deze belasting is: *karakteristiek* afgesloten.
Dat houdt in dat de veroorzaakte hoeveelheden magnetisch en elektrisch veld *in balans* zijn.

Cross-talk experiment capacitive and inductive

monitor both near (source) and far (load) end of passive line



as the (transmission) line impedance of the rods is ≈120 Ω
82 Ω resistors are used to adapt to the 50 Ω instruments

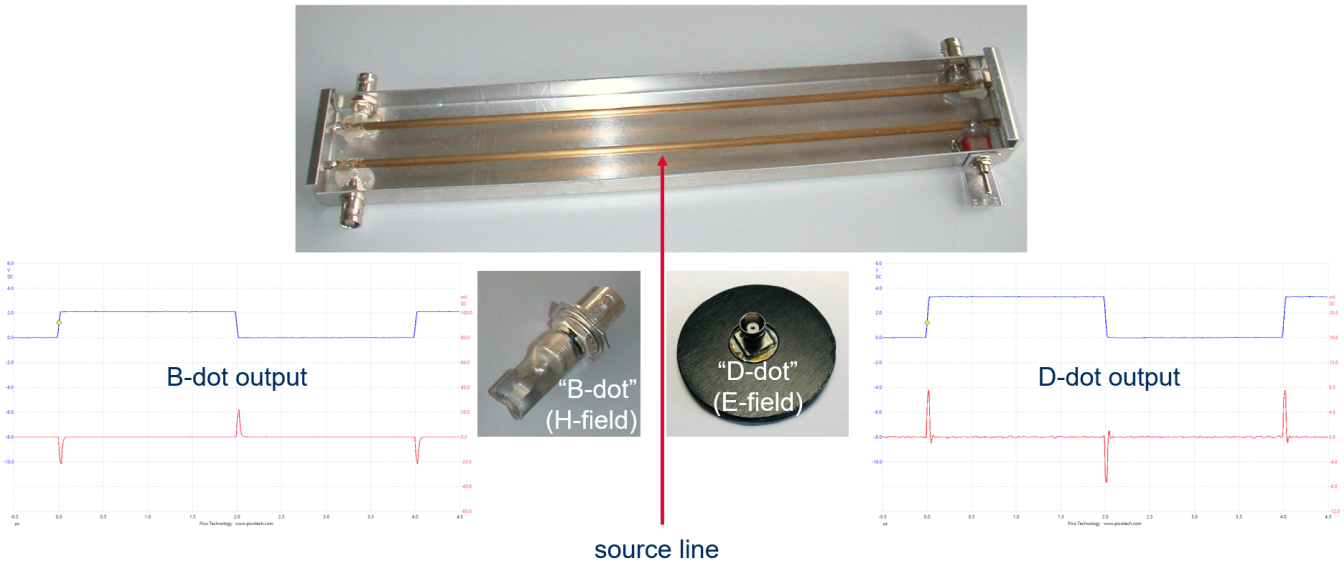


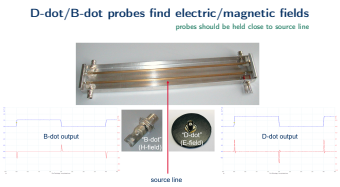
De afbeelding hierboven geeft aan hoe de oscilloscoop en de generator met het experiment is verbonden.

Het experiment wordt aangesloten op de snelle uitgang van de generator

D-dot/B-dot probes find electric/magnetic fields

probes should be held close to source line

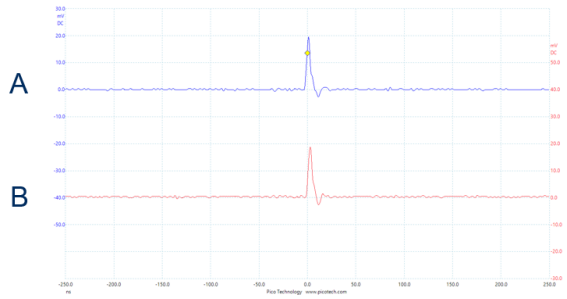




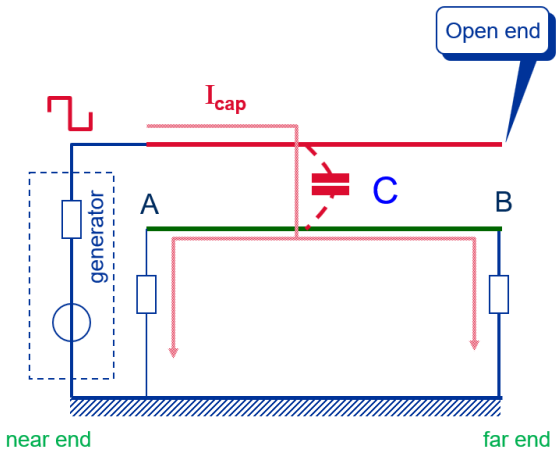
De beide afgebeelde sensoren hierboven zullen worden gebruikt om aan te tonen welk type veld in een specifieke schakelaar-stand van het experiment wordt gegenereerd
Op de oscilloscoop is dan zichtbaar hoe dat er uit ziet

Open source: voltages dominant; electric fields

a capacitive current flows from active to passive rod, return via GRP

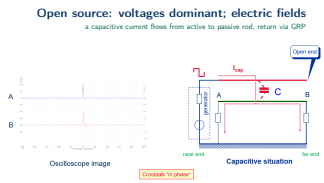


Oscilloscope image



Capacitive situation

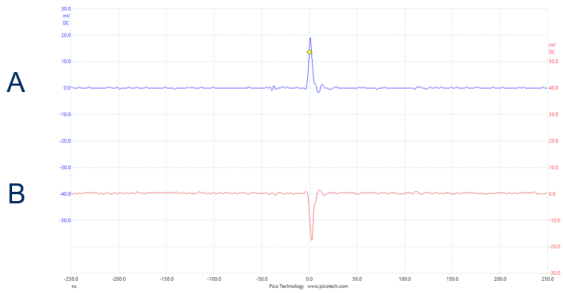
Crosstalk "in phase"



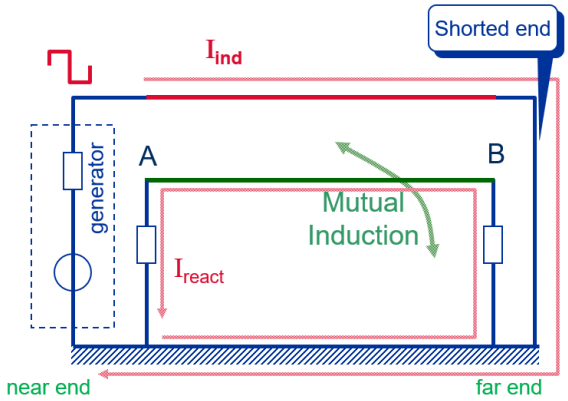
In de open schakelaar-stand is sprake van dominant elektrisch veld.
Ook elektrisch veld spreekt over naar de *gevoelige* geleider.
Er loopt dan ook wel degelijk een stroom via de capaciteit (condensator) gevormd door de storende en de gevoelige geleider
Het effect is een stroom door de beide weerstanden van 50 Ω aan de uiteinden van de gevoelige geleider in *dezelfde* richting (Aspect 16)

Shorted source: current dominant; magnetic fields

source loop induces a current in victim loop (mutual inductance)

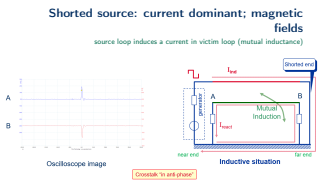


Oscilloscope image



Inductive situation

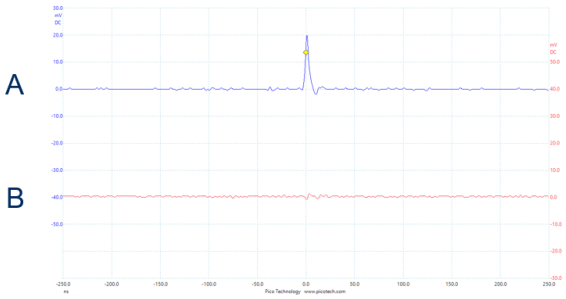
Crosstalk "in anti-phase"



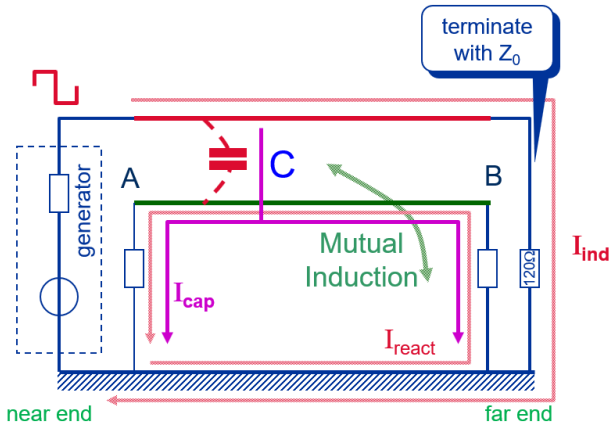
In de kortgesloten stand van de schakelaar loopt er eigenlijk alleen stroom in de storende geleider
Die veroorzaakt een magnetisch veld
Dat veld –de veranderingen daarin– spreekt over op de gestoorde geleider –het slachtoffer–
In het magnetisch veld geval wordt dat een stroom in de tegenovergestelde richting als die in de storende –bron– geleider (Aspect 17)
In de kring die de gestoorde geleider vormt met de aangesloten meet-weerstanden en het aluminium retour-pad vloeit nu dus een geïnduceerde stroom die in de meet-weerstand het dichtst bij de bron –het nabije eind– in dezelfde richting loopt als de voorheen capacitief geïnduceerde stroom
In de meet-weerstand het verst verwijderd van de bron –het verre eind– loopt de stroom nu echter in de tegenovergestelde richting
Dat is mooi te zien door tijdens het experiment de schakelaar om te zetten terwijl beide stoor-pieken in beeld zijn

Balancing capacitive and inductive cross-talk

terminating the source characteristically cancels 'far' end XTK

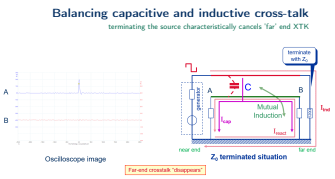


Oscilloscope image



Z_0 terminated situation

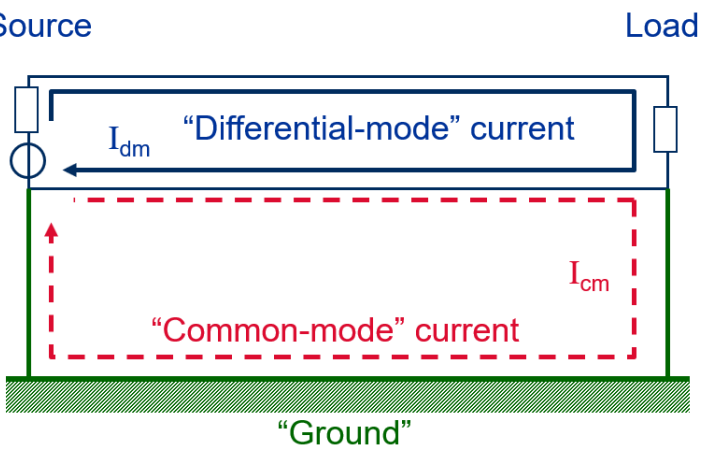
Far-end crosstalk "disappears"



De technische benaming van deze belasting van de –storende– bron-geleider is: *karakteristiek* afgesloten
Dat houdt in dat de veroorzaakte hoeveelheden magnetisch en elektrisch veld *in balans* zijn
Daardoor loopt er door de beide weerstanden aan de uiteinden van de ontvangende geleider zowel een stroom veroorzaakt door het magnetische veld als een stroom veroorzaakt door het elektrische veld.
De elektrisch en magnetisch veroorzaakte –geïnduceerde– stromen zijn welliswaar de helft van de stromen in eerste twee schakelaarstanden maar aan het uiteinde het dichtst bij de aansluiting van de generator –het nabije eind– tellen de stromen op en dus is de stoor=spanning die we meten ongeveer even groot als oorspronkelijk
Aan de andere kant van de ontvangende geleider –het *verre* eind– zijn ze even groot –de balans-situatie– maar tegenovergesteld en dus zien we daar nu géén overspraak meer (Aspect 18)

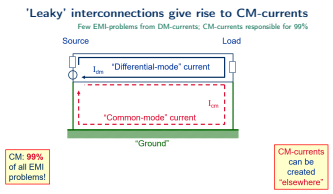
'Leaky' interconnections give rise to CM-currents

Few EMI-problems from DM-currents; CM-currents responsible for 99%



CM: **99%** of all EMI problems!

CM-currents can be created "elsewhere"



De stroom die in dia 8 door de lange draad gestuurd werd, heet ook wel de "gewenste" of, met de Engelse term, differential mode (DM)-stroom. Het is dezelfde stroom die op de heenweg de ene kant oploopt en op de terugweg terug. Als je ze van elkaar aftrekt, is het resultaat nul. Ze horen bij elkaar en beide zijn nodig om een signaal van A naar B te vervoeren (Aspect 19).

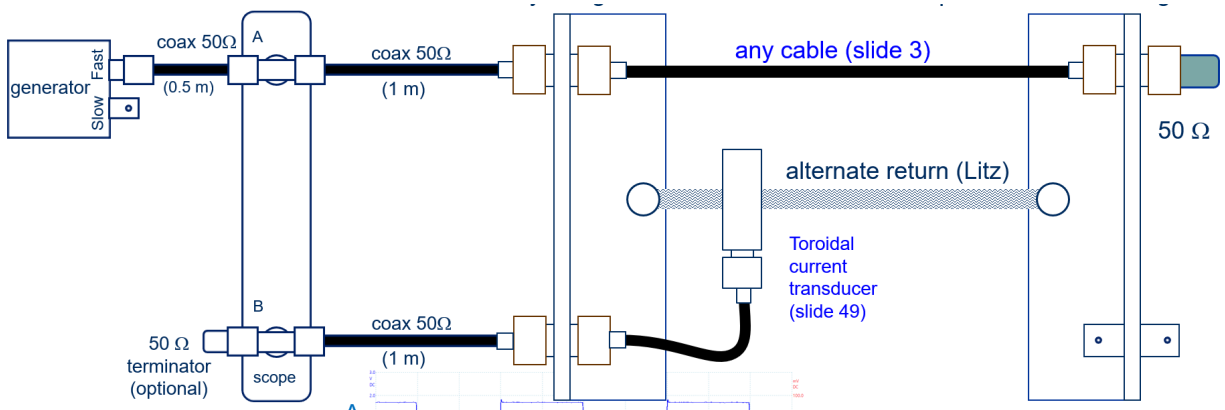
De stroom die bv. door overspraak over dezelfde retour leiding loopt maar daar eigenlijk niet thuis hoort, is een "ongewenste" stroom. Dat zou bijvoorbeeld een bliksem stroom kunnen zijn, die vanuit de buitenwereld zijn weg vindt in een kabelboom. Daar loopt de stroom over alle betrokken kabels dezelfde kant op. Dat betekent dezelfde richting in alle geleiders in deze kabels –signalen en retourverbindingen–, in het Engels "common-mode". Vandaar de naam common mode (CM)-stroom (Aspect 20).

Deze stroom is *niet nodig* voor het bedoelde signaal transport.

Integendeel, ze veroorzaakt mogelijk storing en, in het bliksem geval, vaak schade en is daardoor dus zeer *ongewenst*.

