Hoogfrequent printlayout ontwerp

Analoge aspecten bij het ontwerpen van printlayouts voor digitale schakelingen

door
Ir. R.F.M. van den Brink

Samenvatting

De toename van complexiteit en schakelsnelheid van vele elektronische schakelingen brengt met zich mee dat de wijze waarop deze gebouwd worden grote invloed heeft op het functioneren ervan. Een onzorgvuldig ontworpen printlayout kan grote problemen veroorzaken, waardoor de schakeling in zijn geheel niet goed werkt. Ook kan het voorkomen dat het stralingniveau zodanig hoog is dat de printschakeling niet aan EMC keuringseisen blijkt te kunnen voldoen. Vanuit een microgolf invalshoek wordt inzicht verschaft in het ontwerpen van analoge en digitale printen (PCB's: printed circuit boards) waarin een zogeheten *microstrip* en een *stripline* structuur is toegepast. Deze tekst heeft primair als doel het geven van inzicht, en bevat daarom hoofdzakelijk praktisch toepasbare vuistregels en ontwerpinzichten. Aan de hand van vele goed/fout voorbeelden zal verhelderd worden waarom hoogfrequent (HF) problemen kunnen optreden. De voorbeelden zijn kwalitatief en er wordt geen uitspraak gedaan over hoe riskant een compromis precies is.

De meeste problemen ontstaan doordat elektromagnetische velden (EM) aan hun lot overgelaten worden. Uiteengezet zal worden hoe elektromagnetische velden zonder afscherming opgesloten kunnen worden in het glas-epoxy van enkel- en meerlagenprinten. Door het opsluiten van het elektromagnetische veld in een langwerpig volume vermindert de uitstraling en wordt de schakeling ook ongevoeliger voor instraling en overspraak. Tevens kunnen snelle schakelingen gemakkelijker geïmplementeerd worden en zijn ze beter reproduceerbaar omdat pulsvervorming ten gevolge van ongecontroleerde reflecties voorkomen kan worden.

1. Probleemstelling

De begrippen *snelle schakeling* en *hoogfrequent* zijn subjectief. Een algemeen bruikbare definitie is daarom niet goed te geven, en daarom wordt hier volstaan met een aantal voorbeelden. Onder hoogfrequent problemen worden in dit verhaal problemen aangeduid van de volgende soort:

- Schakelingen die goed functioneren totdat printsporen door vingers worden genaderd.
- Schakelingen die slecht functioneren maar het ineens goed blijken te doen zodra printsporen met vingers worden aangeraakt.
- Digitale schakelingen waarvan sommige exemplaren fouten blijken te maken, die nauwelijks reproduceerbaar zijn. Meestal blijken deze fouten niet altijd op te treden.
- Schakelingen die goed functioneren totdat oude 'trage' chips vervangen worden door snellere moderne chips.
- Schakelingen die niet meer goed functioneren zodra de klokfrequentie wordt verhoogd.
- Schakelingen die zoveel straling produceren dat naburige printkaarten erdoor gestoord worden.
- Schakelingen die meer straling veroorzaken dan EMC-keuringsnormen toestaan.
- Een processorkaart van een PC die goed kan samenwerken met een interfacekaart zolang die maar vlak ernaast in een busprint is gestoken, doch waarbij de samenwerking het laat afweten zodra een andere plaats in de busprint wordt gekozen.

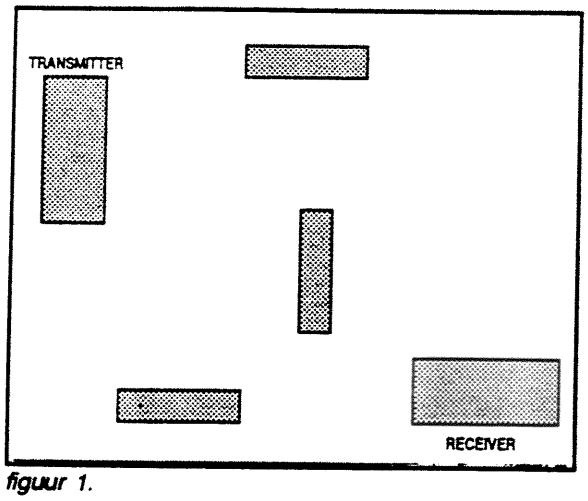
Hoogfrequente problemen zullen in het algemeen groter worden indien de complexiteit van de schakelingen toeneemt. Bij complexe digitale schakelingen kunnen daarom al bij kloksnelheden vanaf 1 MHz hoogfrequent problemen optreden. In tegenstelling tot analoge schakelingen kan een digitale poort een vervormd inkomend signaal herstellen zodat weer een redelijk schoon uitgaand digitaal signaal ontstaat. Hierdoor kunnen in digitale printen vele ernstige hoogfrequent fouten getolereerd worden.

Het verraderlijke zit hem in de situaties waarin het net niet meer goed werkt. Het geheel kan dan soms al zo grondig mis zijn dat 'goede' oplossingen averechts werken terwijl een 'slechte' oplossing het geheel weer net aan de praat weet te krijgen. Dit wekt vaak de indruk dat hoogfrequent ontwerpen een zeer 'mistig' vakgebied is dat alleen beheerst wordt door goeroes en orakels.

Dit verhaal heeft als doel om het tegendeel aan te tonen door inzicht te verschaffen in wat er zich in werkelijkheid afspeelt. Ingewikkelde wiskundige formules, zoals kringintegralen en Maxwell vergelijkingen, worden niet gebruikt.

2. Punt-punt verbindingen

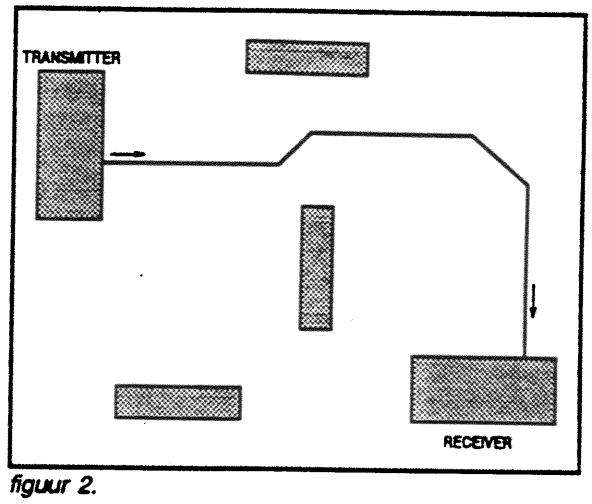
De meeste hoogfrequent problemen komen voort uit het feit dat het elektromagnetisch veld aan zijn lot wordt overgelaten. Dit probleem doet zich al voor bij eenvoudige printsporen die een signaal van een IC naar een ander IC transporteren. In deze paragraaf wordt de basis gelegd voor het opsluiten van het elektromagnetisch veld in het glas-epoxy van de printplaat.



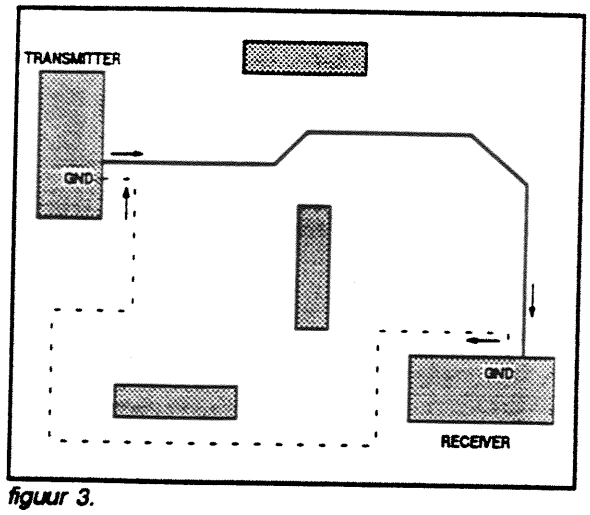
figuur 1.

Hiernaast is een voorbeeld van een schakeling met 5 IC's gegeven waarvoor een printlay-out ontworpen moet worden. Deze schakeling dient als basis voor de rest van dit verhaal.
Het probleem wordt als volgt geformuleerd: verbindt het zender IC (transmitter) met het ontvanger IC (receiver) via een printspoor.

Bij elke oplossing is het belangrijk rekening te houden met de stromen en hoe deze gaan lopen. Elke stroom naar de ontvanger toe zorgt voor een andere stroom die weer terugvloeit naar de zender. Met andere woorden: er is altijd een retourstroom. Indien de ontwerper hier geen rekening mee houdt kan dit tot moeilijkheden leiden.
Veel ontwerpers en CAD-CAM programma's richten zich uitsluitend op de heenweg van de signaalstroom, en bepalen zo hun keuze van het printspoor. Wanneer een ontwerper niet bewust zorg draagt voor een terugweg, zoals in dit voorbeeld, zal de retourstroom via toevallig aanwezige koperbanen de stroomkring moeten sluiten, bijvoorbeeld via de voedingslijnen.



figuur 2.



figuur 3.

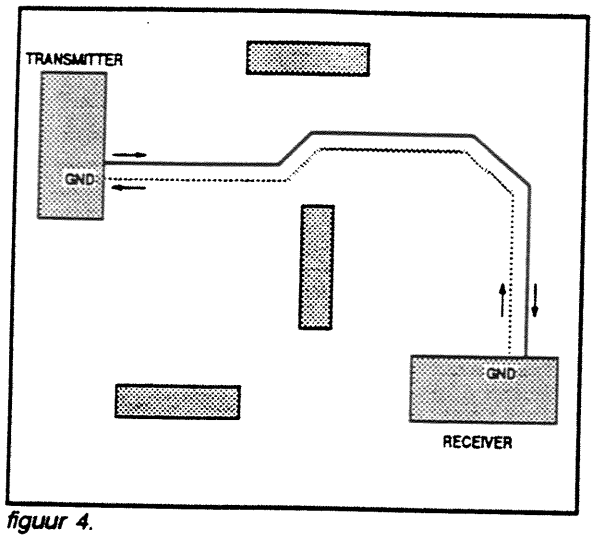
Als die voedingslijnen zich aan de rand van de print bevinden, zou de kringloop bijvoorbeeld deze vorm kunnen hebben. Voor gelijkstroom is dit meestal geen probleem doch hoogfrequent kan dit fataal zijn. De reden is dat er behalve een elektrische stroom ook een elektromagnetisch veld wordt opgewekt.
Doordat in dit voorbeeld de kringloop een 'groot' en willekeurig oppervlak beslaat waarbinnen zich het merendeel van het elektromagnetisch proces afspeelt zal het verband tussen het verzonden signaal en het ontvangen signaal zeer complex zijn. Daardoor kan het voorkomen dat ze zeer sterk van elkaar verschillen. Sterker nog, er is eigenlijk geen enkele reden meer aan te wijzen waarom het ontvangen signaal enigszins zal lijken op het verzonden signaal.

Een deel van dit effect kan verklaard worden door de lus op te vatten als een antenne die zowel zendt (straling) als ontvangt (overspraak). Een ander deel van dit effect is te verklaren met reflecties die pulsvormige signalen vervormen (overshoot). Hoe groter de lus, des te ernstiger dit probleem zal zijn, waarbij het woord 'groot' gerelateerd is aan de stijg- en daaltijden van het te transporteren signaal:

- Wanneer bij sinusvormige signalen de lusafmetingen niet meer te verwaarlozen zijn t.o.v. de golflengte (bijvoorbeeld meer dan 10%) dan zijn hoogfrequent effecten al goed merkbaar. Bij 1 GHz hoort een golflengte van 30 cm in de vrije ruimte, hetgeen overeenkomt met 15 cm in een glas-epoxy substraat.

- Wanneer bij pulsvormige signalen de looptijd niet meer te verwaarlozen is t.o.v. de pulsstijgtijd zijn hoogfrequent schakeleffecten al goed merkbaar. In 1 ns legt het elektromagnetische veld in glas-epoxy ongeveer 15 cm weglengte af.

Bij zwakke signalen in de buurt van sterke signalen treden dit soort effecten al veel eerder op omdat er maar weinig nodig is voor een significante hoeveelheid overspraak. Ook zeer veel zwakke signalen tezamen, zoals bij een complexe digitale schakeling, kunnen gemakkelijk een hoog storingsniveau opwekken terwijl de lusbreedte nog gering lijkt. Het feit dat het veld zich verspreid heeft over een relatief groot volume verklaart waarom vingers in staat zijn het functioneren van de printschakeling te beïnvloeden. Een vinger die de ruimte betreedt waar het elektromagnetisch veld geconcentreerd is, verstoort het veld. Hoe kleiner die ruimte is, des te minder invloed vingers zullen hebben.



figuur 4.

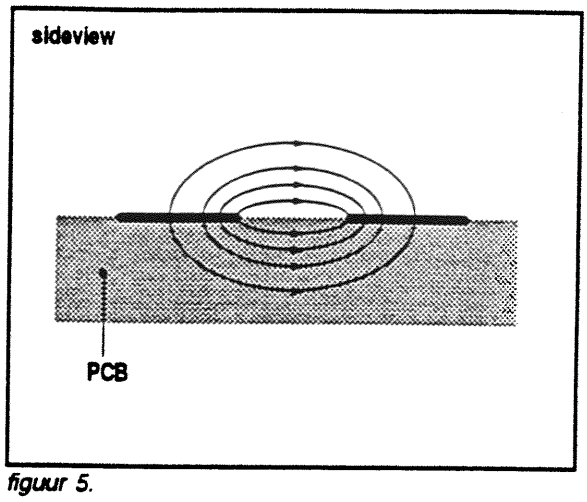
Het stralingsprobleem is grondig te reduceren door ervoor te zorgen dat de lusdiameter zo klein mogelijk wordt, ofwel dat de heen- en terugweg vrijwel gelijk zijn. Dat wil zeggen dat de twee stromen zoveel mogelijk evenwijdig en zo dicht mogelijk bij elkaar vloeien.
Door voor de retourstroom een extra printspoor naast de heenweg te leggen wordt niet alleen het stralingsprobleem gereduceerd maar ook de relatie tussen verzonden en ontvangen signaal vereenvoudigd. Wat eerst alleen met 3-dimensionale veldvergelijkingen te beschrijven was, kan nu beschreven worden met twee vormvaste golven die zich gelijktijdig met constante snelheid voortplanten door een transmissielijn: voorwaarts (transmissie) en achterwaarts (reflectie).
De reflectie-transmissie beschrijving levert het volgende inzicht op:

- Wanneer het printspoor 'kort' is zal de looptijd zo kort zijn ten opzichte van de stijgtijd dat alles min of meer gelijktijdig lijkt te gebeuren. De golf heeft in die gevallen vrijwel overal dezelfde fase, hetgeen ook geldt voor de gereflecteerde golf, de tweemaal gereflecteerde golf, enzovoorts. In deze gevallen zal het ontvangen signaal vrijwel gelijk zijn aan het, iets vertraagde, verzonden signaal.

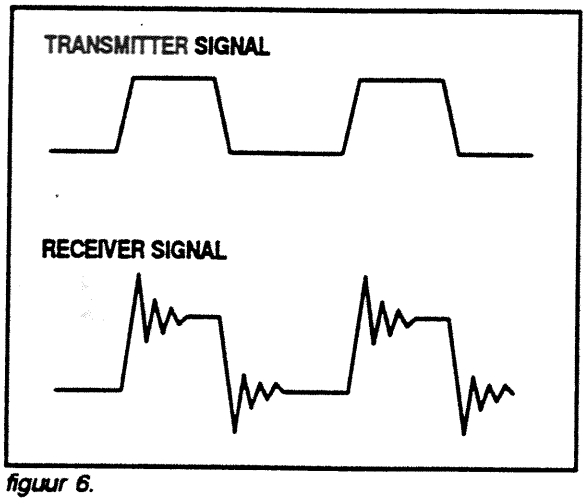
- Wanneer het printspoor 'lang' is zal een 0-1 flank aan het begin van het spoor al zijn eindwaarde bereikt hebben, nog voordat de flank aan het einde van het spoor is opgemerkt. De interferentie tussen heen en tweemaal gereflecteerde golf zal dan zeer plaatsafhankelijk zijn en tot gevolg hebben dat het verzonden signaal sterk vervormd aankomt.

Door heen- en terugweg naast elkaar te leggen, wordt het elektromagnetisch veld hoofdzakelijk opgesloten tussen twee geleiders zodat het stralingsprobleem drastisch reduceert. Daardoor zullen korte weglengten probleemloos zijn en kunnen de problemen van lange weglengten verholpen worden. Dit laatste wordt straks verder uitgewerkt.

In deze figuur is in zijaanzicht de transmissie structuur getekend die ontstaat wanneer beide geleiders naast elkaar liggen. Het elektromagnetisch veld is merendeels *tussen* de twee printsporen opgesloten, zodat er minder overspraak is naar ernaast gelegen printsporen. De karakteristieke impedantie van deze transmissielijn is in hoofdzaak afhankelijk van de onderlinge afstand en de diëlectrische eigenschappen van het substraat en in mindere mate van de spoorbreedte en -dikte.