'Leaky' interconnections give rise to CM-currents

transfer-impedance, Z_T, demonstated using the cables in the radio experiment, slide 9

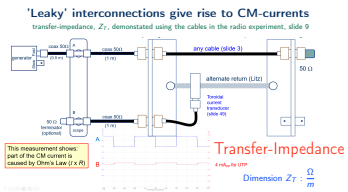


This measurement shows:
part of the CM current is
caused by Ohm's Law (I x R)

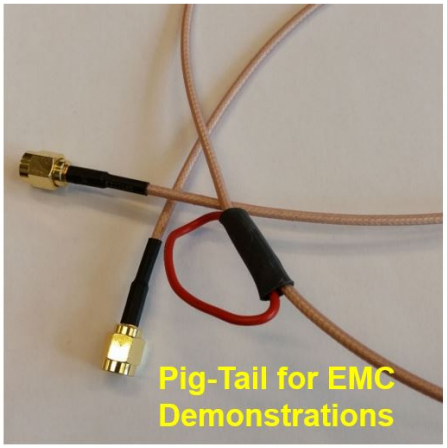
Transfer-Impedance

4 mA_{PP} for UTP

Dimension Z_T : $\frac{\Omega}{m}$



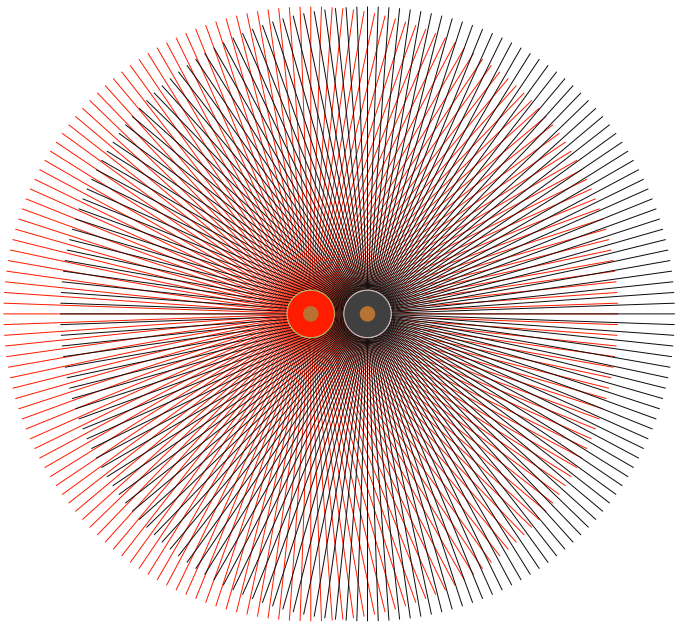
We kunnen CM-stroom meten met één van de in dia 22 getoonde stroomtangen door een extra retour geleider parallel aan een kabel aan te brengen. Afhankelijk van de kwaliteit van die kabel kunnen we dan zien dat méér of minder CM-stroom in die extra geleider terecht komt. Dat is dus stroom die eigenlijk in de retour geleider van de kabel zelf thuishoort maar "weglekt" naar de omgeving en zo over parallel lopende andere kabels loopt. En op die manier mogelijk overspraak veroorzaakt omdat die "andere" kabels vermoedelijk ook "lekken". Het fenomeen wordt "Transfer-Impedantie" genoemd. Ten gevolge van, in bovenstaand voorbeeld, de retourstroom over de binnenkant van de kabelmantel ontstaat een grotere of kleinere stoorspanning tussen de uiteinden van de kabelmantel. Die veroorzaak in de buiten-kring –hier de litze draad, gewoonlijk andere kabelmantels– een stroom die via hetzelfde mechanisme weer een stoor-spanning opleveren aan de binnenkant van de mantel van een gestoorde kabel. Die stoor-spanning wordt in feite *opgeteld* bij het bedoelde –DM– signaal in de kabel (Aspect 21). De effecten van transfer-impedantie –"stoorspannig per ampère", oftewel: Ω– worden proportioneel erger als de kabel langer wordt. De dimensie is daarom $\frac{\Omega}{m}$ (Aspect 22)



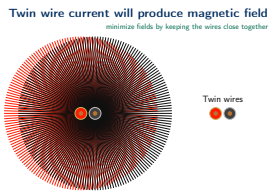
In dia 4 hebben we al kunnen zien dat tweeling snoer of twisted pairs velden lekken die hoorbaar zijn te maken met behulp van een radio ontvanger. Het zelfde is ook het geval met de, op zich nette, coax kabel waarin een kleine onderbreking in de mantel is gemaakt die is gerepareerd met een draad lus. Dat type geometrie-verstoringen in kabels heet *varkens-staartje* of *pig-tail* (Aspect 23).
Meestal treffen we die verstoringen aan op de uiteinden bijvoorbeeld als een coax kabel moet worden aangesloten op een kroonsteentje. Evenzo ontstaat een "pig-tail" als een goede coax kabel met coaxiale connectoren moet worden aangesloten op een apparaat bedoeld voor banaan-stekers. De benodigde verloop-stekers zijn in de handel verkrijgbaar –commercially available–!
Dit lekken van CM-stroom door kabels wordt *transfer-impedantie* genoemd. Die CM-stroom kan over andere kabels vloeien en daar storing veroorzaken –door diezelfde transfer-impedantie– (Aspect 24).
Die stroom zou bij goede kabels geen probleem hoeven zijn (Aspect 25).
Voor een kritische hoogfrequent verbinding wordt het gebruik van varkens-staartjes daarom dringend afgeraden. Ook die, welke in de handel verkrijgbaar zijn.

Twin wire current will produce magnetic field

minimize fields by keeping the wires close together



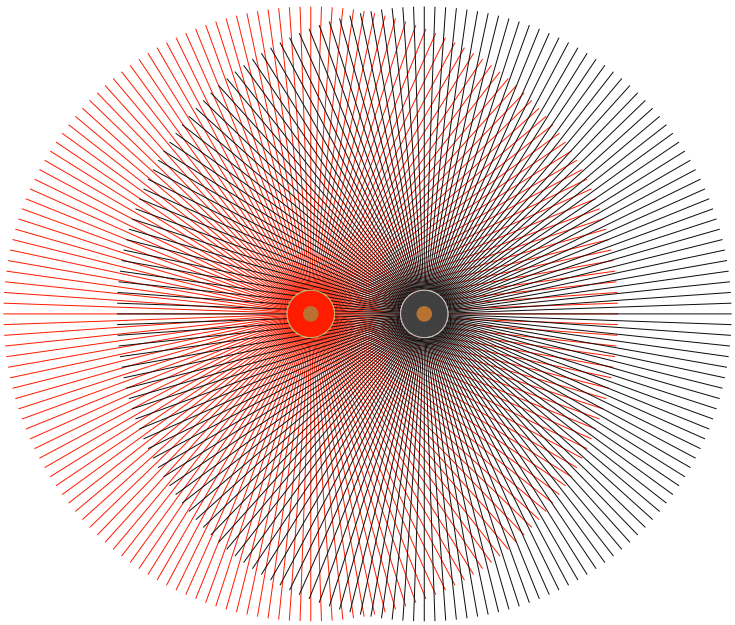
Twin wires



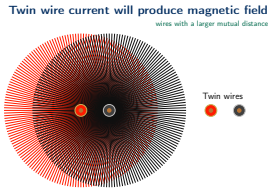
Mijn afstudeer professor, Prof. D. Bosman, liet een animatie zien door twee fysieke overhead dia's met een radiaal lijnenpatroon over elkaar heen te schuiven.
Daarmee liet hij, als Moiré effect, de *magnetische* veldlijnen zien die ontstaan als twee draden, waarin een zuiver DM stroom loopt, naar elkaar toe of van elkaar af worden bewogen.
Antenne rekenaars bij, destijds, de Hollandse Signaal apparaten in Hengelo (Ov.), tegenwoordig: Thales Nederland, hebben aangetoond dat de patronen kloppen –gebruik makend van de **Maxwell vergelijkingen**–.

Twin wire current will produce magnetic field

wires with a larger mutual distance



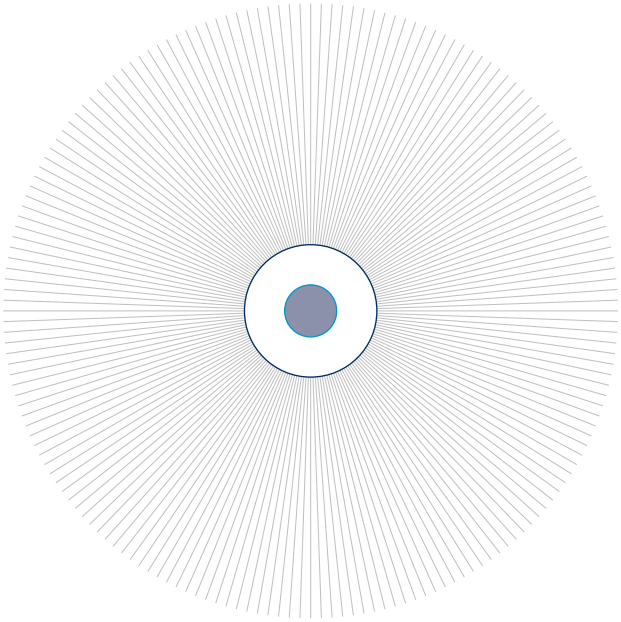
Twin wires



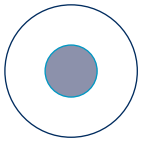
Door de radiale patronen en de bijbehorende draden een stukje te verschuiven ontstaat een nieuw *magnetisch* veld patroon...

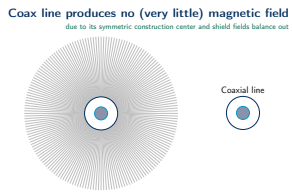
Coax line produces no (very little) magnetic field

due to its symmetric construction center and shield fields balance out



Coaxial line

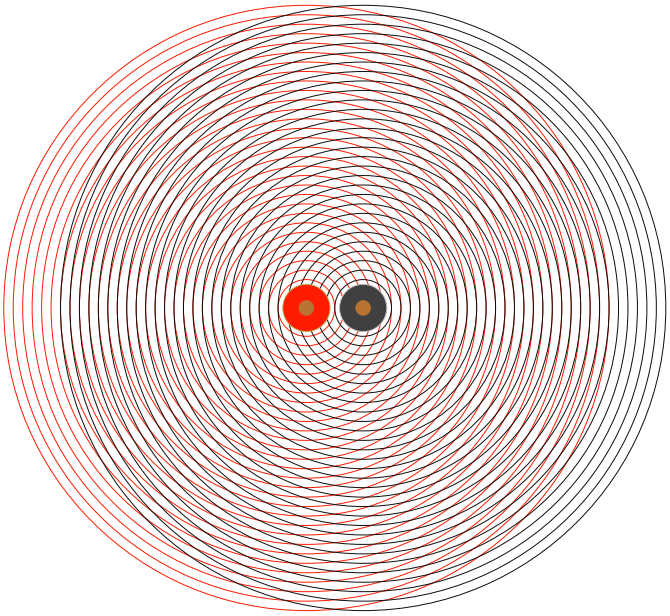




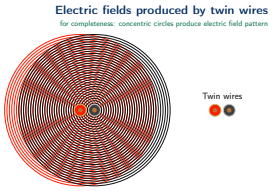
Doen we hetzelfde voor de coaxiale kabel, dan liggen de beide radiale lijn patronen precies op elkaar en ontstaan dus geen veldlijnen.
Deze gebalanceerde geometrie van de coax is dus belangrijk voor de kabel kwaliteit.
Daarom wordt afgeraden om coax kabels in een scherpe knik om een hoek te leggen omdat dit de symmetrie verstoort.
We zullen zo meteen zien dat er nog andere mogelijkheden zijn om de kwaliteit van coax om zeep te helpen.

Electric fields produced by twin wires

for completeness: concentric circles produce electric field pattern



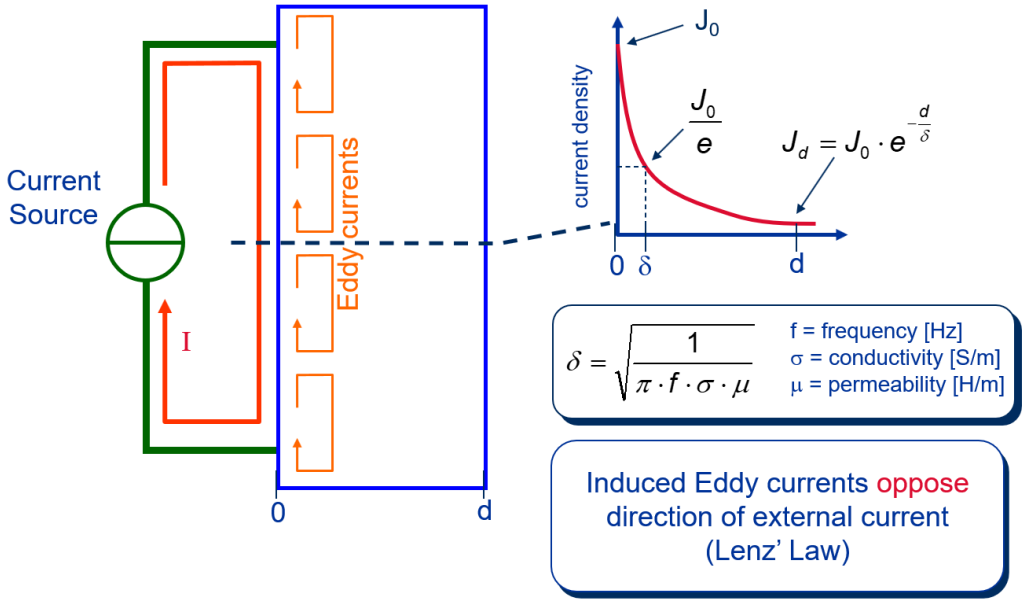
Twin wires

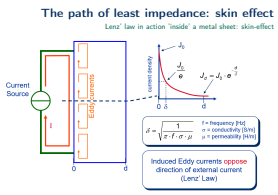


Toen ik deze animatie, eerst in powerpoint, had nagebouwd, kwam ik op het idee om dit kunstje ook met concentrische cirkels te proberen.
En zowaar!
Het resultaat is het *elektrische* veld patroon van twee parallelle draden –tweeling snoer of twisted pairs–.
Ook dit is door de rekenaars van de antenne afdeling van de Hollandse Signaal apparaten bevestigd.

The path of least impedance: skin effect

Lenz' law in action 'inside' a metal sheet: skin-effect





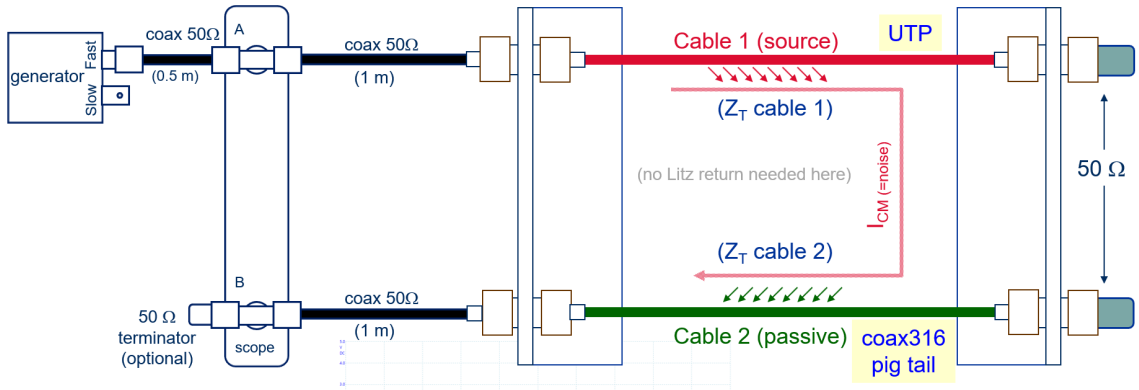
Bij de demonstratie van de verbetering van overspraak tussen twee draden met behulp van een breed metalen retour vlak, hebben we al gezien dat de retour-stroom van de storende draad in feite direct onder de draad kruipt. Dit is het gevolg van het feit dat geïnduceerde stromen in de tegenovergestelde richting vloeien ten opzichte van de veroorzakende stroom in de storende draad. Voor de goede orde: inductie betekent dat dit geldt voor wisselstromen, hoe hoger de frequentie, hoe beter dit werkt. Die inductie is het grootst zo dicht mogelijk bij de draad.

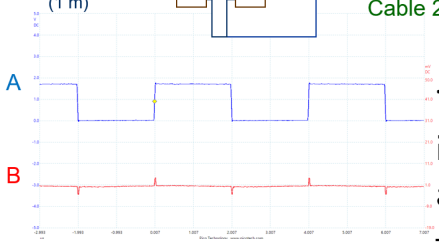
Dus als we een stroom-voerende draad tegen een metalen vlak aanleggen dan zal de retour-stroom proberen de draad zo dicht mogelijk te volgen. Dit is een in de natuur ingebakken zuinigheids principe: de stroom probeert met minimale investering in energie te vloeien. Elke omweg betekent dat magnetisch veld moet worden opgebouwd om te kunnen vloeien. Datzelfde zuinigheids principe zorgt ervoor dat de meeste retour-stroom aan het oppervlak vloeit dat naar de draad is toegekeerd. Hoe dieper je in het metaal komt, hoe verder van de veroorzakende draad of kabel, hoe minder stroom er loopt.

Dit heet het skin-effect –huid effect–. Dit skin effect levert de belangrijkste bijdrage aan de afschermende werking van metalen behuizingen.