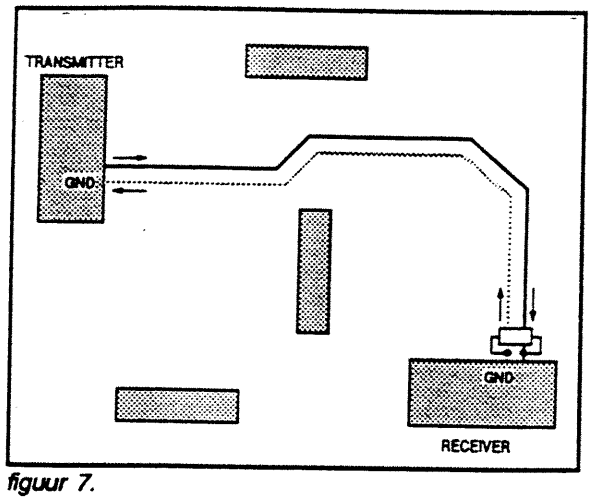
figuur 5.



figuur 6.

Ook als het veld netjes is opgesloten in een volume met een kleine diameter, kan een relatief lange weglengte nog veel pulsvervorming veroorzaken. In ernstige gevallen ziet een dergelijk signaal er op een oscilloscoop als volgt uit: een schoon pulsvormig signaal dat bij de zender vertrekt, blijkt na aankomst bij de ontvanger sterk vervormd te zijn door uitslinger effecten. Hoe steiler de schakelflanken zijn des te heftiger de in- en uitslinger effecten zich zullen manifesteren. Als de schakellogica bij de ontvanger die snelheden kan bijhouden zal deze meer 0-1 overgangen detecteren dan er verzonden zijn, met een onbetrouwbare schakeling als gevolg.

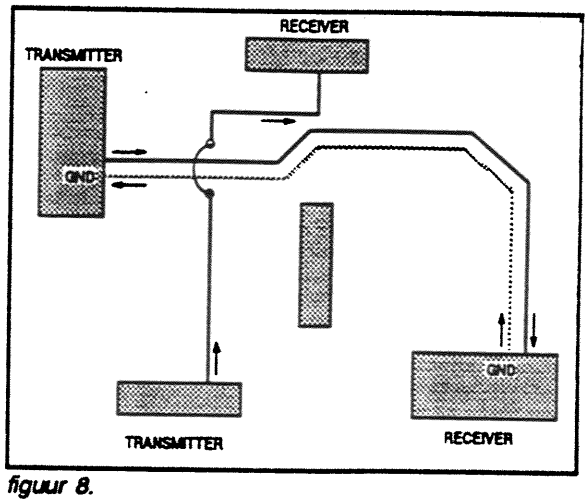
Wanneer de transmissielijn (structuur van heen- en teruggaand printspoor) een regelmatig verloop heeft, is het elektromagnetisch veld vereenvoudigd te beschrijven met een heengaande golf en een gereflecteerde golf. Een regelmatig verloop houdt in dat de onderlinge afstand en de spoorbreedte niet varieert. Hierdoor is de oorzaak van deze pulsvervorming op eenvoudige wijze te verklaren: interferentie van een heengaande golf met een tweemaal vertraagde heengaande golf die tevoren gereflecteerd is tegen de ontvanger en daarna nogmaals een keer tegen de zender.
Wanneer de transmissielijn kort is, zijn al deze golven min of meer in-fase met elkaar en is de pulsvervorming gering. Wanneer de lijnlengte zodanig lang is dat de totale looptijd niet meer te verwaarlozen is t.o.v. de stijgtijd van de flank zal de pulsvervorming sterk zijn.



figuur 7.

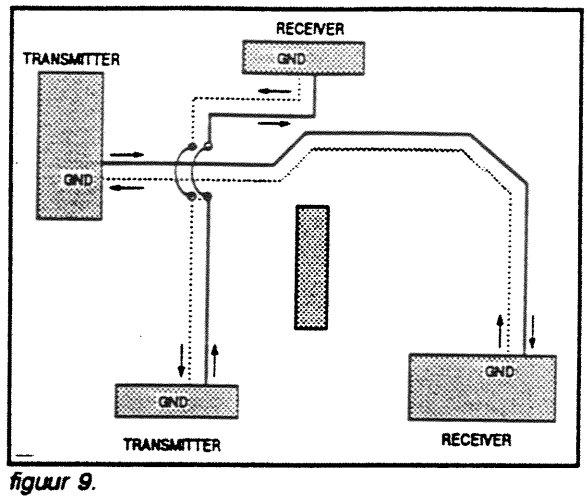
Reflecties kunnen in een regelmatige transmissielijn voorkomen worden door ze aan het uiteinde te dempen. Dit wordt lopend afsluiten genoemd. Dit is in praktijk te brengen door de transmissielijn af te sluiten met een weerstand die gelijk is aan zijn karakteristieke impedantie. Bij transmissielijnen met een onregelmatig verloop is dit vrijwel onmogelijk omdat de karakteristieke impedantie dan een zeer grillig en frequentie afhankelijk verloop heeft.
Een afsluitweerstand bij de ontvanger met de karakteristieke waarde van de transmissielijn kan dan al voldoende zijn. De ingangsimpedantie van de ontvanger is meestal maatgevend voor de keuze van de karakteristiek impedantie. De printspoorbreedte kan daaraan aangepast worden. Dit hoeft dus zeker niet altijd 50 of 75 ohm te zijn. In principe behoeft dit afsluiten niet bij de zender te gebeuren zolang de primaire reflecties bij de ontvanger goed genoeg onderdrukt zijn. Het is meestal wel verstandig om te voorkomen dat rest-reflecties tegen de ontvanger nogmaals gereflecteerd worden tegen de zender door ook het zendsignaal karakteristiek aan te bieden.

Nu de eerste verbinding op de juiste wijze gemaakt is, kan een volgende punt-punt verbinding gelegd worden. Via een draadbrug kruist deze tweede het eerste paar printsporen. Om dezelfde redenen als hiervoor is beschreven, is het zaak ook ditmaal voor een retourweg zorg te dragen.

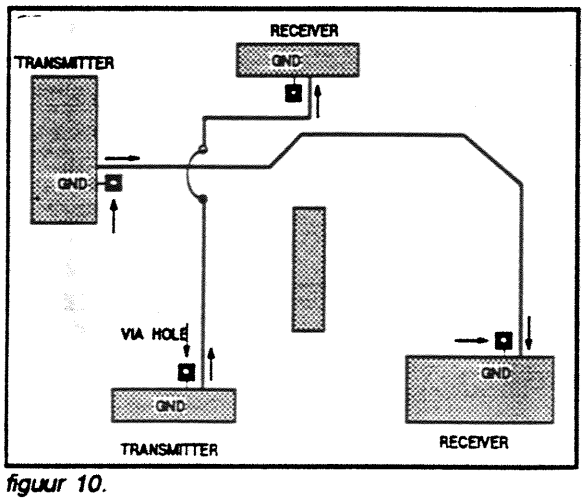


figuur 8.

De retourweg dient weer vrijwel gelijk te zijn aan de heenweg, zodat de kruising dubbel uitgevoerd moet worden. Ter plaatse van de dubbele kruising heeft het geen enkele hoogfrequent invloed of beide retourleidingen nu wel of niet met elkaar verbonden zijn. Het veld propageert uitsluitend *tussen* het paar printsporen en zal daarvan niet afwijken indien een zijaftakking ergens anders mee verbonden is.
Deze oplossing is verantwoord vanuit een hoogfrequent standpunt gezien. Constructietechnisch en productietechnisch is het natuurlijk een slechte oplossing, omdat iedere draadbrug in een PCB extra kosten met zich meebrengt. Om die reden is het niet altijd verstandig te kiezen voor een dergelijke lay-out.



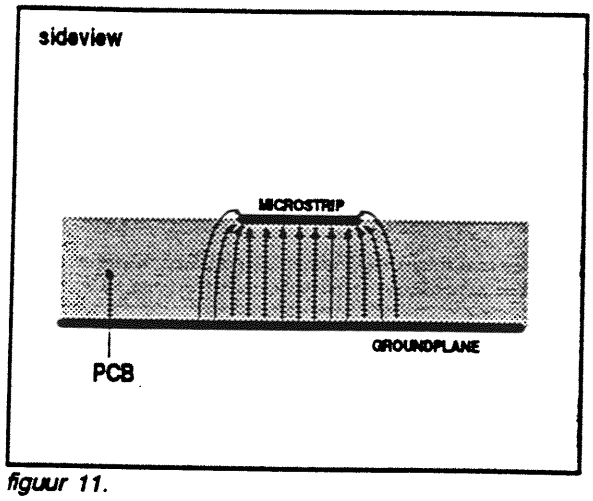
figuur 9.



figuur 10.

Door nu met een tweede printvlak te werken, aan de andere printzijde, is de constructie veel gemakkelijker te ontwerpen. Heenstromen gaan via printsporen op het bovenvlak, en retourstromen bereiken via doorgemetaliseerde gaten het ondervlak en gaan via retoursporen terug naar de bron. Doordat retoursporen met elkaar verbonden mogen worden en zijwaarts uitgebreid mogen worden zonder dat de hoogfrequent eigenschappen achteruit gaan, is er niets op tegen de gehele achterkant uit te voeren als een egaal kopervlak, veelal een aardvlak genoemd. Constructief heeft dit grote voordelen, en het ontwerpproces wordt er eenvoudiger door.
Die retourstromen zullen zich in een egaal ondervlak niet verspreiden over het gehele vlak. Die stromen zullen zich beperken tot de gemakkelijkste weg, en die is *niet* gelijk aan de kortste weg! De gemakkelijkste weg is die retourweg die veroorzaakt dat het elektromagnetisch veld in een zo klein mogelijk volume geconcentreerd blijft. Om die reden vloeit bij gebruik van een aardvlak een retourstroom recht onder het bijbehorende heenspoor terug. Heen- en terugweg zijn dus automatisch hetzelfde.
Het belangrijkste gevolg hiervan is dat bij een egaal koperen ondervlak het meeste koper hoofdzakelijk voor niets is aangebracht want het blijft vrijwel stroomloos. Ook de dikte van het koper en de 'hoeveelheid aarde' is dus vrijwel niet relevant. Alleen de plaats ervan is relevant. Een groot aardvlak kan echter wel nuttig zijn indien het een onderdeel vormt van een gesloten afscherming.
Imposante constructies met uit dik aluminium gefreesde bakjes, extra grote aardvlakken aan beide zijden van de print, en dikke extra aardleidingen naar iets wat op 'aarde' lijkt, resulteren in het geheel niet in een 'beter' hoogfrequent gedrag. Sterker nog, een nutteloos aardvlak aan de bovenzijde, vlak in de buurt van een printspoor, beïnvloedt het veld ter plaatse en kan de

karakteristieke impedantie van de transmissielijn verstoren. Uitgefreesde bakjes zijn echter wel in staat om een schakeling geheel af te schermen, mits ze volledig gesloten zijn. Hetzelfde effect wordt overigens ook al bereikt met een eenvoudige rand van blik die via doorgemetaliseerde gaten verbonden is met het gesloten ondervlak, en voorzien is van een deksel van blik.

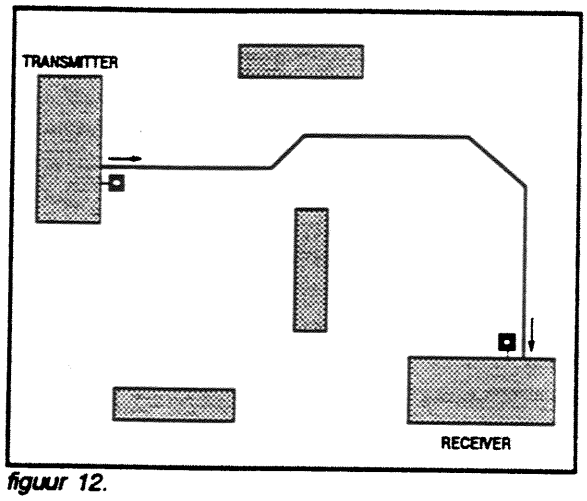


figuur 11.

Het elektromagnetisch veld van een stroomvoerende geleider boven een aardvlak is in hoofdzaak geconcentreerd *in* het tussenliggende glas-epoxy. Als naburige printsporen op een afstand liggen van minstens de printdikte plus de spoorbreedte zal de overspraak gering zijn. De karakteristieke impedantie is in hoofdzaak afhankelijk van de spoorbreedte, printdikte en de permittiviteit van het glas-epoxy. Bij glas-epoxy, met een epsilon van ongeveer 4.3, zal een spoorbreedte die gelijk is aan de dubbele printdikte een transmissielijn opleveren waarvan de karakteristieke impedantie ongeveer 50 ohm is. Hoe dunner het printmateriaal is hoe smaller het printspoor zal moeten zijn om de karakteristieke impedante gelijk te houden. Een breder spoor geeft, bij gelijkblijvende printdikte, een lagere karakteristieke impedantie.
Deze transmissielijn structuur staat bekend onder de naam *microstrip* in het geval dat het ondervlak veel breder is dan het printspoor. Wanneer de heen- en terugstromen door even brede printsporen boven elkaar vloeien wordt er gesproken van een *stroken golfgeleider.* Een structuur van printsporen die naast elkaar op hetzelfde vlak liggen heet een *parallelle golfgeleider.* De microstrip structuur is in principe niet beter of slechter dan de parallelle golfgeleider, alleen is deze in veel gevallen wel gemakkelijker hanteerbaar.

3. Obstakels onderweg

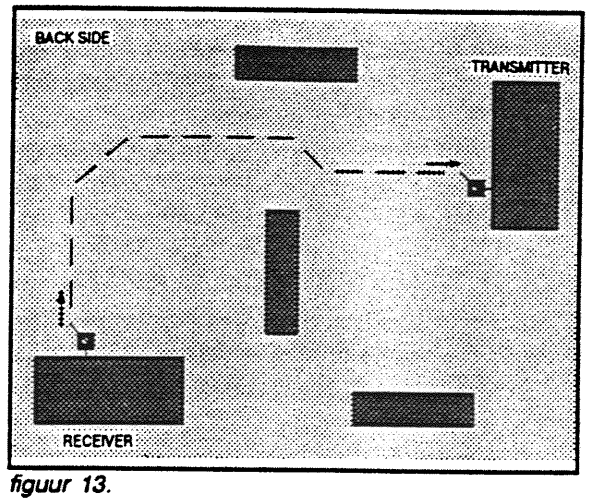
Ondanks het feit dat het voorgaande in een simpele vuistregel te vervatten is, *heen- en terugweg moeten gelijk zijn*, zijn er vele manieren om dit onbedoeld te verstoren. Een dergelijke verstoring heet een obstakel.



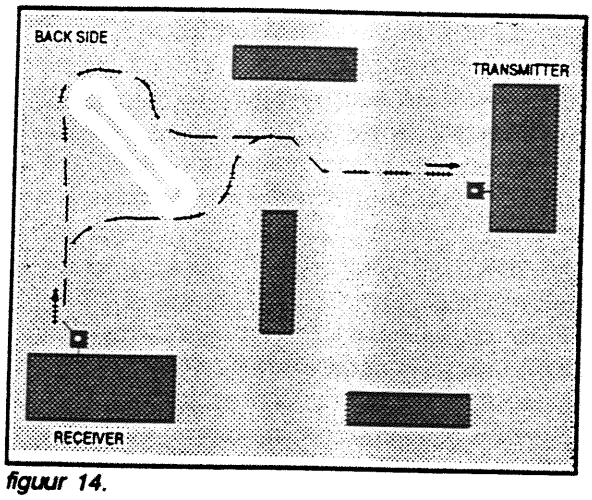
figuur 12.

Stel dat een groot deel van een printlayout reeds ontworpen is volgens het voorgaande inzicht. Symbolisch is dat hier weergegeven met een transmissielijn waarbij de heenstroom via een printspoor aan de bovenzijde vloeit en de retourstroom via doorgemetaliseerde gaten een egaal aardvlak aan de onderzijde bereikt en daar de gemakkelijkste weg terug volgt.

Wanneer de print omgedraaid wordt dan is zichtbaar dat de onderzijde uit een egaal koperviak bestaat. De stippellijn geeft de route aan die de retourstroom volgt: direct onder het printspoor opdat het elektromagnetisch veld in een zo klein mogelijk volume geconcentreerd blijft. De rest van het koper doet dus niet mee, en is in dit voorbeeld overbodig. Op de bovenzijde bevinden zich meerdere printsporen, allen op dezelfde hoogfrequent verantwoorde wijze gepositioneerd, doch die zijn hier gemakshalve niet getekend.
Op gegeven moment moet er een kruising gemaakt worden. Om een draadbrug aan de bovenzijde te voorkomen kan een ontwerper ervoor kiezen de kruising via een geïsoleerd printspoor aan de *onder*zijde te realiseren.....



figuur 13.



figuur 14.

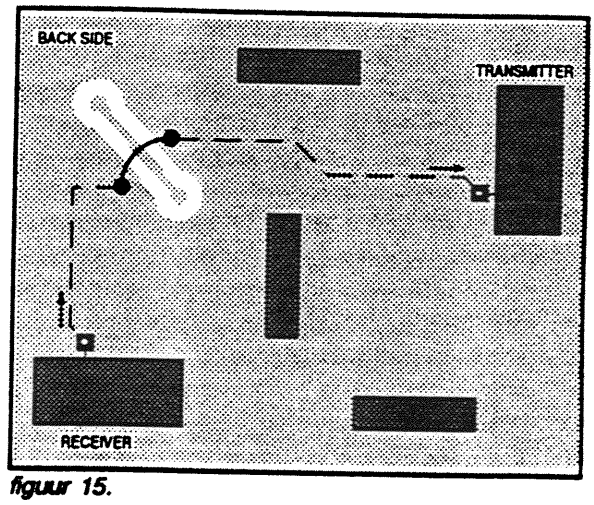
Daartoe wordt de kruising gerealiseerd met een printspoor dat zich binnen een geïsoleerde uitsparing in het ondervlak bevindt. Echter de plaats waar dit allemaal gebeurt is de plaats die voorbestemd was voor retourstroom van het eerste printspoor. Het gevolg is dat die retourstroom geen andere keuze meer heeft dan er zowel rechts als links omheen te gaan, hetgeen verstrekkende gevolgen kan hebben. Het probleem is nu dat het elektromagnetisch veld, behorende bij het eerste printspoor, zich noodgedwongen over een groter volume moet verdelen dan de bedoeling was.