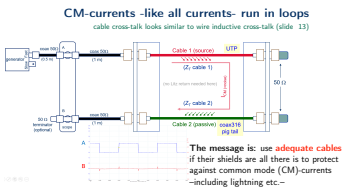
CM-currents -like all currents- run in loops

cable cross-talk looks similar to wire inductive cross-talk (slide 13)





The message is: use **adequate cables** if their shields are all there is to protect against common mode (CM)-currents –including lightning etc.–

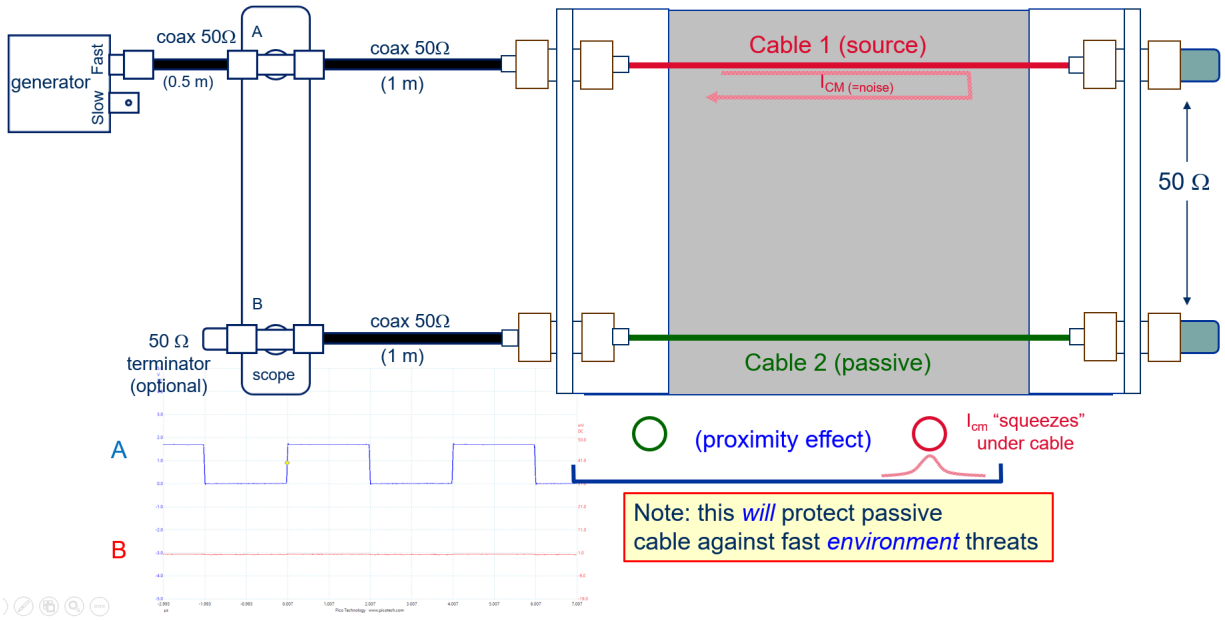


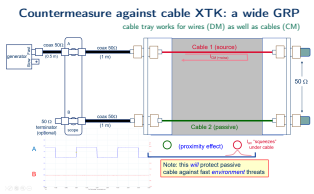
We herhalen het overspraak experiment met de twee draden, nu met twee kabels.
De extra retour-draad kan vervallen omdat de kabels hun eigen retour hebben (Aspect 26).
De overspraak ziet er nagenoeg hetzelfde uit als in dia 13.
Uit elkaar halen of naar elkaar toe bewegen doet weinig (Aspect 27).
De reden is dat:
1. De gebruikte kabels relatief veel CM-stroom veroorzaken resp. oppikken –"veldlek"–.
2. De route voor de CM stroom gaat bij voorkeur over geleiders, in dit geval de beide kabels: ook CM-stromen lopen in kringen (Aspect 28)! Door de lucht is geen optie.

Merk op dat het gebruik van **goede kabels** de **beste manier** is om deze overspraak te minimaliseren, vooral als er geen andere opties zijn –zoals het brede metalen vlak in de volgende dia–.

Countermeasure against cable XTK: a wide GRP

cable tray works for wires (DM) as well as cables (CM)

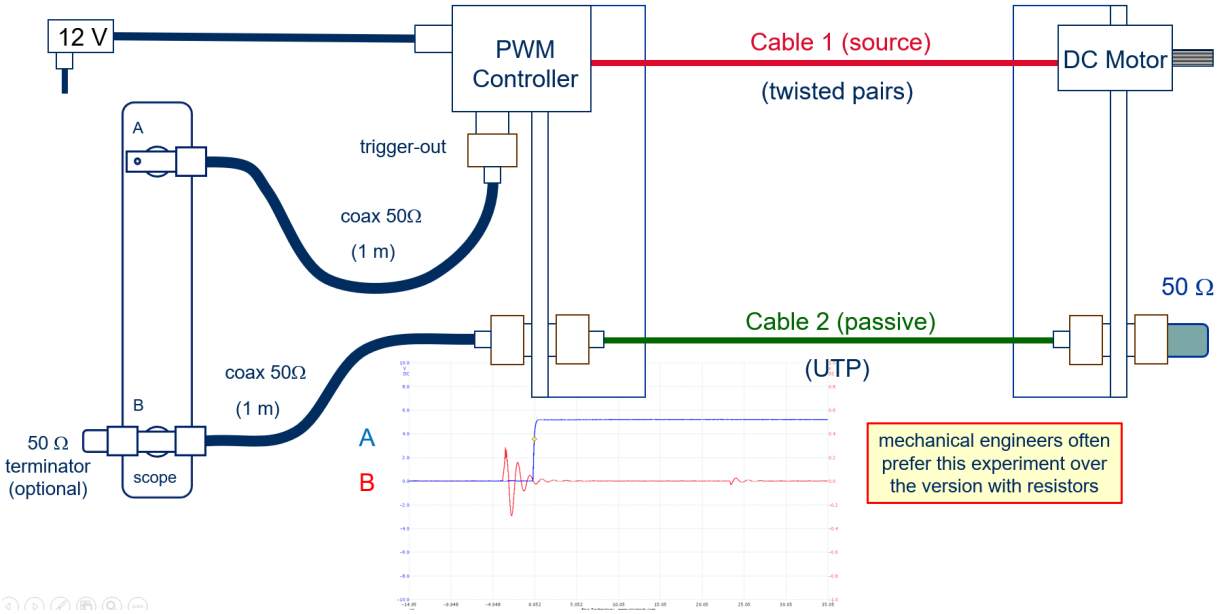


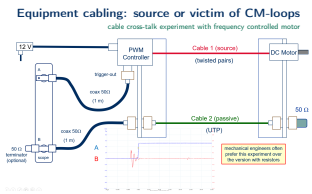


Tegen breed metaal leggen werkt echter weer uitstekend om de overspraak te verminderen!
De reden is dezelfde als in het experiment met de draden.
Alleen is het nu de CM-stroom die door het metalen vlak uit de buurt van de gevoelige kabel –victim– gehouden wordt in plaats van de DM retour-stroom van de simpele storende draad.
Het metalen vlak is ook een uitstekende bescherming tegen allerhande CM-stromen die vanuit de omgeving kunnen komen, denk aan bliksem (LEMP) of elektromagnetische puls (EMP)!

Equipment cabling: source or victim of CM-loops

cable cross-talk experiment with frequency controlled motor

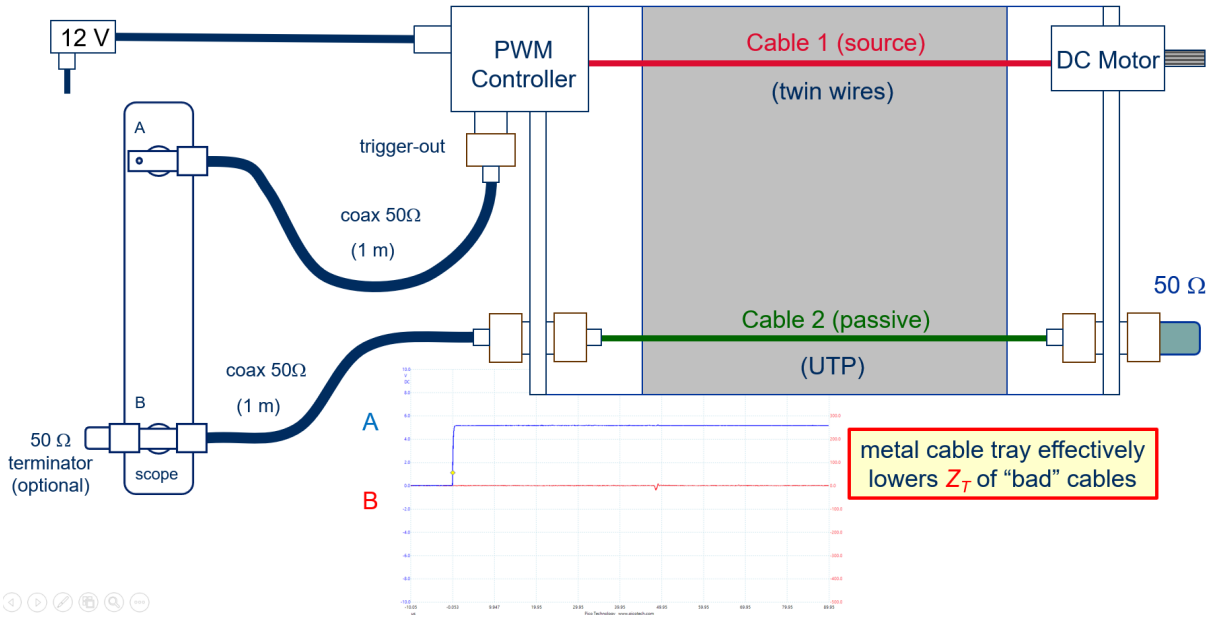


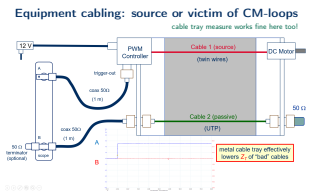


Tot nog toe was de belasting van de test-generator een simpele weerstand.
Dezelfde experimenten kunnen echter ook worden gedaan met een frequentie-geregelde elektromotor.

Equipment cabling: source or victim of CM-loops

cable tray measure works fine here too!





Ook hier helpt het metalen referentie-vlak uitstekend!

Part 2: Measures

We hebben nu alle relevante fenomenen wel gezien en focussen nu op de maatregelen.
Een aantal hebben we natuurlijk al gezien:

- Lussen klein maken
- Gebruik maken van breed metaal

Maar daar is nog wel wat meer over te vertellen!

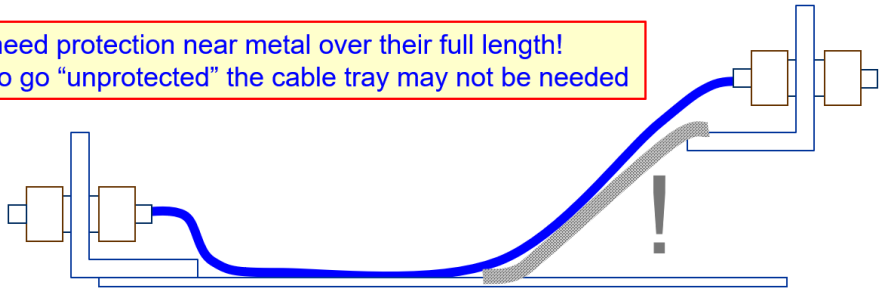
Equipment cabling: source or victim of CM-loops

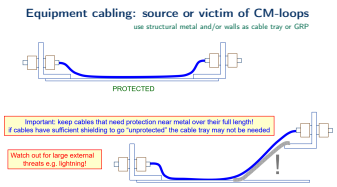
use structural metal and/or walls as cable tray or GRP

PROTECTED

Important: keep cables that need protection near metal over their full length!
if cables have sufficient shielding to go “unprotected” the cable tray may not be needed

Watch out for large external threats e.g. lightning!

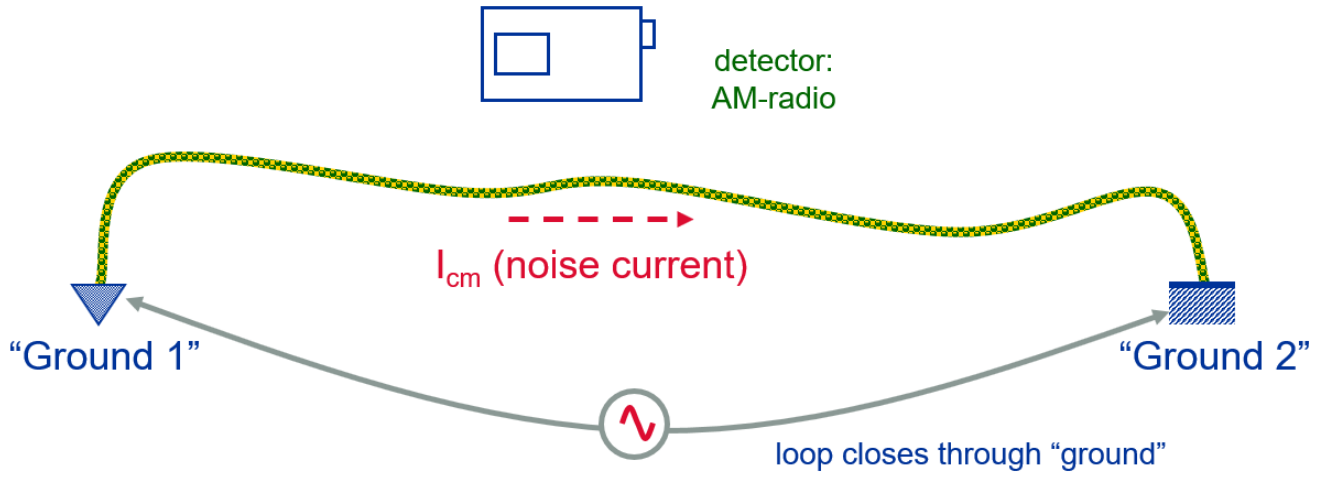


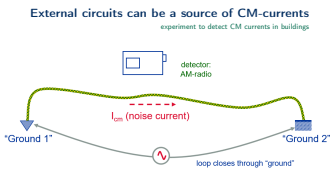


De werking van toegepast metaal om storing tussen kabels te verminderen berust op inductie: in feite induceert de storende CM-stroom een stroom in het eronder liggende metaal in de tegenovergestelde richting –het min-teken in de wet van Faraday–.
Hoe dichter de storende kabel bij het metalen vlak ligt, hoe beter deze stroom in het metaal “onder de kabel kruipt”.
Daardoor blijft de CM-stroom bij de kabel en worden effecten op andere kabels op dit zelfde metaal sterk verminderd.
Het metaal verbetert in feite de kwaliteit van de kabel oftewel vermindert de transfer-impedantie (Z_T). Dit effect kan nog worden versterkt door de kabel op het metaal af te dekken –af te schermen– met aluminium folie. Gebruik maken van een beschikbare metalen buis is natuurlijk ook een prima oplossing!
Voorwaarde is wel dat de te beschermen kabels over hun volle lengte tegen het beschermende metaal liggen en dat dit metaal ook over de volle lengte geleidend verbonden is: géén spleten of overgangen die door verf o.i.d. worden geïsoleerd!

External circuits can be a source of CM-currents

experiment to detect CM currents in buildings

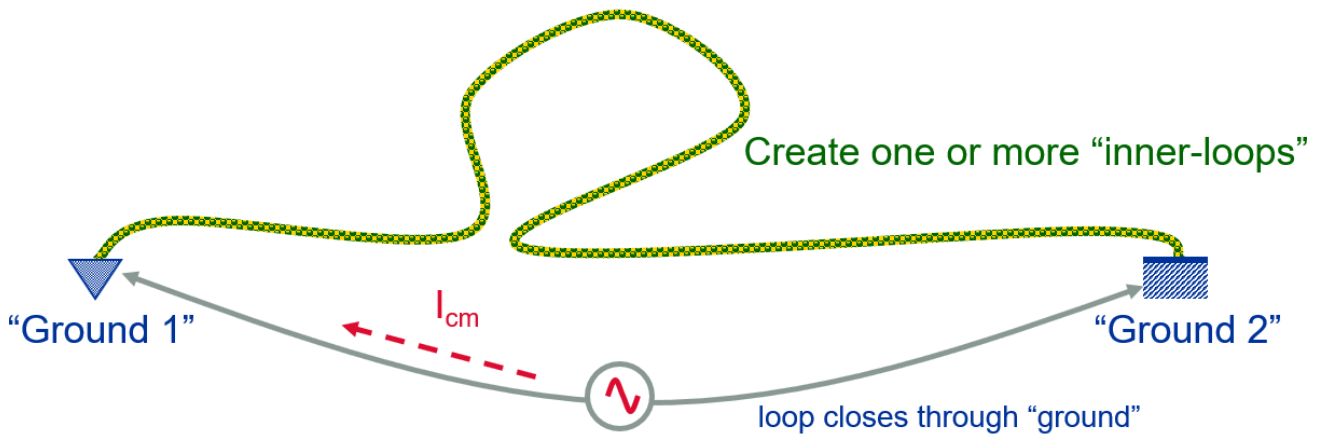


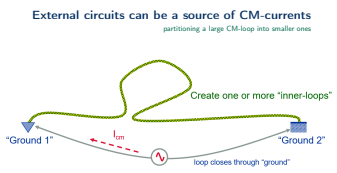


Stoorvelden in gebouwen kunnen we laten zien met een lange, groen-gele, (aard-) draad met aan het uiteinde twee krokodil-klemmen –de kleur is natuurlijk niet relevant–. Die klemmen worden op twee verschillende plaatsen op de locale veiligheids aarde –Engels: protective earth– (PE) van stopcontacten aangesloten.
Met behulp van een amplitude modulatie (AM)-radio afgestemd op een stil gedeelte van de lange golf –Engels: long wave– (148.5 - 283.5 kHz) (LW) of de middengolf –Engels: medium wave– (531 - 1602 kHz) (MW)-band wordt deze opgepikte storing uit de omgeving hoorbaar gemaakt. Dat gebeurt door de groen-gele draad een aantal slagen om de radio te wikkelen. De radio laat nu een stoorsignaal horen, in het algemeen bestaande uit een brom-toon op de locale net-frequentie en hoger frequente ruis (Aspect 29). Dit is het gevolg van de altijd aanwezige EM-velden op plaatsen waar "andere elektrische installaties" aanwezig zijn.
Die velden, vertegenwoordigd door spanningsverschillen tussen de beide aansluitpunten van de groen-gele draad, veroorzaken een CM-stroom in de draad die weer via de gemaakte "spoel" om de radio op de daarin aanwezige ferriet-antenne wordt overgedragen (Aspect 30).