Dit heeft ruwweg drie effecten tot gevolg:

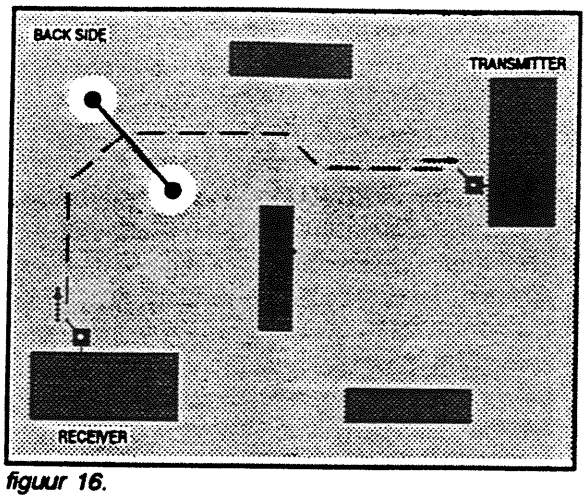
- Er is een zendantenne gemaakt die straalt.
- Er is een ontvangstantenne gemaakt die straling uit de omgeving oppikt (overspraak)
- Ter plaatse van het obstakel ontstaan er reflecties die een significante pulsvervorming kunnen veroorzaken indien de lengte van de transmissielijn relatief groot is.

De enige oplossing voor dit probleem is het herstellen van de oorspronkelijke loop van de retourstroom.

Met een draadbrug ter plaatse van het obstakel is de oorspronkelijke loop weer te herstellen en zijn de goede hoogfrequent eigenschappen van de printlayout weer hersteld.
Doordat de elektromagnetisch velden van beide transmissielijnen, ter plaatse van de kruising, dezelfde ruimte moeten delen zal er een geringe overspraak zijn. In praktijk blijkt dit in veel gevallen aanvaardbaar laag te zijn. De overspraak is op eenvoudige wijze te verbeteren door beide signalen voor elkaar af te schermen met behulp van het oorspronkelijke aardvlak.



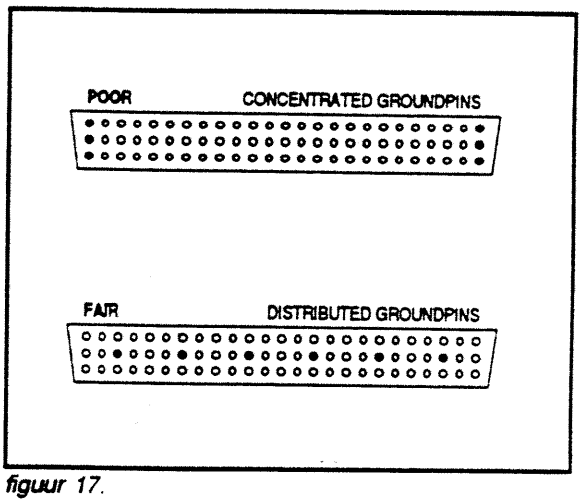
figuur 15.



figuur 16.

In deze situatie is de kruisingsvolgorde omgekeerd waardoor de elektromagnetische velden elkaar passeren in gescheiden volumes. Dit zal minder overspraak met zich meebrengen dan de voorgaande oplossing.
Het gevolg is echter dat er nu een oplossing is geconstrueerd die aanvankelijk als ongewenst was bestempeld. Oorspronkelijk is er voor een draadloze kruising aan de bovenzijde gekozen, maar dit heeft veroorzaakt dat er nu een draadbrug aan de onderzijde voor in de plaats is gekomen. Uiteindelijk is niemand er iets mee opgeschoten en dus is het beter dit soort constructies helemaal te vermijden.
Daarom de volgende vuistregel: laat het aardvlak intact, ga het niet plaatselijk in stukken delen zonder dat ze voor hoogfrequent signalen verbonden zijn met een draadbrug of een condensator. Wanneer er toch voor een gedeeld aardvlak gekozen wordt, maak die keuze dan bewust, en ga alle consequenties na.

Gelijksoortige problemen kunnen zich eveneens voordoen indien twee printen via een busconnector met elkaar doorverbonden worden. Wanneer van een busconnector met 96 contacten er slecht zes contacten beschikbaar zijn voor aardleiding dan is de slechtste keuze die waarbij de buitenste zes pennen hiervoor gebruikt worden. De retourstromen van signalen door de middenpennen van de busconnector moeten dan een zeer grote omweg maken met alle gevolgen van dien. Het beste compromis dat in een dergelijk geval gesloten kan worden is het gelijkmatig verdelen van deze zes contacten over de hele busconnector. Dit beperkt de afmetingen van de grootste omweg.



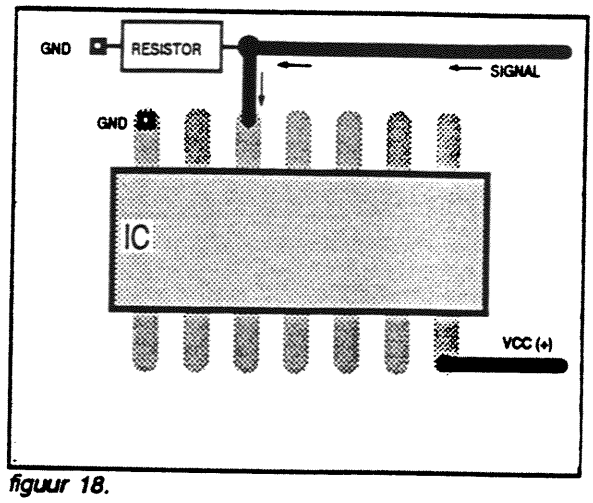
figuur 17.

Nog beter is het creëren van een denkbeeldig aardvlak in de connector door alle pennen in de middelste horizontale rij te gebruiken voor retourstromen. In veel gevallen zal dit op praktische bezwaren stuiten omdat er onvoldoende pennen beschikbaar zijn

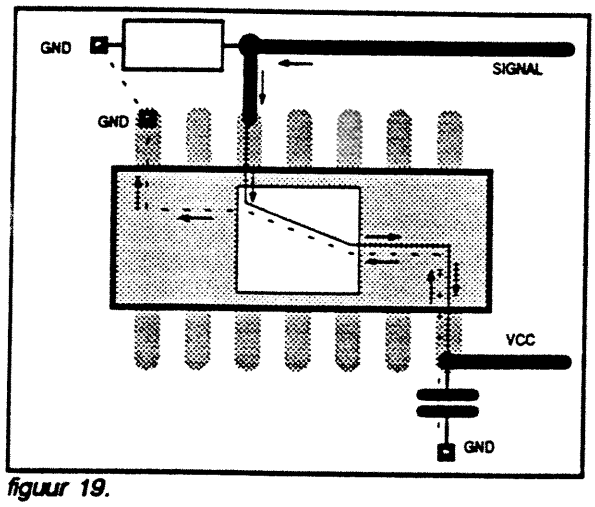
4. Begin- en eindpunt

Behalve obstakels onderweg, zijn er nog tal van andere mogelijkheden om de loop van een signaal ongewenst te verstoren. Aan het begin- of eindpunt kunnen gemakkelijk dergelijke fouten gemaakt worden terwijl het lijkt alsof alles in orde is. Dit zal met een paar treffende voorbeelden geïllustreerd worden.

Via deze detail opname van een IC is zichtbaar dat een signaalstroom wordt aangeleverd via een microstrip structuur: heenstroom via printspoor aan bovenzijde en retourstroom via het ondervlak. De aardpen van het IC is correct via een doormetalisering met het ondervlak verbonden en de transmissielijn is lopend afgesloten met een weerstand. Alles bij elkaar ziet dit eruit alsof het geheel op hoogfrequent verantwoorde wijze ontworpen is.
De gedachtenfout die hier opzettelijk gemaakt wordt is dat het helemaal niet vanzelfsprekend is dat de retourstroom er bij de aardpen weer uitkomt!



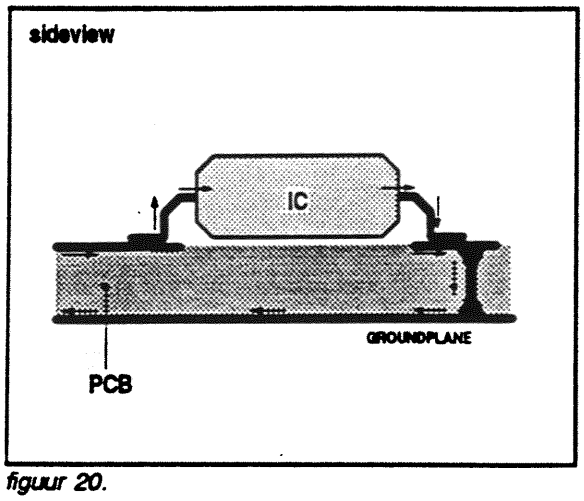
figuur 18.



figuur 19.