External circuits can be a source of CM-currents

partitioning a large CM-loop into smaller ones



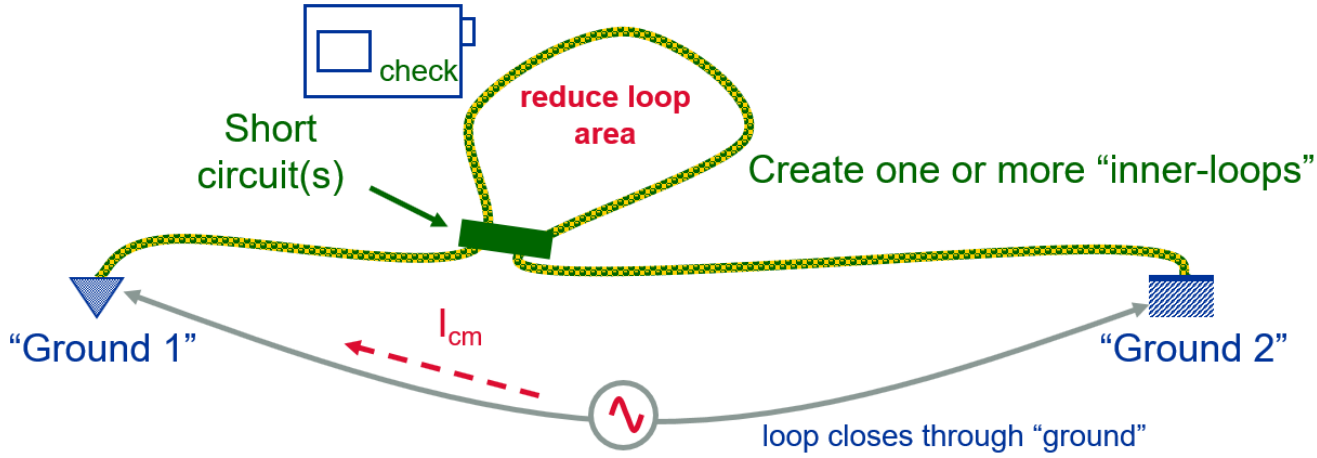


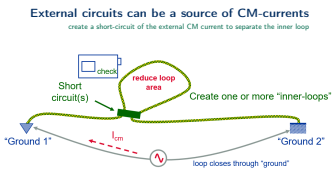
Nu we een grote CM-lus hebben gemaakt, de veiligheids-aarde bedrading van het gebouw in combinatie met onze lange draad, kunnen we de effecten van die CM-stroom op bepaalde plaatsen proberen te reduceren.

Dat doen we door binnen-lussen te maken, bv. één zoals in de dia afgebeeld.
In het experiment is de binnenlus precies de plaats waar onze radio in de draad is opgenomen.

External circuits can be a source of CM-currents

create a short-circuit of the external CM current to separate the inner loop

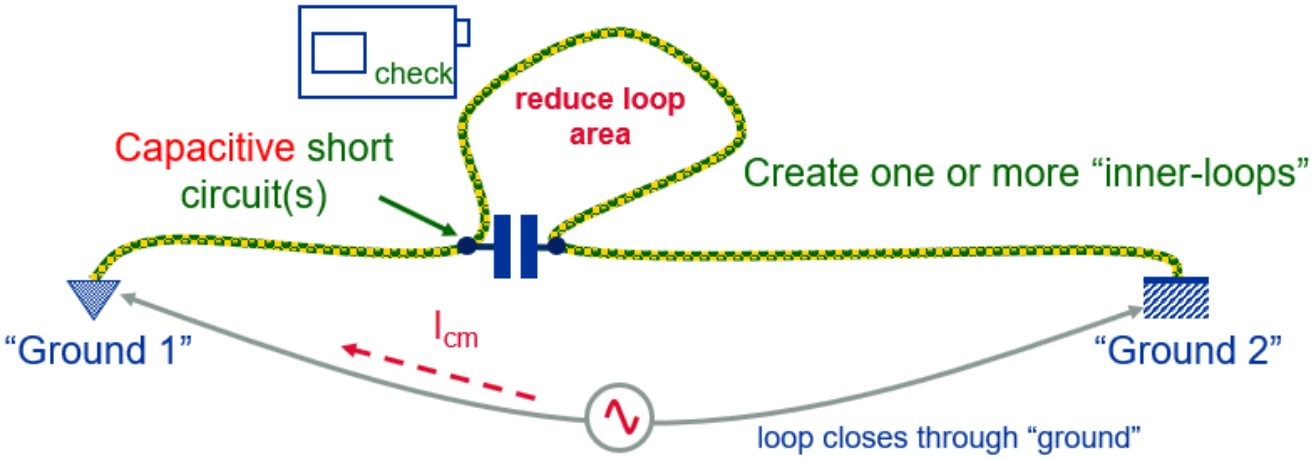


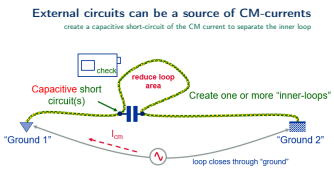


Voor zover dat nog niet het geval is brengen we de radio in de binnen-lus aan door de lus er een aantal keren omheen te wikkelen.
Het bekende stoorsignaal is weer hoorbaar!
Door nu de twee op de groen-gele draad aangebrachte contact-punten met elkaar te verbinden, stopt de storing op de radio abrupt (Aspect 31).
Dit is het gevolg van de kortsluiting + het feit dat stromen altijd de meest laag-impedante weg volgen. Dat is hier de buiten-route omdat de stroom bij het aard-circuit van het gebouw hoort (Aspect 32).
Deze *kortsluiting* noemen we een stroomgrens, Engels: current boundary (CB).
De stroom loopt niet meer door de binnen-lus. Ze is echter niet verdwenen en loopt gewoon in het gedeelte van de groen-gele draad buiten de lus, hetgeen met de radio aan te tonen is.
Nadat we de stroomgrens hebben aangebracht moeten we nog wel de ontstane binnenlus zo klein mogelijk maken. Het is tenslotte een lus waarop via inductie vanuit de lange draad weer storing kan ontstaan.

External circuits can be a source of CM-currents

create a capacitive short-circuit of the CM current to separate the inner loop

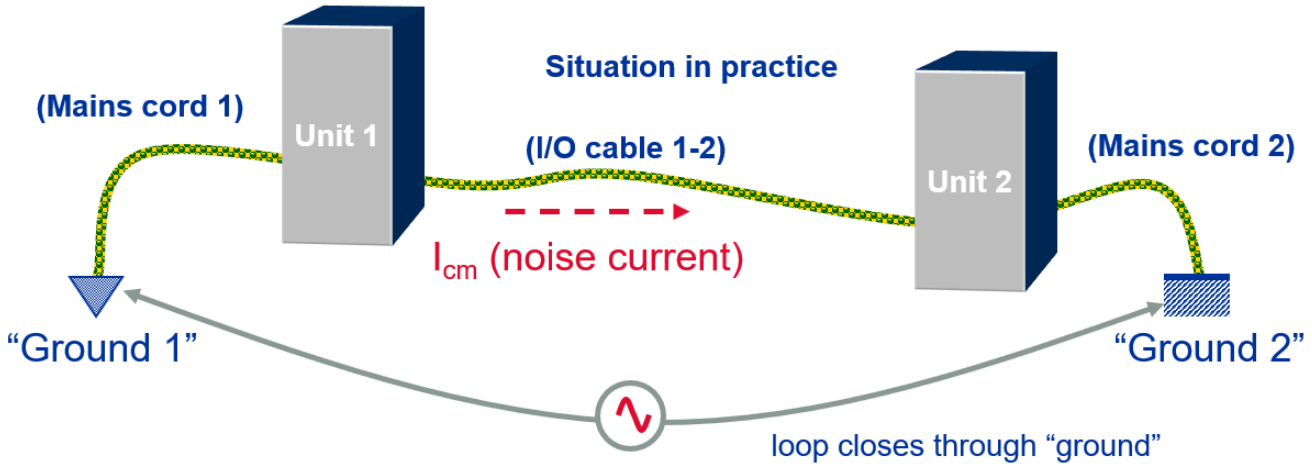


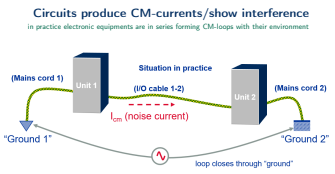


In gevallen waar geleiders een rol spelen die niet mogen worden kortgesloten, kan een condensator worden gebruikt.
Dit treffen we bijvoorbeeld aan in netfilters waarin zowel de L(ine) als de N(eutral) niet met de toestel-kast (aarde) mogen worden verbonden maar naast de netspanning ook meestal CM stromen meevoeren, in principe dezelfde –uit dezelfde bron– als die we tussen de beide PE punten aantroffen.
Dat CM-stoorsignaal is in principe een *hoogfrequent signaal*, getuige het feit dat we dit met een radio toestel hoorbaar moeten maken (Aspect 33).
Dit is aan te tonen door in plaats van een “harde” kortsluiting gebruik te maken van een condensator (Aspect 34).
Voor de MW-band is een condensator van ca. 0.1 μF meestal voldoende.
Voor de LW-band is een wat groter exemplaar nodig: rond de 1 μF.
De oorspronkelijke CM-stroom van vóór de condensator blijft ook hier nog steeds aanwezig (Aspect 35).

Circuits produce CM-currents/show interference

in practice electronic equipments are in series forming CM-loops with their environment

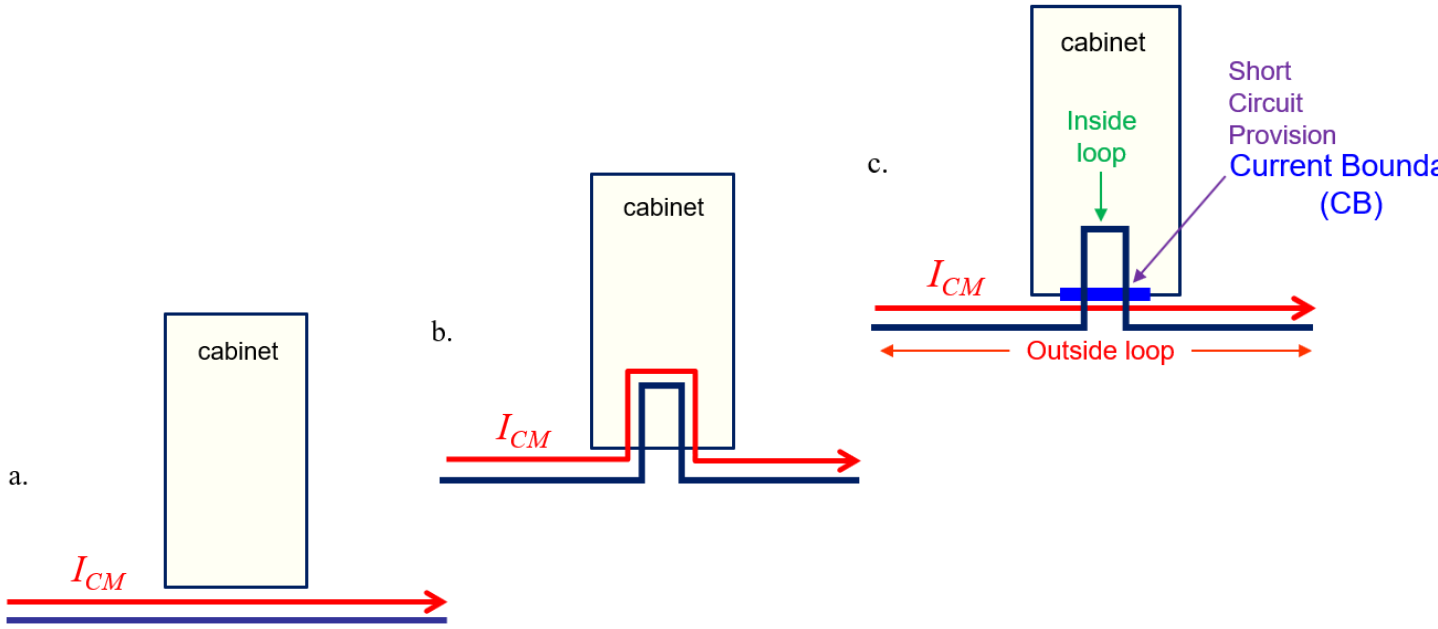


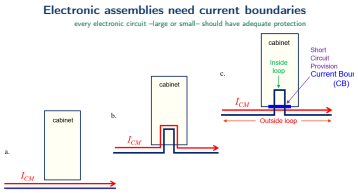


Onze geel-groene draad is in feite een metafoor voor de praktijk situatie waarin een aantal –grotere of kleinere– apparaten met elektronica via hun bekabeling in serie staan met een grotere omgeving waaruit mogelijk allerhande CM-stromen komen die deze apparaten kunnen storen (Aspect 36).
Omgekeerd is het mogelijk dat een bepaalde groep apparaten CM-stromen juist veroorzaakt en de buitenwereld instuurt (Aspect 37).

Electronic assemblies need current boundaries

every electronic circuit –large or small– should have adequate protection

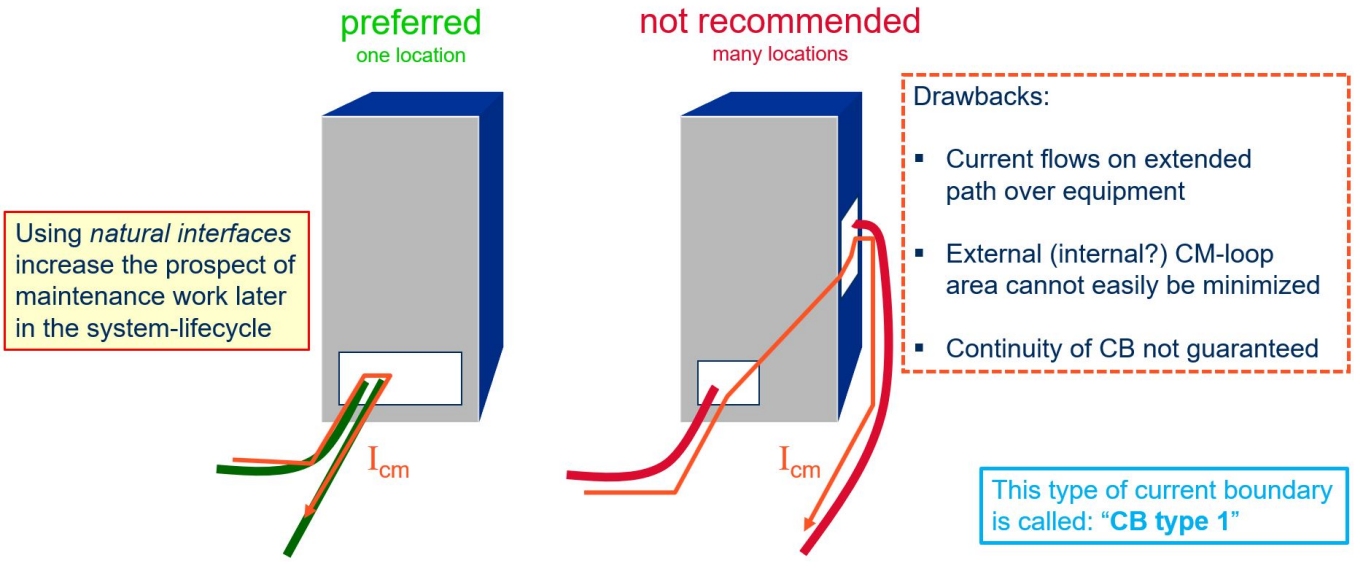


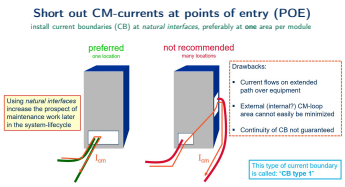


Als we aannemen dat het toestel –cabinet– in plaatje a. moet worden opgenomen in een grotere installatie dan moeten we de nodige bedrading daarop aansluiten.
Dit gebeurt in plaatje b.
We kijken hier puur naar de common mode (CM)-stroom die vanuit de grotere installatie nu ons toestel binnenkomt.
Is dit een probleem? Er zou storing vanuit de buitenwereld ons toestel binnen kunnen komen. Ook kan het zijn dat ons nieuwe apparaat juist CM-stromen veroorzaakt en via de nieuw aangesloten bedrading het grotere systeem instuurt.
Daarom moet elk toestel worden uitgevoerd met een stroomgrens, CB, een kortsluiting voor CM-stromen.
Zo'n stroomgrens houdt interne CM-stromen binnen en externe CM-stromen buiten (Aspect 38)

Short out CM-currents at points of entry (POE)

install current boundaries (CB) at *natural interfaces*, preferably at **one** area per module

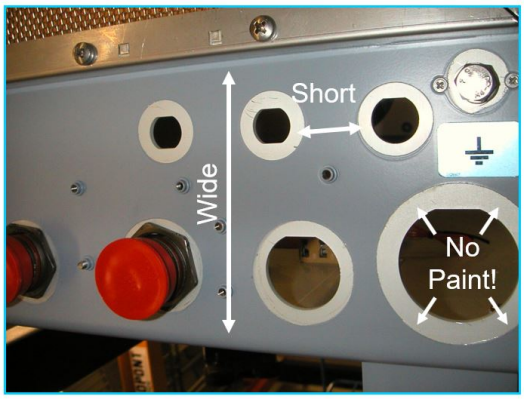




Een stroomgrens moet op een apparaat of toestel wordt aangebracht op de plaats waar kabels vanuit andere apparaten –of bronnen: netsnoer– het toestel binnenkomen. Kabels zijn transport-wegen voor CM-stromen zoals onze groen-gele draad in het experiment. **Alle** op een toestel aangesloten kabels moeten voor CM-stomen worden kortgesloten op deze stroomgrens. De voorziening op een apparaat is de –geheel geleidende, metalen– connector-plaat. Deze connector plaat wordt stroom-grens **type 1**, afgekort CB-type 1 genoemd (Aspect 39).
Dat gaat in het algemeen via het metalen connector-huis dat met de afscherming –de geleidende kabel-mantel– is verbonden. is die mantel er niet, dan zal een filter moeten worden toegepast. Dat filter moet in dezelfde connector-plaat worden opgenomen waarmee ook de kabel-mantels zijn verbonden. De functie van dit filter is de draden in de –niet afgeschermde– kabel "laag-Ohmig" met het metaal van de connector-plaat te verbinden (Aspect 40). De niet-afgeschermde kabel is in de praktijk het netsnoer en de daarin aanwezige PE-draden, in Europa groen-geel, kunnen direct met de connector-plaat worden verbonden. De overige 2 of 3 draden met de netspanning krijgen elk een zg. Y2 condensator die aan specifieke veiligheids-eisen moeten voldoen.

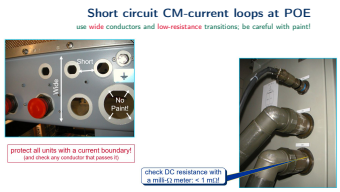
Short circuit CM-current loops at POE

use wide conductors and low-resistance transitions; be careful with paint!



protect all units with a current boundary!
(and check any conductor that passes it)

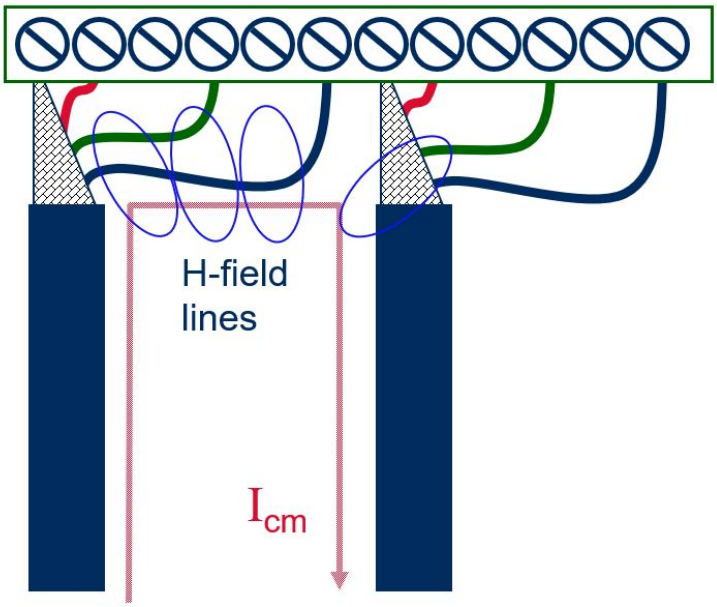
check DC resistance with
a milli-Ω meter: < 1 mΩ!

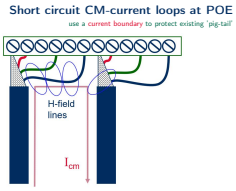


Deze dia toont de karakteristieke "connector-plaat". In dit geval onderdeel van een compleet afgeschermde metalen kast, een voorziening die verderop in het verhaal stroomgrens Type-3 wordt genoemd. Zoals te zien is, zijn tijdens het spuiten van de kast de plaatsen waar de connectoren komen blank gelaten. Dat is noodzakelijk omdat anders de connectoren geen goed contact maken met de kast. Dat contact moet laag-Ohmig zijn over 360°. Anders levert de connector overgang een te grote verstoring op de symmetrische geometrie van de kabel-afscherming en zal een deel van de erover vloeiende CM-stroom toch in het toestel terecht komen.
Dan zijn er nog wat eisen voor de connector-plaat: Deze moet breed zijn terwijl de afstanden tussen de connectoren relatief kort zijn ten opzichte van die breedte.
Bedenk dat er, met name in militaire installaties, best grote CM-stromen mogelijk zijn. Moeten die over een grote afstand over een smalle strip, dan is er een kans dat door de hogere weerstand + inductie een verschil-spanning tussen de connectoren ontstaat die dan mogelijk aan de binnenkant van de stroomgrens weer aanleiding is tot stoor-stromen: een "lek" dus. Het is belangrijk dat de laag-Ohmigheid na de montage van de connectoren wordt gecontroleerd! Met een milli-Ohm meter. Een waarde onder de 1 mΩ moet goed haalbaar zijn.

Short circuit CM-current loops at POE

use a current boundary to protect existing 'pig-tail'

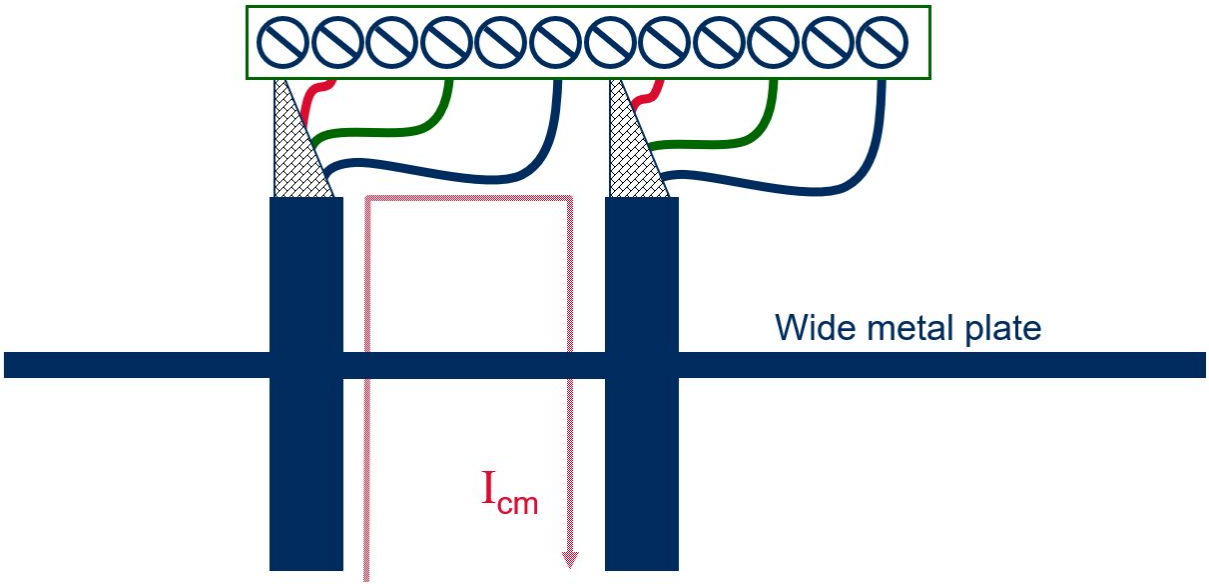


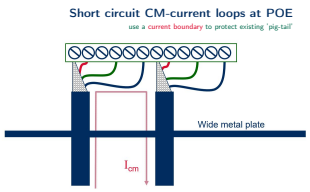


Hierboven is een situatie weergegeven die als het ware schreeuwt om een stroomgrens:
Een kabel ader-lijst waarop twee afgeschermde kabels zijn aangesloten.
Maar natuurlijk moet de mantel dan open.
Zoals de mantel hierboven zijn afgewerkt, onder één van de boutjes op de ader-lijst, waarbij de aders van de kabels zijn verdeeld over weer andere boutjes, is elektromagnetisch gezien geen goed idee.
Mogelijk loopt er een CM-stroom over de kabel die dus nu ook over de aderlijst en alles erachter kan vloeien.
Evenzo kan het zijn dat de kabel-aders stromen vervoeren waarvan de velden niet in de buitenwereld terecht mogen komen

Short circuit CM-current loops at POE

use a current boundary to protect existing 'pig-tail'



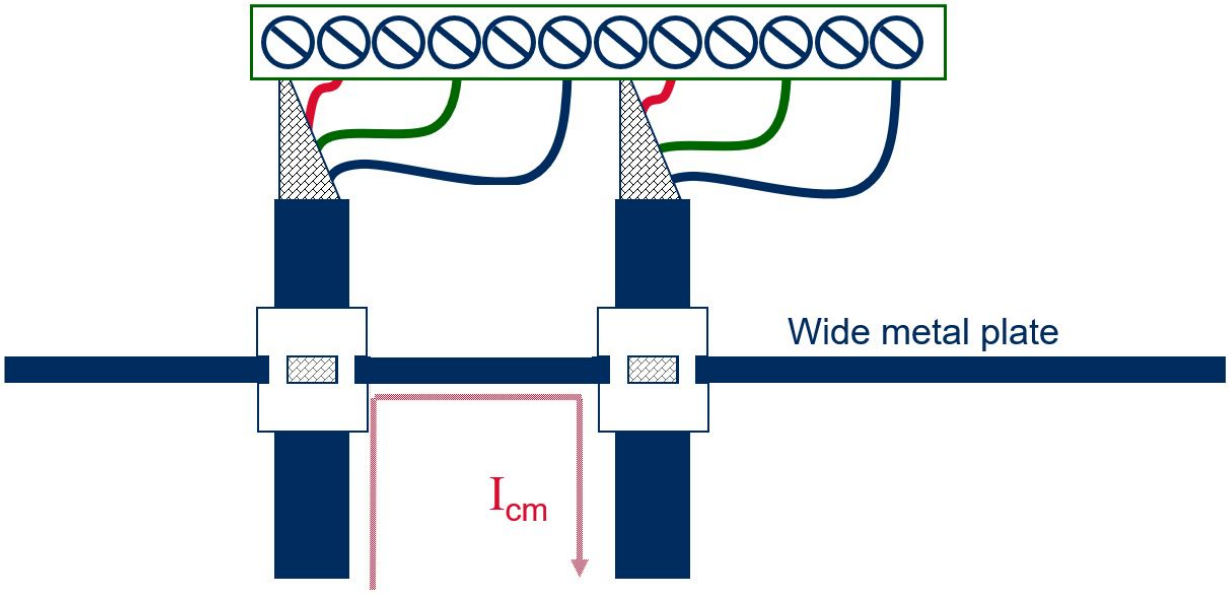


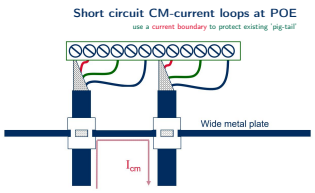
Een brede metalen plaat met twee gaten voor de kabels is een begin...

Maar dit feit alleen helpt niet tegen de effecten van CM-stromen.

Short circuit CM-current loops at POE

use a current boundary to protect existing 'pig-tail'



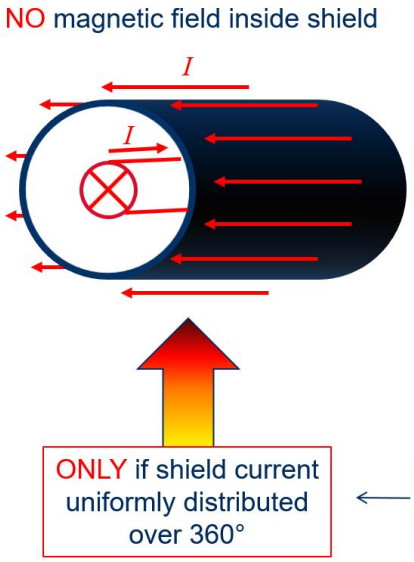


In situaties waar, zoals hier, een apparaat vast met de bijbehorende kabels is verbonden, wordt de connector-plaat een wartel-plaat.
Daarop worden speciale EMC-wartels gemonteerd die de kabel mantels, laag-Ohmig, met elkaar en de brede metalen plaat verbinden (Aspect 41).

De filter-eis voor het netsnoer blijft ook bij de wartel-plaat gelden.
Dat filter kan doorgaans niet "zomaar" op de metalen wand worden geschroefd omdat die wand vaak de buitenwand van het toestel is en er dus ook een waterdichtheids eis is.

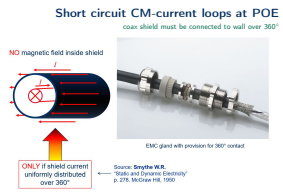
Short circuit CM-current loops at POE

coax shield must be connected to wall over 360°



EMC gland with provision for 360° contact

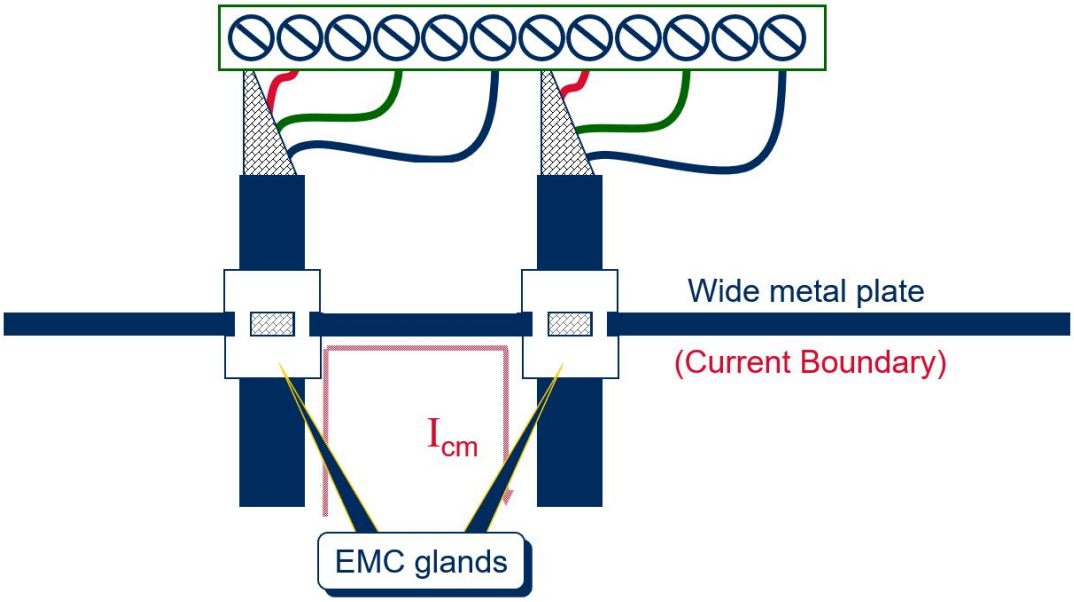
Source: **Smythe W.R.**
"Static and Dynamic Electricity"
p. 278. McGraw Hill, 1950

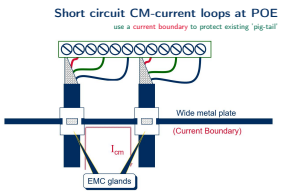


De EMC-kabelwartel bevat naast een rubberen afdicht-ring ook een veertje dat de mantel van de kabel netjes rondom over de genoemde 360° met de wartel verbindt.
Daartoe is het belangrijk dat de kabel ter plekke van zijn isolatie-mantel is ontdaan (Aspect 42).
Natuurlijk geldt dat ook voor de plaats waar de wartel in het metaal wordt gemonteerd: géén verf!

Short circuit CM-current loops at POE

use a current boundary to protect existing 'pig-tail'





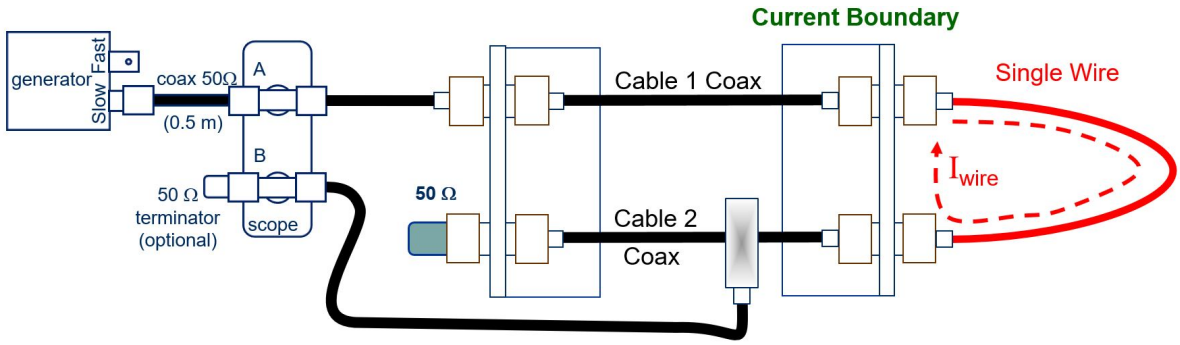
Pas nadat de EMC-wartels succesvol zijn gemonteerd zal de metalen plaat (meestal de kastwand) als stroomgrens gaan werken:

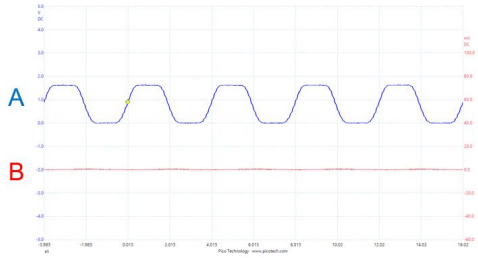
1. De CM-stromen uit de buitenwereld blijven buiten. Ze vloeien dus nog wel over de afge-schermde kabels. Die moeten voldoende kwaliteit hebben om die stromen aan te kunnen zonder storing binnen te laten.
2. Eventuele CM-stromen binnen de kast blijven binnen. Ze worden kortgesloten door dezelfde stroomgrens gevormd door de metalen plaat met de wartels. Ook hier geldt dat het pad van deze stromen in de kast geen storing mag veroorzaken. Dat is een ontwerp kwestie en valt onder het kopje "zelf-compatibiliteit" op dia 5, met andere woorden: het toestel moet wel werken vóórdat het ergens kan worden geïnstalleerd.