Dit wordt pas duidelijk indien de signaalstromen binnenin gevolgd worden. De signaalstroom moet zijn informatie immers niet bij een ingangspen afleveren, maar bij een intern punt ergens in het binnenste van de chip. Afhankelijk van de wijze waarop de transistoren ter plaatse geschakeld zijn kan het zelfs voorkomen dat het merendeel van de hoogfrequent retourstroom er bij de voedingspen (VCC-pin) aan de andere zijde weer uitkomt en slechts een klein deel bij de aardpen (GND-pin). De retourstroom zal nu zijn weg proberen te vervolgen en zo snel mogelijk het ondervlak willen bereiken om aan de terugweg te kunnen beginnen. Meestal zal de dichtstbijzijnde ontkoppelcondensator die mogelijkheid bieden, maar dan moet die wel direct bij de voedingspen een hoogfrequent verbinding met het aardvlak realiseren. Eenmaal bij het ondervlak gekomen zal de gemakkelijkste weg vervolgd worden: recht onder het traject van de heenstroom.
De signaalstroom heeft dus een veel grotere weg moeten afleggen dan aanvankelijk verwacht werd. Bij verstandig geplaatste ontkoppelcondensatoren kan deze omweg aanvaardbaar klein gehouden worden, doch datastromen van enkele honderden megabits per seconde door snelle GaAs chips kunnen van deze omweg weleens veel last hebben.

In die gevallen is er nog wel een verbetering aan te brengen door plaatselijk het ondervlak in stukken te delen. Op de juiste plaats aan de onderzijde dienen ze dan met ontkoppel condensatoren weer verbonden te worden met de rest van het aardvlak. Voor gelijkstroom zijn er dan wel verschillende vlakken aan te wijzen, maar voor hoogfrequent signalen is er toch maar *één* aardvlak.



figuur 20.

Nog een manier om onverwachte problemen te introduceren: een IC in zijaanzicht die van boven af gezien geheel hoogfrequent verantwoord lijkt te zijn aangesloten. Een IC-voet heeft de chip op enige afstand van het aardvlak gebracht. Het zijaanzicht illustreert dat de signaalstroom een lus moet maken om die chip te bereiken, waardoor het volume waarbinnen het elektromagnetisch veld is geconcentreerd veel groter is geworden dan gewenst was. Het gevolg is wederom: een antenne die straalt en ontvangt. Dit effect is goed waar te nemen door met een draadlus aan een oscilloscoop het elektromagnetisch veld te detecteren rondom de IC's.

Het nadelige effect van IC-voeten is goed te begrijpen door de printdikte te vergelijken met de hoogte van een IC in een voet. Meerdere voeten inelkaargestoken als reparatiemaatregel om IC-pennen kruislings te verbinden met een foutieve print hebben dan meer weg van een torenflat dan van laagbouw. Bij simpele IC's kan deze straling nog wel meevallen, maar een complexe chip waarin totaal 50 mA schakelstromen hevig in de weer zijn is in potentie een krachtige zender van 50mA*5V = 250 mW. Alleen door te voorkomen dat zo'n bron een zendantenne krijgt, kunnen elektromagnetische velden grotendeels binnenboord gehouden worden.

Wanneer deze uitstraling een probleem vormt, zijn er minimaal drie mogelijkheden te bedenken dit te beperken:

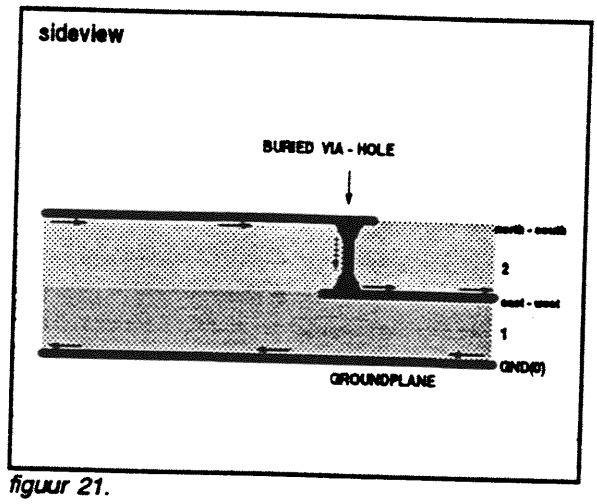
- De chip naar het aardvlak toe te brengen door hem zo plat mogelijk op de print te solderen (zonder voet, liefst in de vorm van SMD-montage).
- Het aardvlak naar de chip toe te brengen door in de IC-voet, of onder de IC-behuizing of zelfs *in* de IC-behuizing een geleidend vlak aan te brengen. Deze oplossing heeft overigens alleen zin als dit hulpvlak op de juiste plaatsen is verbonden met het ondervlak, namelijk overal waar er heenstromen langs de IC-pinnen vloeien.
- Accepteren dat de constructie straalt en deze straling vlak buiten het IC weer opvangen door een volledig gesloten metalen kap rondom het IC te plaatsen. Ook deze kap zal rondom via de kortste weg met het ondervlak verbonden moeten zijn; vooral op plaatsen waar veel heenstromen vloeien.

Deze laatste oplossing is waarschijnlijk de minst praktische van allemaal; daarom is het beter de volgende vuistregel te hanteren: *hou alles zo plat mogelijk boven het aardvlak.*

5. Multilayer verbindingen

Voor veel complexe printschakelingen is het gebruik van een aardvlak met daarboven slechts één laag met printsporen onvoldoende om de gewenste pakkingsdichtheid te kunnen bereiken. Op zich hoeft dat maar weinig hoogfrequent problemen met zich mee te brengen, alhoewel sommige lay-out keuzen vragen om moeilijkheden.

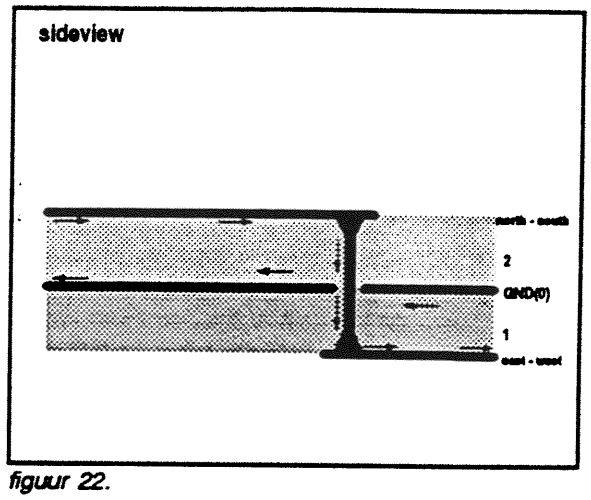
Een voorbeeld van een drielagen print: (1) een ondervlak bestaande uit egaal koper voor gebruik als aardvlak, (2) een middenvlak met printsporen voor bijvoorbeeld alle oost-west verbindingen, en (3) een bovenvlak met printsporen voor bijvoorbeeld alle noord-zuid verbindingen. Via begraven doorgemetaliseerde gaten zijn alle verbindingen tussen de vlakken tot stand gebracht.
In principe kan dit een redelijke hoogfrequent verantwoorde print opleveren omdat de retourstromen ter plaatse van de begraven doorvoer niet echt gehinderd worden. Vooral indien de printsporen van karakteristiek afgesloten transmissielijnen in het middenvlak evenredig smaller zijn dan die in het bovenvlak kan bewerkstelligd worden dat een transmissielijn op alle plaatsen dezelfde karakteristieke impedantie heeft.



figuur 21.

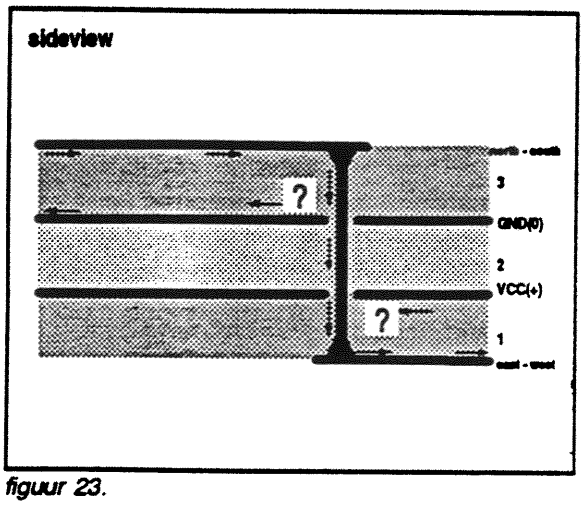
Er moet echter wel voor gewaakt worden dat het middenvlak niet zodanig overbevolkt raakt met printsporen dat het a.h.w. een afscherming begint te vormen tussen bovenvlak en aardvlak. In dat geval zal het elektromagnetisch veld behorende bij een stroom in het bovenvlak niet meer instaat zijn *plaatselijk* in het ondervlak een retourstroom te induceren. Dit kan dan een obstakel vormen voor een signaalstroom in het bovenvlak met sterke overspraak naar sporen in het middenvlak. Een ander, puur praktisch, nadeel kan zijn dat de printsporen in het middenvlak niet meer toegankelijk zijn voor printmodificaties of -reparaties maar dat is een probleem van een geheel andere orde.