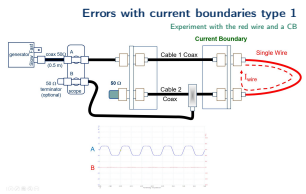
De oplossing hierboven toont aan dat varkensstaartjes of "Pig-Tails" in principe best toelaatbaar zijn als er voldoende stroomgrenzen aanwezig zijn om eventuele problemen met "lekkende velden" op te vangen. Het aanbrengen van stroomgrenzen is een universele oplossing en kan worden toegepast vanaf het niveau van de micro-chip tot en met de grootste installaties die een complete fabriek vullen. Dat heet "zoning" en valt buiten het kader van deze basis cursus.

Errors with current boundaries type 1

Experiment with the red wire and a CB



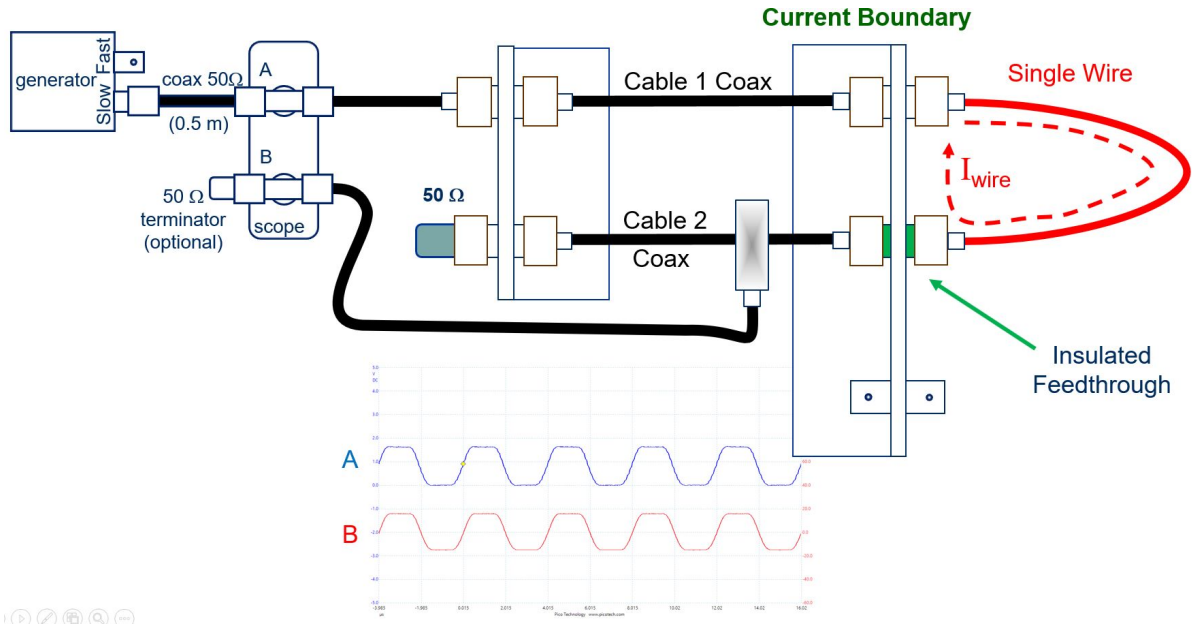


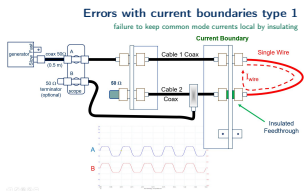


Het experiment in deze dia lijkt veel op de lange draad proef van dia 9.
Het verschil is dat het eind van de draad niet meer is aangesloten op kanaal B van de oscilloscoop. In plaats daarvan is een weerstand aangebracht om de stroom op gang te houden en meten we die stroom nu met de ring-kern stroomtang.
De bedoelde –DM– stroom meten we op de rode draad. Daarna meten we de CM-stroom in de coax achter de stroom-grens – aangeduid met Current Boundary–.
Vanwege de stroomgrens is die CM-stroom nul.
Om het experiment niet te complex te maken wordt voor dit experiment de “langzame” uitgang van de generator gebruikt.

Errors with current boundaries type 1

failure to keep common mode currents local by insulating

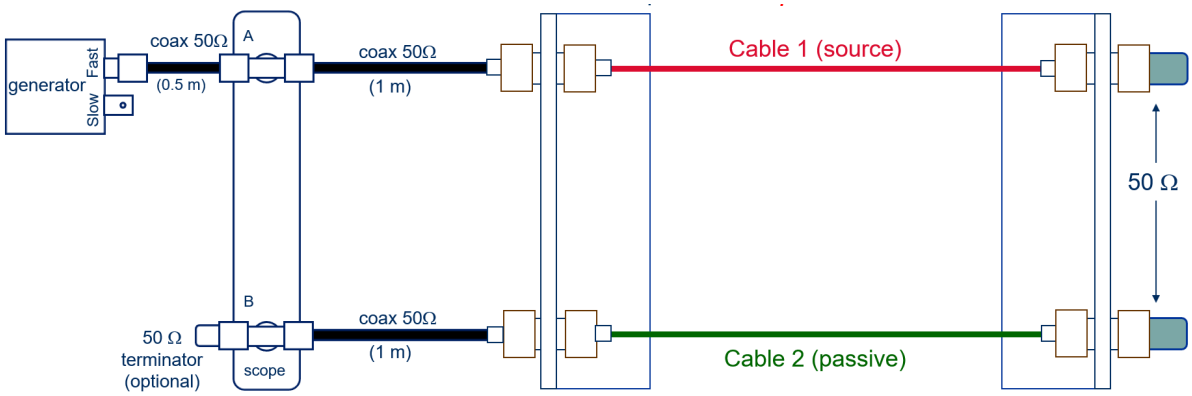


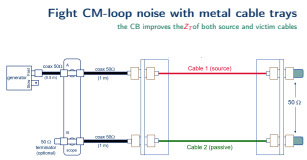


Een fout die sommige apparatuur bouwers –in het verleden (?)– wel eens maakten is het volgende:
Om stromen naar de kast vanuit een in hun ogen gevoelige kabel te voorkomen, plaatsten ze een geïsoleerde BNC-doorvoer connector in de wand die oorspronkelijk als stroomgrens bedoeld was.
Het effect is dat de coax mantel aan de stroomgrens zijde niet meer is aangesloten op de wand en de stroom uit de rode draad via de coax kern nu niet meer *gecompenseerd* wordt door de stroom in de coax-mantel. Een **mega-varkensstaart**!
Gevolg: we meten de complete stroom in de rode draad nu ook op de coax!
De boodschap is: gebruik nooit geïsoleerde connectoren op een stroomgrens (Aspect 43).

Fight CM-loop noise with metal cable trays

the CB improves the Z_T of both source and victim cables

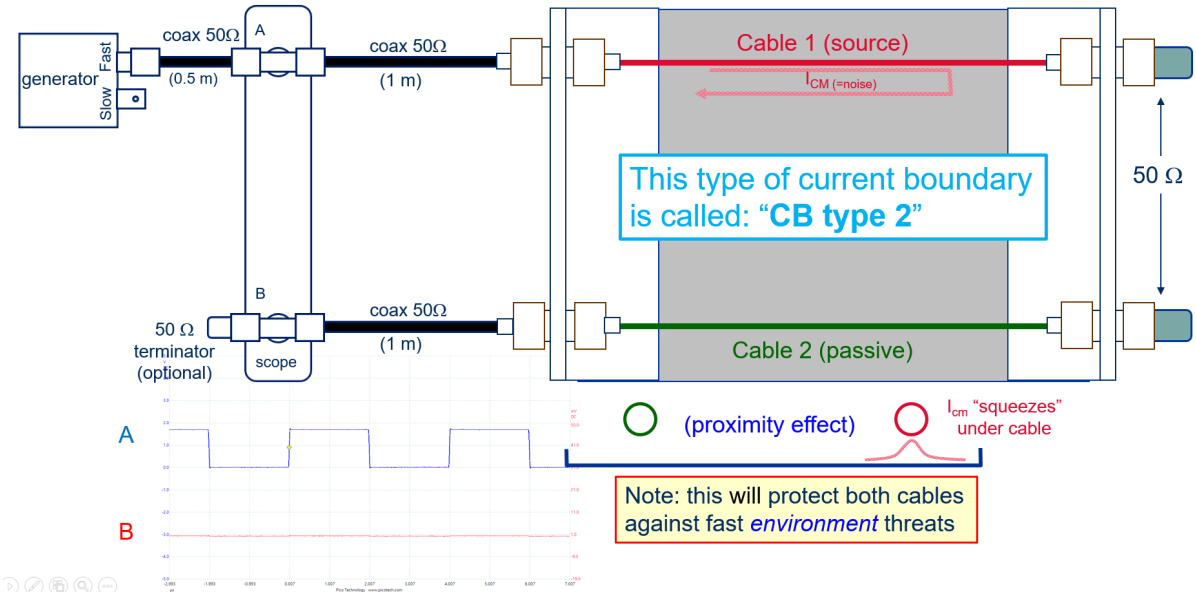


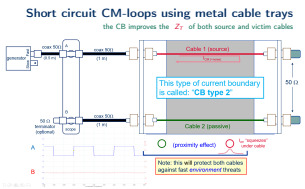


In de proef met de twee –wat mindere kwaliteit– kabels van dia 39 is duidelijk geworden dat we ook iets moeten met de CM-stromen in kabel-bundels als we geen overspraak kunnen dulden.

Short circuit CM-loops using metal cable trays

the CB improves the Z_T of both source and victim cables

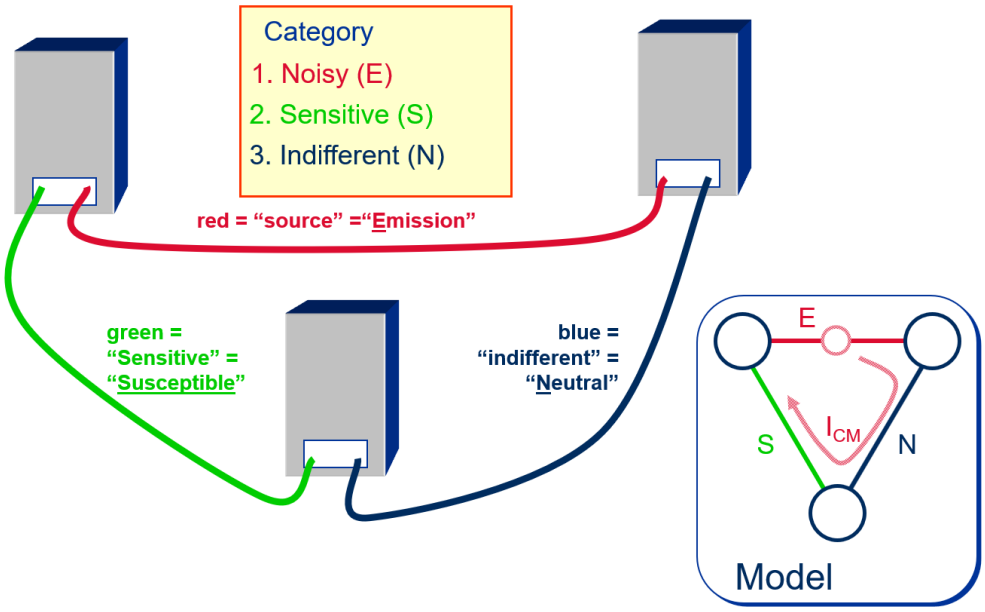


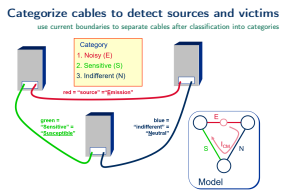


We zagen een gigantische verbetering toen een metalen plaat, een "kabel-goot" onder de kabels werd gelegd en de plaat "breed" werd verbonden met de beide stroomgrenzen waarop de kabels werden aangesloten.
Die metalen kabel-goot –cable tray– werkt als een stroomgrens en houdt de beide kabels elektromagnetisch gescheiden.
Bij de storende, op de bron aangesloten, kabel, vloeit de door de kabel opgewekte CM-stroom vlak onder de kabel in de kabel-goot terug naar de bron. In feite fungeert de kabel-goot als een stroomgrens. De kabel-goot wordt daarom aangeduid als een Type 2 CB.
Daarmee verbetert de kabel-goot de kwaliteit van de afscherming van de bron-kabel (Aspect 44)
In het geval van de gevoelige kabel reduceert de kabel-goot de lus waarmee de kabel stoorvelden zou kunnen oppikken (Aspect 45).
Het effect van een kabel-goot kan tijdelijk worden nagebootst door een gehele kabel in aluminium folie te wikkelen. Die moet dan wel op de stroomgrenzen aan weerszijden worden aangesloten (Aspect 46).

Categorize cables to detect sources and victims

use current boundaries to separate cables after classification into categories



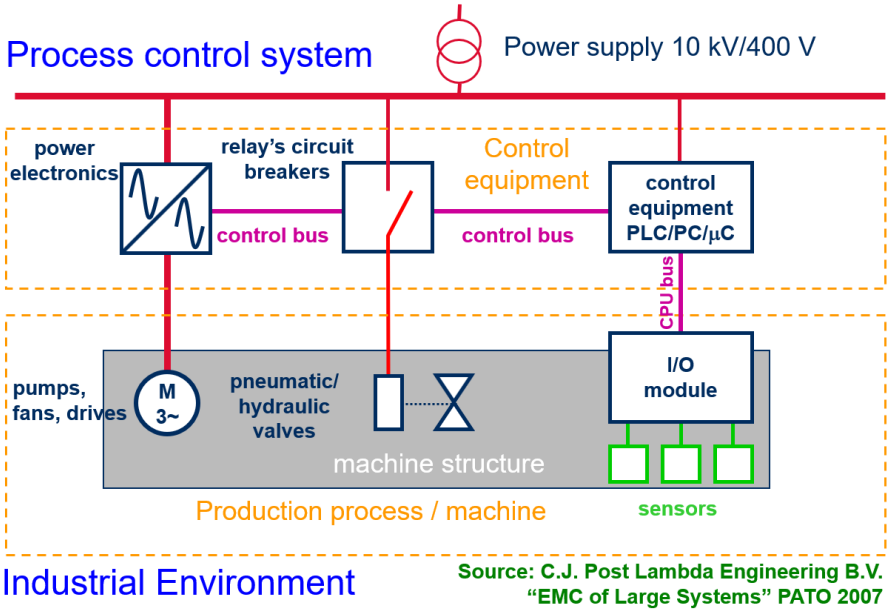


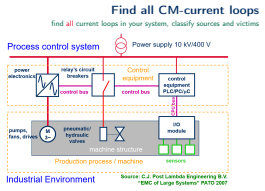
Nadat alle toestellen in een systeem van afdoende stroomgrenzen zijn voorzien, moet worden bepaald wat een verstandige kabelrouting is.
Dit gebeurt door een plaatje te maken van het complete systeem en daarin aan te geven welke kabel verbindingen nodig zijn voor de gewenste functie. We gebruiken hier het simpelste geval van drie toestellen met kabels. Vervolgens wordt voor elke kabel uitgezocht tot welke categorie deze behoort:
Storende kabels, die CM-stromen produceren. Deze kabels worden in EMC analyses vaak aangeduid met de letter E, van emissie en/of met een rode kleur

Gevoelige kabels, die CM-stromen kunnen oppikken. Deze kabels worden in analyses aangeduid met de letter S, van *susceptibiliteit* – gevoeligheid– en/of met een groene kleur
Neutrale– kabels die geen CM-stromen veroorzaken of oppikken maar deze wel kunnen *transporteren*. Deze kabels worden aangeduid met de N, van neutraal en/of met een zwarte of blauwe kleur. In EMC-standaarden worden in het algemeen nog nauwkeuriger onderverdelingen gemaakt zoals *zeer gevoelig*, *gevoelig*, *indifferent*, *storend*, *zeer storend*. Dat detail is minder relevant en wordt in deze basis-cursus achterwege gelaten.

Find all CM-current loops

find all current loops in your system, classify sources and victims





Deze activiteit moeten we dan uiteindelijk uitvoeren voor het complete onderhavige systeem dat er in het algemeen al een stuk complexer uitziet.

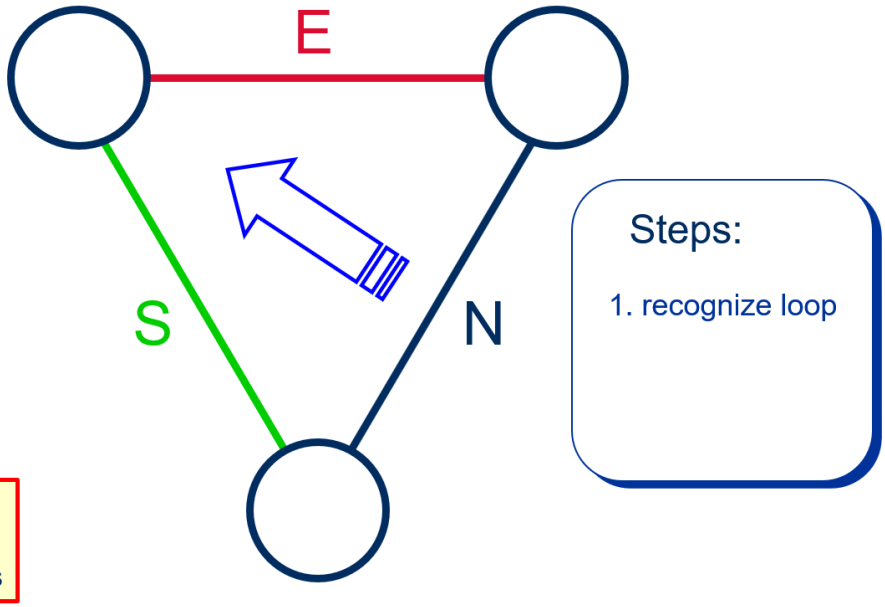
We zullen ons voor deze cursus beperken tot het simpelste geval met drie toestellen, onderling verbonden met drie kabels, één van elk type:

Label	Categorie	Effect
E	Emitterend	Veroorzaakt CM-stromen
S	Susceptibel	Is gevoelig voor CM-stromen
N	Neutraal	Is noch gevoelig noch storend maar kan CM-stromen transporteren

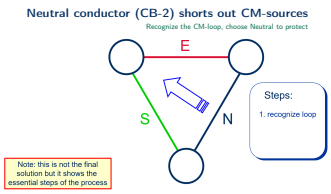
Elk toestel wordt als een cirkel uitgebeeld en de aaname moet zijn dat deze toiestellen allemaal een nette stroomgrens hebben waar alle in en uitgaande kabels op aangesloten worden.

Neutral conductor (CB-2) shorts out CM-sources

Recognize the CM-loop, choose Neutral to protect



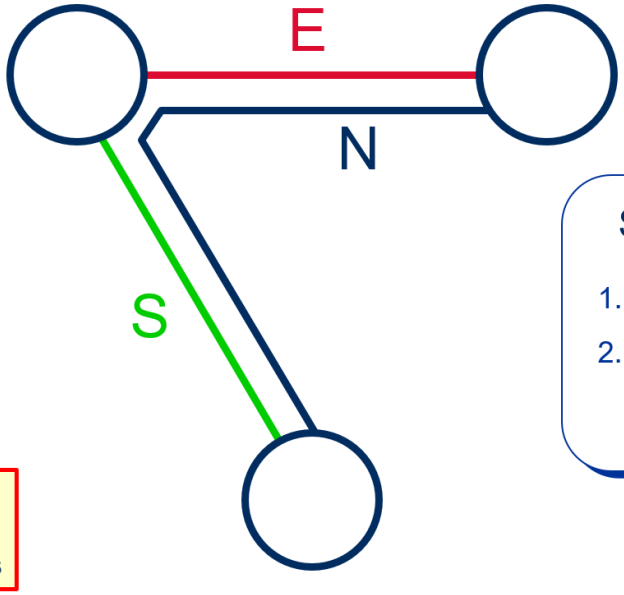
Note: this is not the final solution but it shows the essential steps of the process



Het basis-principe bij het *scheiden van kabels* is dat in deze basis common mode (CM)-kring waarin zowel een *storende* als een *gevoelige/susceptibele* kabel aanwezig zijn, wordt *opgedeeld in twee kringen*, gebruikmakend van een *neutrale* verbinding/geleider (Aspect 47).

Neutral conductor (CB-2) shorts out CM-sources

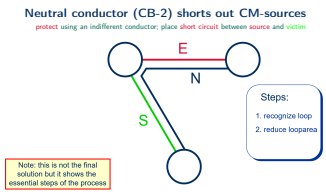
protect using an indifferent conductor; place short circuit between source and victim



Steps:

1. recognize loop
2. reduce looparea

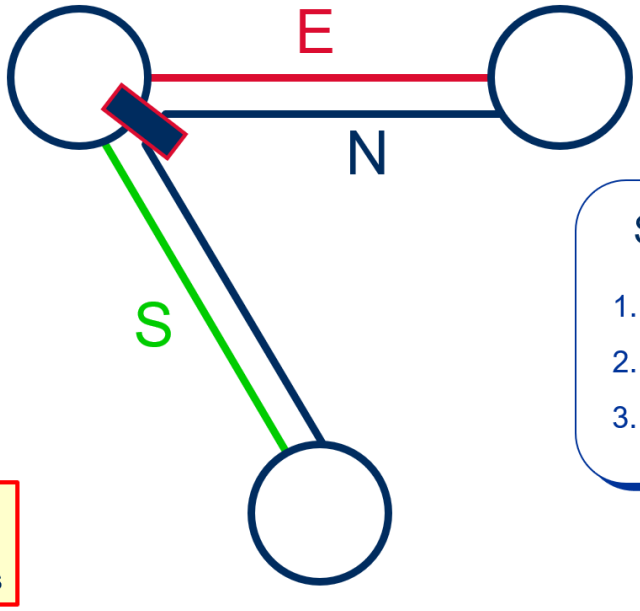
Note: this is not the final solution but it shows the essential steps of the process



Deze Neutrale (N) geleider wordt verlengd en langs de Emissie (E) en Susceptibele (S) kabels gelegd.
Daardoor wordt de totale CM-lus een stuk verkleind.
Dit heeft zonder meer een effect op de velden in de omgeving van deze toestellen maar nog weinig op de storing die de S kabel oppikt.

Neutral conductor (CB-2) shorts out CM-sources

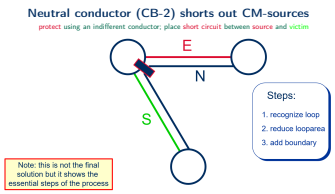
protect using an indifferent conductor; place short circuit between source and victim



Steps:

1. recognize loop
2. reduce looparea
3. add boundary

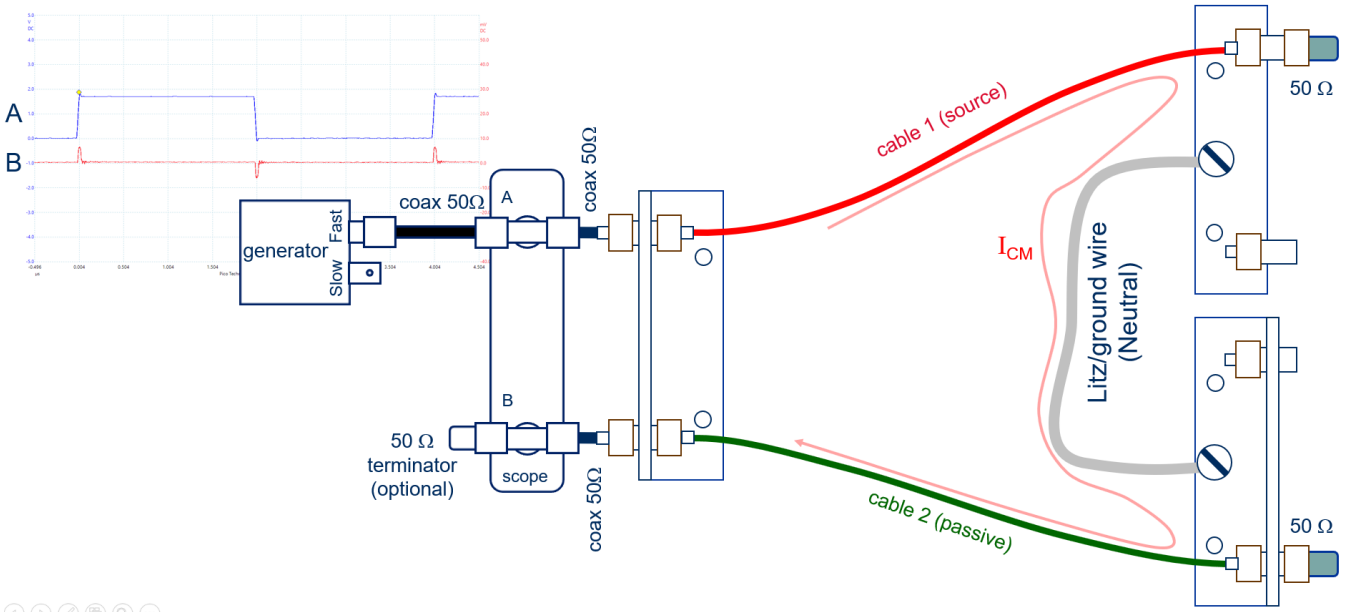
Note: this is not the final solution but it shows the essential steps of the process

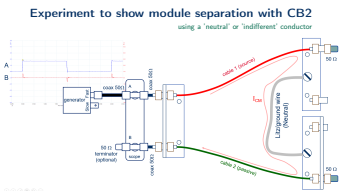


Om dat te verbeteren wordt tenslotte de Neutrale geleider verbonden met de stroomgrens op het toestel linksboven.
Daardoor wordt de CM-stroom ten gevolge van de E kabel via de N geleider kortgesloten op het toestel waar de E geleider vandaan komt.
In feite gebruiken we de Neutrale (N) geleider om als retour te fungeren voor de CM-stroom die door de Emissie (E) kabel gegenereerd wordt.
Het andere deel van de Neutrale (N) geleider verkleint de lus met de Susceptibele (S) kabel.
Merk op dat de maatregel sterk lijkt op de rode en de zwarte draad die tegen hun gemeenschappelijke retour gelegd worden om overspraak te reduceren in dia 16.
Dit is duidelijk niet het laatste woord hierover.
Dit kan nog sterk verbeterd worden.

Experiment to show module separation with CB2

using a 'neutral' or 'indifferent' conductor

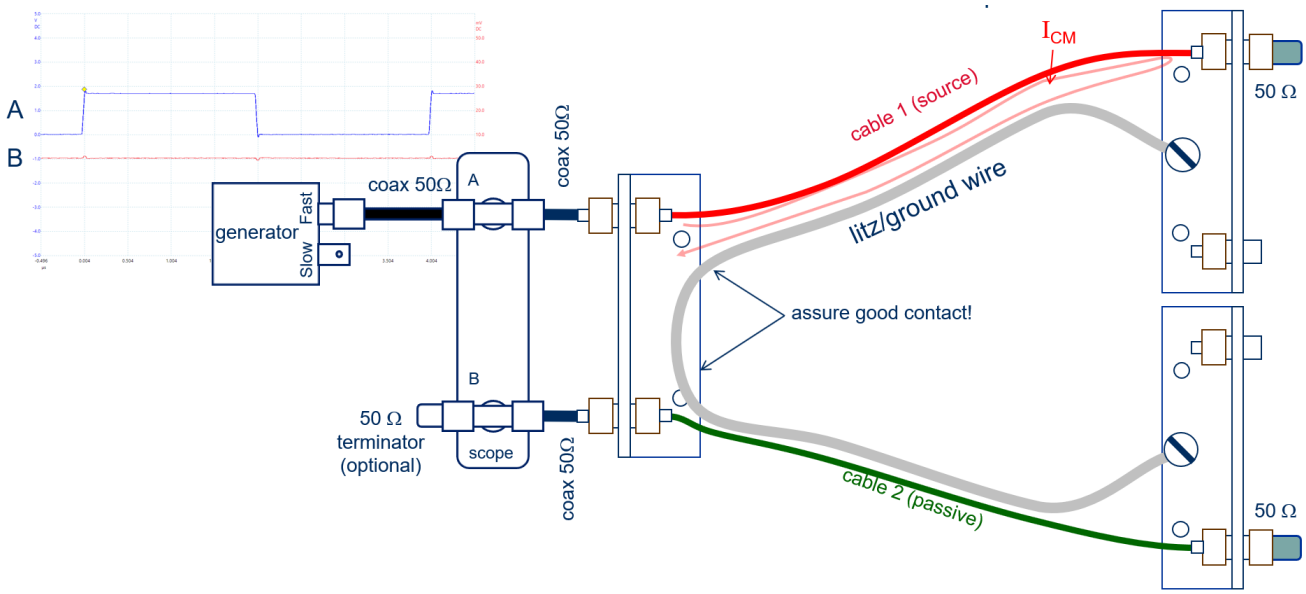


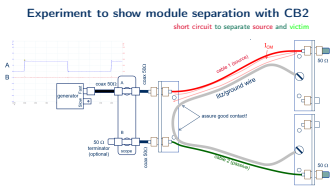


Om dat te verbeteren wordt tenslotte de Neutrale geleider verbonden met de stroomgrens op het toestel linksboven.
Daardoor wordt de CM-stroom ten gevolge van de E kabel via de N geleider kortgesloten op het toestel waar de E geleider vandaan komt.
In feite gebruiken we de Neutrale (N) geleider om als retour te fungeren voor de CM-stroom die door de Emissie (E) kabel gegenereerd wordt.
Het andere deel van de Neutrale (N) geleider verkleint de lus met de Susceptibele (S) kabel.
Merk op dat de maatregel sterk lijkt op de rode en de zwarte draad die tegen hun gemeenschappelijke retour gelegd worden om overspraak te reduceren in dia 16.
Dit is duidelijk niet het laatste woord hierover.
Dit kan nog sterk verbeterd worden.
Eerst maar even het experiment waarmee de zojuist beschreven methode wordt gedemonstreerd.
De opstelling is de kabel-overspraak set met aan de rechterzijde twee in plaats van één stroomgrens.
Die beide stroomgrenzen zijn vervolgens weer doorverbonden met de flexibele litze draad.
Deze litze in nu onze Neutrale (N) geleider.

Experiment to show module separation with CB2

short circuit to separate source and victim

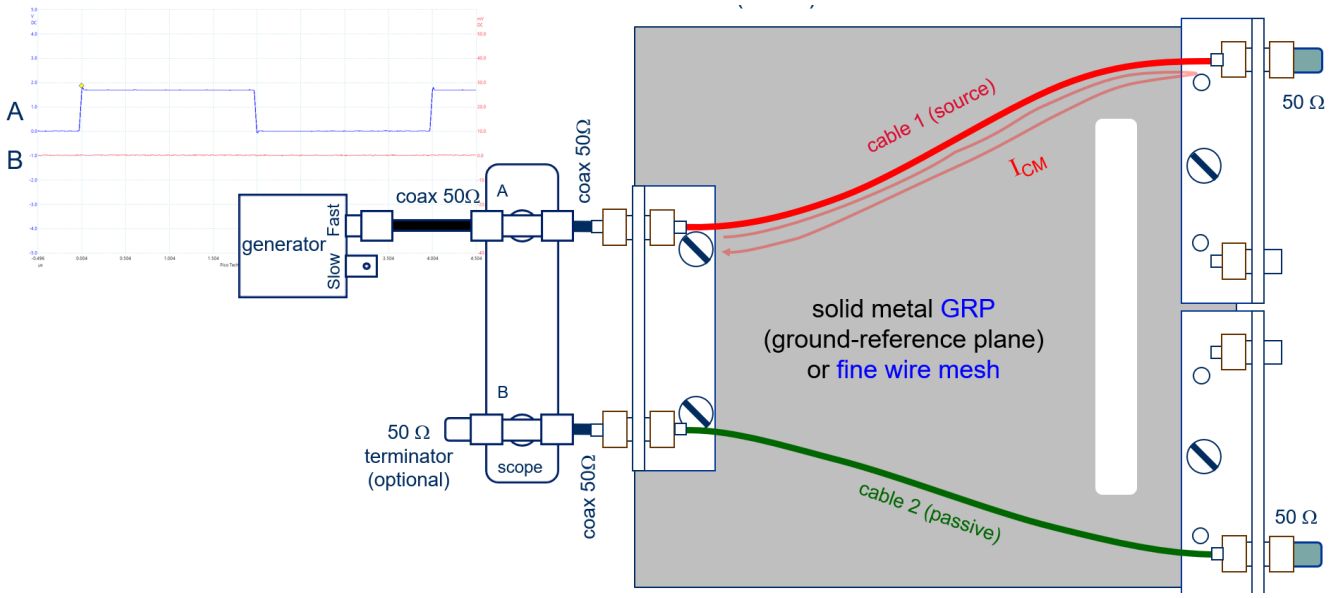


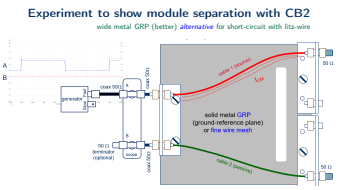


De litze wordt nu langs de Emissie (E) en Susceptibele (S) kabels geleid en als de kortsluiting op de stroomgrens aan de kant van de generator en de oscilloscoop wordt gemaakt zien we een reductie in overspraak op de oscilloscoop.

Experiment to show module separation with CB2

wide metal GRP (better) *alternative* for short-circuit with litz-wire

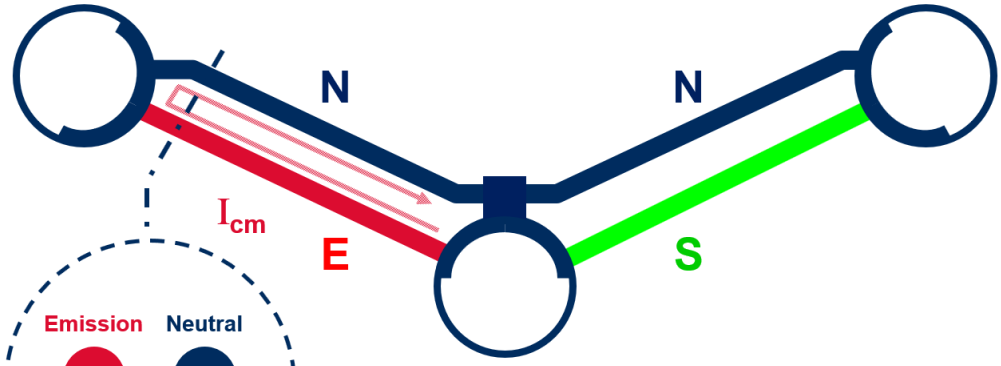


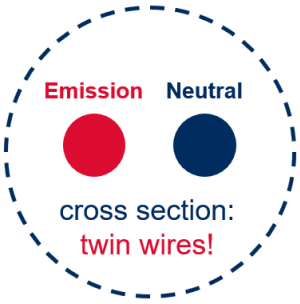


Heel voorspelbaar kunnen we nu een grote verbetering in CM-overspraak reductie bereiken door in plaats van de dunne litze een brede metalen plaat te gebruiken.