Een andere, principieel betere, constructie is die waarbij het middenvlak dient als aardvlak. Dit aardvlak verricht dan tevens zijn diensten als afscherming tussen elektromagnetische velden in de bovenste helft (noord-zuid stromen in het bovenvlak) en tussen elektromagnetische velden in de onderste helft (oost-west stromen in het ondervlak). Een dergelijke constructie is op grond daarvan al iets in het voordeel t.o.v. de voorgaande constructie.



figuur 22.

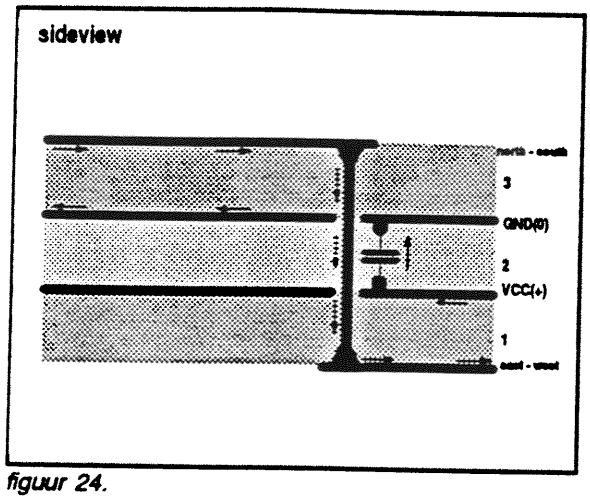
Ter plaatse van een doormetalisering, waarbij de signaalstroom van vlak wisselt, moet dit elektromagnetisch veld zich door het diëlectrische gat zien heen te wringen hetgeen met enige reflecties gepaard kan gaan. Doordat het volume waarbinnen dit zich allemaal afspeelt zeer klein is t.o.v. alle andere obstakels, is deze hindernis in zeer veel gevallen verwaarloosbaar klein. Anders gezegd: de retourstroom in het aardvlak maakt ter plaatse van het gat een kleine omweg maar kan daarna zijn weg weer gewoon vervolgen.
Opgemerkt moet worden dat de stromen zich aan de buitenkantkanten van het koper bevinden, het zogeheten *skineffect*. De pijlen geven daarom niet alleen de richting aan maar ook de zijde van het koper waar de elektronen vloeien.



figuur 23.

Een gelijksoortige lay-out als gebruikt in het vorige voorbeeld, doch met een tweede middenvlak om gemakkelijk de voedingspennen met de voeding te kunnen verbinden. Het VCC-vlak is op een paar plaatsen ontkoppeld naar aarde en kan dus in principe als aardvlak werken. Het geheel lijkt erg veel op zijn voorganger, dus in eerste instantie lijkt het dezelfde hoogfrequent eigenschappen te bezitten.
Helaas kan deze constructie grote problemen veroorzaken ter plaatse van het gat. Voor de heenstroom is een voorziening aangebracht voor het wisselen van vlak middels een doormetalisering, doch voor de retourstroom ontbreekt iets dergelijks.
De retourstroom wil de gemakkelijkste weg vinden, en dat is in de rechterhelft van de tekening het VCC-vlak en in de linkerhelft het GND-vlak. Het elektromagnetische veld bevindt zich in de linkerhelft in de bovenste substraat, laag 3, en in de rechterhelft in de onderste laag 1. Ter plaatse van het gat moet dit elektromagnetische veld op de een of ander manier door het gat zien te wringen om de retourstroom van vlak te kunnen laten wisselen.
Voor de retourstroom zit er niets anders op dan een omweg te maken, op zoek naar de dichtstbijzijnde toevallig aanwezige ontkoppelcondensator die VCC- en GND-vlak met elkaar

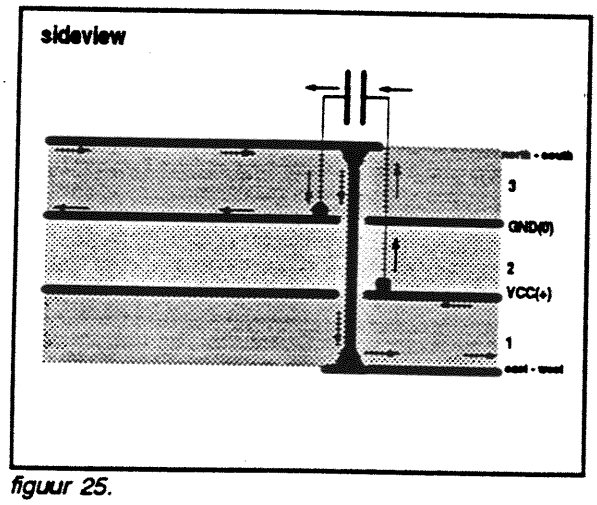
verbindt. Als deze omweg een relatief groot oppervlak omvat zal het geheel gaan stralen, storing oppikken en reflecties met zich meebrengen.



figuur 24.

Een theoretische oplossing is een capacitieve koppeling tussen VCC- en GND-vlak ter plaatse van het doorgemetaliseerde gat. Nu kunnen zowel heen- als retourstroom vrijwel dezelfde weg volgen.

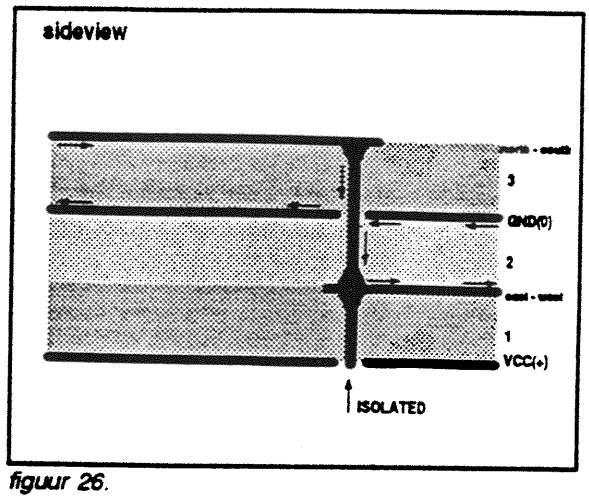
Een discrete condensator ter plaatse is niet realistisch maar in theorie zou een flinterdunne isolatielaag met hoge permittiviteit tussen de twee koperviakken voor die koppeling kunnen zorgen. Een dergelijke constructie moet zo flinterdun zijn (sub-micrometers?) en zo stabiel (een miniem luchtlaagje reduceert de capaciteit al drastisch) dat een praktische uitwerking in praktijk waarschijnlijk onvoldoende effectief is.



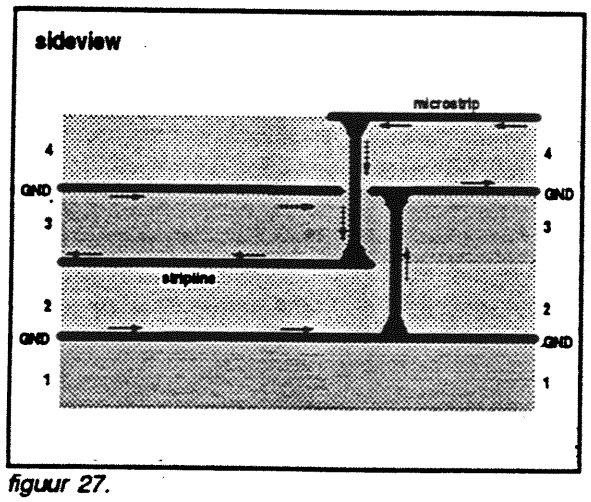
figuur 25.

Een andere noodmaatregel/reparatie is het aanbrengen van een discrete externe condensator ter plaatse van het gat, die beide metaalvlakken met elkaar verbindt. Doordat een dergelijke print over het algemeen zeer veel plaatsen heeft waar signalen van vlak wisselen zijn er erg veel condensatoren nodig waardoor deze oplossing niet erg praktisch zal zijn. Het beste is dit soort constructies, waarbij het VCC-vlak als aardvlak moet fungeren, te vermijden.