Wire 'short' is inferior to wide metal as CB type 2

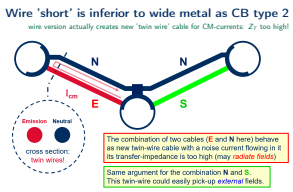
wire version actually creates new 'twin wire' cable for CM-currents: Z_T too high!





The combination of two cables (**E** and **N** here) behave as new twin-wire cable with a noise current flowing in it its transfer-impedance is too high (may *radiate fields*)

Same argument for the combination **N** and **S**.
This twin-wire could easily pick-up *external* fields.

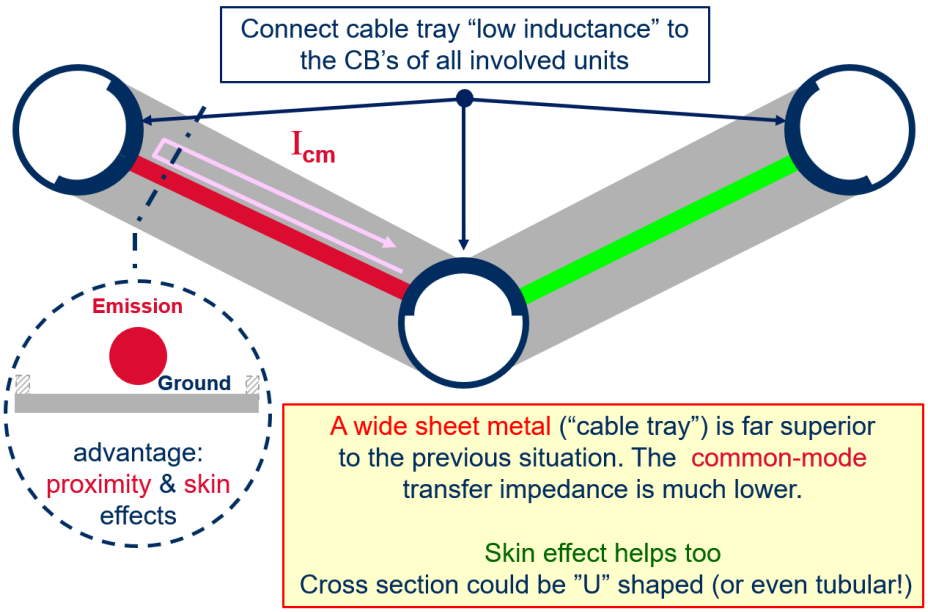


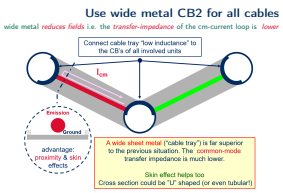
Deze dia laat zien hoe de combinatie E + N en S + N in feite twee "tweeling snoeren" zijn geworden als een geleider ongeveer even dik als de E en de S kabel gebruikt wordt.

Alleen loopt er in dit tweeling snoer geen gewenste, DM, stroom maar een ongewenste, CM, stroom.

Use wide metal CB2 for all cables

wide metal *reduces fields* i.e. the *transfer-impedance* of the cm-current loop is *lower*

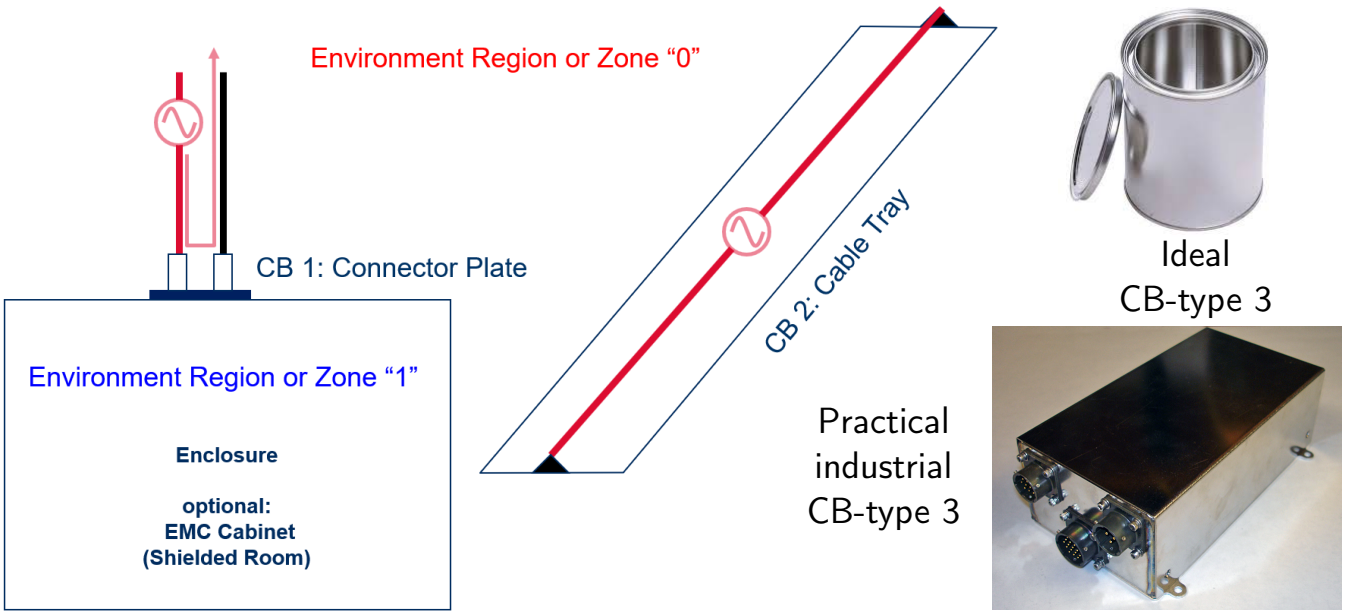


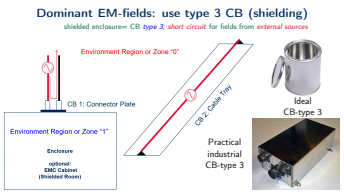


Als zich dus die situatie voordoet van drie toestellen (lees eventueel ook: elektronische modules) waar een storende (E) en gevoelige (S) kabel elektromagnetisch van elkaar gescheiden moeten worden, dit het beste kan met breed metaal.
Omdat deze situatie zich vaak voordoet in industriële installaties, is het belangrijk op te merken dat het aanwezige mechanische – edoch metalen– frame prima gebruikt kan worden als type 2 CB. Ook als dat frame is gefabriceerd van eenvoudig, wat we in Twente "pisbakken iezer" noemen.

Dominant EM-fields: use type 3 CB (shielding)

shielded enclosure= CB *type 3; short circuit* for fields from *external sources*

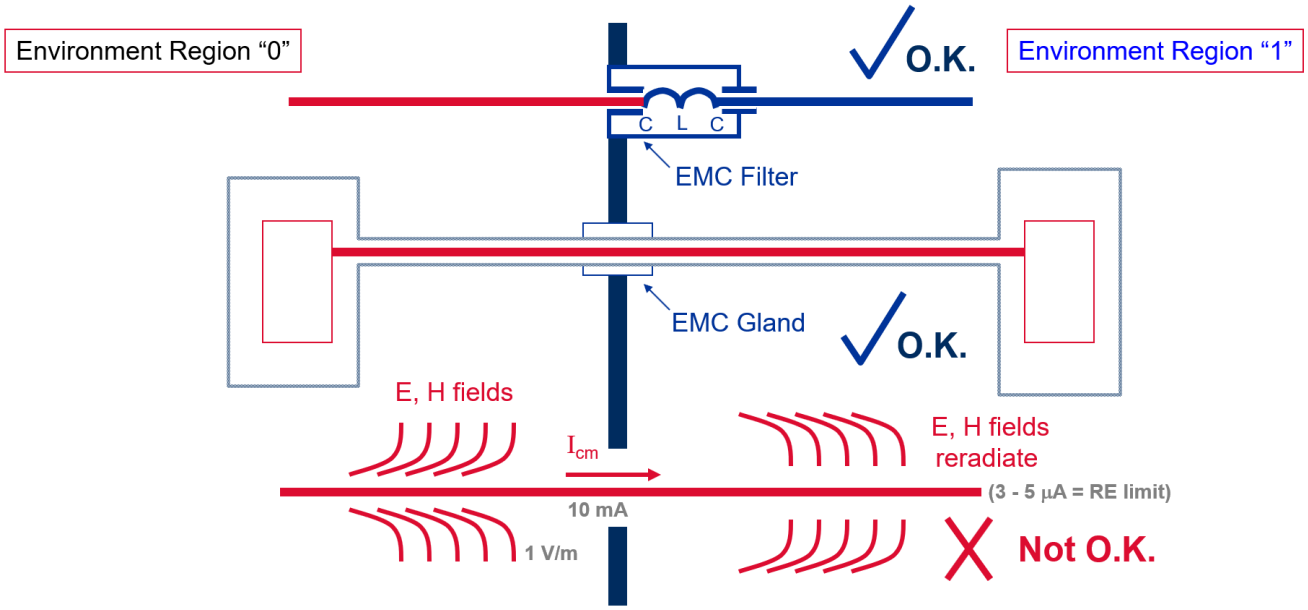


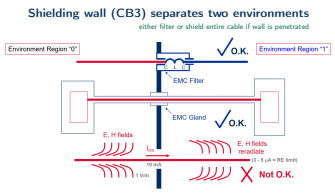


Tenslotte komt het steeds vaker voor dat de twee besproken stroomgrens types niet voldoende zijn om elektromagnetische storingen vordoende te verminderen.
Gelukkig is er nog een derde type, de volledige gesloten metalen omhulling: de afscherming, stroomgrens, CB-type 3.
De meest ideale afscherming is een gasdichte metalen omhulling met als verkrijgbaar voorbeeld: het verfblik.
Alleen lijkt elektronica in een gasdichte metalen omhulling weinig zinvol.
Er zullen op zijn minst draden naartoe moeten voor voeding en input- output (I/O) signalen.
Dus de meest voorkomende industrieel toegepaste variant is een metalen omhulling, CB-type 3, in combinatie met een CB-type 1.
In een defensie omgeving –landmacht– zal het niet makkelijk zijn kabels te verbeteren door “gebruik te maken van beschikbaar metaal” om de eenvoudige reden dat dat er meestal niet is
In dat geval zal de installatie het zonder CB-type 2 –de kabelgoot– moeten doen.
Dat stelt hoge eisen aan de te gebruiken kabels: ze zullen het in het veld alleen moeten doen (Aspect 48).

Shielding wall (CB3) separates two environments

either filter or shield entire cable if wall is penetrated





Als er toch een gat in een afschermende wand zit, zijn er twee mogelijke oplossingen als hier een draad naar binnen wordt gevoerd:

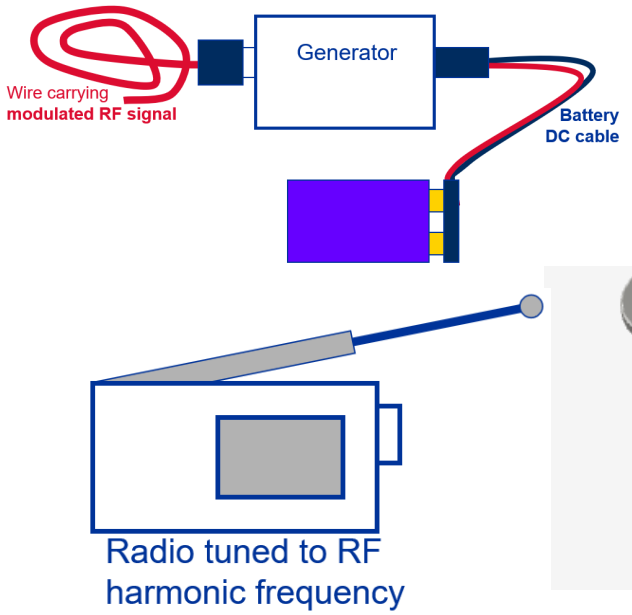
- Breng een filter aan dat de af te schermen stromen/velden tegenhoudt;
- Scherm de draad over de volle lengte af en sluit de mantel met een wartel aan op het gat in de wand –géén verf!–

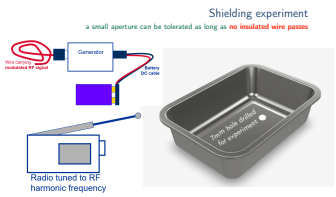
Het onderste gat in de afbeelding op de dia geeft aan wat er fout gaat als we niets doen:

- Aan de kant "met het veld" pikt de draad deze op. Een veld met een E-waarde van $E = 1$ V/m levert een CM stoor stroom op van $I_{CM} \approx 10$mA.
- Deze I_{CM} veroorzaakt aan de "stille" zijde een veld op dat hoger is dan de toegestane emissie-limiet.

Shielding experiment

a small aperture can be tolerated as long as **no insulated wire passes**



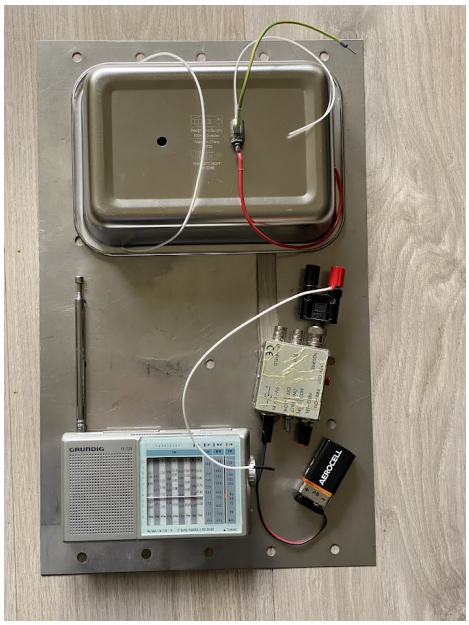


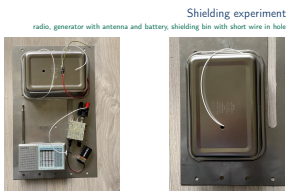
We gebruiken de test-generator als zender door een losse draad op de –gemoduleerde– uitgang aan te sluiten.
Vervolgens wordt de radio afgestemd op het uitgezonden radio frequent (RF)-signaal ergens rond de 96 MHz op de frequentie modulatie (FM)-band – dan hoorbaar als storing ergens tussen 500 en 1000 Hz–.
De complete zender wordt dan ingepakt door deze op een brede metalen plaat te leggen en vervolgens af te dekken met een metalen kap.

Het signaal op de radio verdwijnt.
Dan wordt een draadje door het gaatje in de metalen kap gestoken.
Nu is het stoor-signaal weer hoorbaar.
Dit geeft tevens aan dat het kleine gaatje –ca. 7 mm– geen enkel probleem is in een afscherming voor 96 MHz –golflengte ca. 3 m–.
Zo'n gaatje moet niet veel groter worden dan ongeveer 1⁄20 van de golflengte van de hoogste af te schermen frequentie.

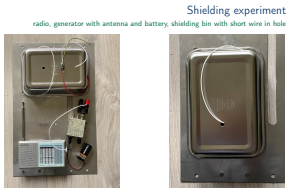
Shielding experiment

radio, generator with antenna and battery, shielding bin with short wire in hole





De afbeelding toont de "spelers" in dit experiment:
De radio, waarmee de aanwezigheid van storing wordt aangetoond
De generator voorzien van antenne-draad en batterij
Het metalen bakje met de beide te gebruiken elementen die EM-veld naar buiten brengen:
1-een simpel geïsoleerd draadje
2-een filter met een geïsoleerd draadje aan in- en uitgang
Merk op dat dit filter een "aard"-draad heeft waarmee het metalen filterhuis met het bakje verbonden kan worden.
merk ook op –tijdens de demonstratie– dat die verbinding niet helpt om storing te verminderen –het draadje is eenvoudigweg te lang–.
Alleen wanneer het filterhuis direct op de rand van het gaatje wordt gedrukt, werkt het filter!
Moraal: een aard-draad al of niet groen/geel is uitsluitend voor de elektrische veiligheid en is niet bruikbaar om twee elementen *elektromagnetisch* met elkaar te verbinden!
Oh ja, "schone aarde" is alleen verkrijgbaar bij een tuincentrum.



List of abbreviations

Z_T	transfer-impedantie
AM	amplitude modulatie
CB	current boundary
CM	common mode
DM	differential mode
EM	elektromagnetisch
EMC	elektromagnetische compatibiliteit
EMP	elektromagnetische puls
EU	Europese Unie
FM	frequentie modulatie
I/O	input- output
LEMP	bliksem
LW	lange golf –Engels: long wave– (148.5 - 283.5 kHz)
MW	middengolf –Engels: medium wave– (531 - 1602 kHz)
PE	veiligheids aarde –Engels: protective earth–
POE	point of entry
RF	radio frequent