Een betere variant ontstaat indien het VCC-vlak zodanig verplaatst wordt dat het niet meer als aardvlak behoeft te fungeren. Wanneer het VCC-vlak als egaal koppervlak wordt uitgevoerd zal het toch zijn invloed blijven uitoefenen op de dichtsbijgelegen printsporen. Er ontstaat dan een soort *stripline* structuur, die straks besproken wordt, waarbij het VCC-vlak niet goed meedoet. Om dat te beperken is het beter bij dit soort gevallen in het VCC-vlak alleen koper aan te brengen op die plaatsen waar dat strikt noodzakelijk is. Liever koper*sporen* dan een egaal koper*vlak*.



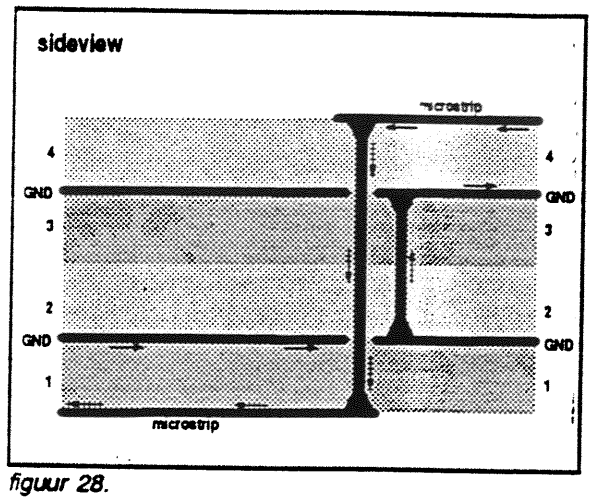
figuur 26.



figuur 27.

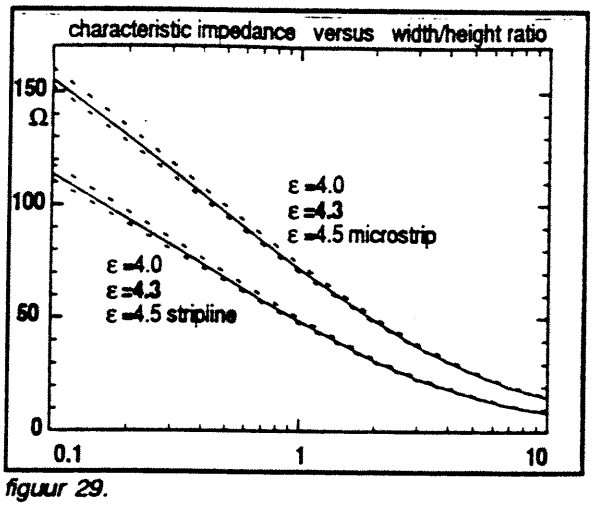
Een goede hoogfrequent verantwoorde printlayout met meerdere lagen is een lay-out waarbij de signaalsporen elkaar niet kunnen beïnvloeden doordat ze door meerdere aardvlakken van elkaar gescheiden worden. Deze aardvlakken moeten dan wel op de juiste plaatsen met elkaar verbonden zijn.
De transmissiewegen aan de buitenste lagen, 1 en 4, worden dan gevormd door een *microstrip* structuur: een geleider boven een aardvlak. De transmissiewegen in de binnenste lagen, 2 en 3, worden dan gevormd door een *stripline* structuur: een geleider ingesloten tussen een onder aardvlak en een boven aardvlak.
De symmetrische lay-out van een stripline structuur maakt dat de retourstromen zowel in het boven aardvlak als in het onder aardvlak vloeien, en zowel recht boven als recht onder het printspoor. Bij een vlakwisseling van bijvoorbeeld microstrip naar stripline dient hier rekening mee gehouden te worden. Het microstrip veld in laag 4 moet door het gat propageren en zich verdelen over de lagen 2 en 3. Retourstromen van de stripline, die via twee aardvlakken terugvloeien, zullen daarom ter plaatse van het gat moeten samenkomen via een doormetalisering opdat ze gezamenlijk verder kunnen via het aardvlak van de microstrip structuur. Zou deze extra doormetalisering ontbreken dat dient tenminste een deel van de retourstroom een omweg te maken met alle gevolgen van dien.

Ook wanneer een signaal van vlak moet wisselen, dwars door een aantal aardvlakken heen, dan moet de retourstroom in de buurt van het gat kunnen vloeien. Dit doet zich bijvoorbeeld voor wanneer een printspoor van de bovenste microstrip structuur verbonden moet worden met een printspoor van de onderste microstrip structuur. Het hier getekende voorbeeld laat opnieuw zien hoe de aardvlakken ter plaatse van het gat met elkaar verbonden kunnen worden met een aparte doormetalisering.
Wanneer, uit constructieve overwegingen, dergelijke doormetaliseringen door en door lopen, zal dit maar een gering obstakel zijn omdat deze verstoring geconcentreerd is in een klein volume. Als vuistregel kan daarom gesteld worden dat wanneer een signaalgeleider van vlak wisselt alle aardvlakken ter plaatse met elkaar verbonden moeten worden.



figuur 28.

Een economisch verantwoord compromis met minder aardvlakken zou bijvoorbeeld een vijf lagen print kunnen zijn met 6 vlakken voor kopersporen. Het VCC-vlak zou zich dan in het midden kunnen bevinden met direct daaronder en daarboven een aardvlak. Boven het bovenste aardvlak bevinden zich dan twee gelaagde microstrip structuren: de meeste printsporen vlak boven het bovenste aardvlak en een enkeling in de buitenste laag.
Onder het onderste aardvlak bevinden zich eveneens twee gelaagde microstrip structuren, wederom met de meeste printsporen vlak onder het onderste aardvlak en een enkeling in de buitenste laag. Overal waar signalen dwars door de aardvlakken vloeien worden beide aardvlakken verbonden via een doormetalisering die geïsoleerd door het VCC-vlak gaat.

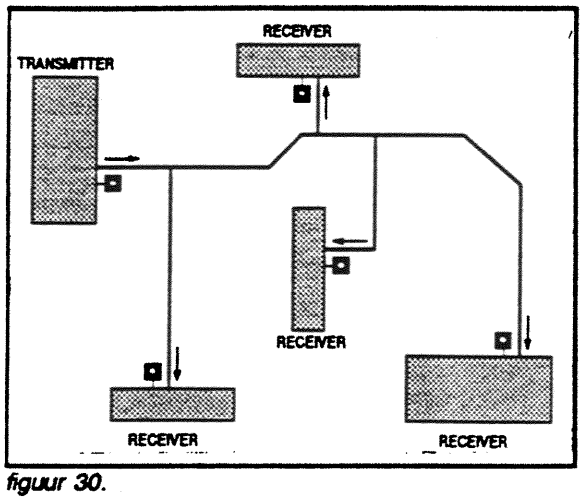


figuur 29.

De propagatie eigenschappen van stripline structuren en microstrip structuren verschillen van elkaar. In eerste orde benadering is een stripline structuur gelijk aan een combinatie van twee tegen elkaar geplakte microstrip structuren. De bovenste staat daarbij op zijn kop en maakt gebruik van het printspoor van de onderste. Doordat ze als het ware parallel staan is de halve spoorbreedte al voldoende voor dezelfde karakteristieke impedantie.
De karakteristieke impedantie als functie van de breedte/hoogte verhouding is hier grafische weergegeven voor beide structuren. Onder hoogte wordt in beide gevallen de afstand verstaan tussen printspoor en het aardvlak. Doordat de permittiviteit van glas-epoxy spreiding vertoont, zijn de grafieken ook berekend voor iets afwijkende waarden. De getallen zijn afkomstig van het programma LineCalc van EEsof (USA)

6. Vertakkingen

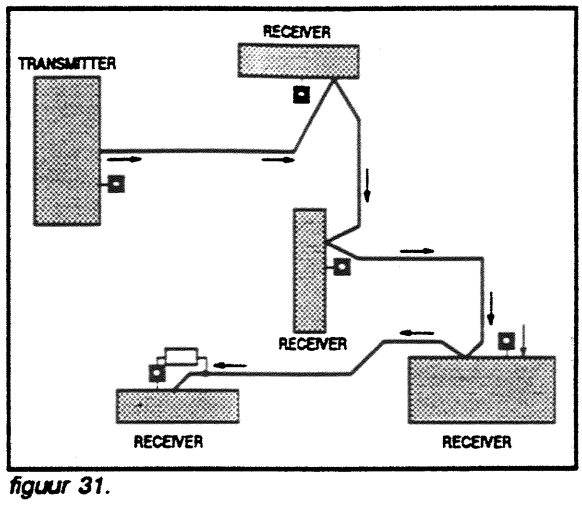
Tot nog toe heeft dit verhaal zich beperkt tot alleen punt-punt verbindingen, en wat daarmee verkeerd kan gaan. Veel signalen hebben één oorsprong doch meestal meerdere bestemmingen. Vooral kloksignalen moeten vaak verdeeld worden over vele bestemmingen.



figuur 30.

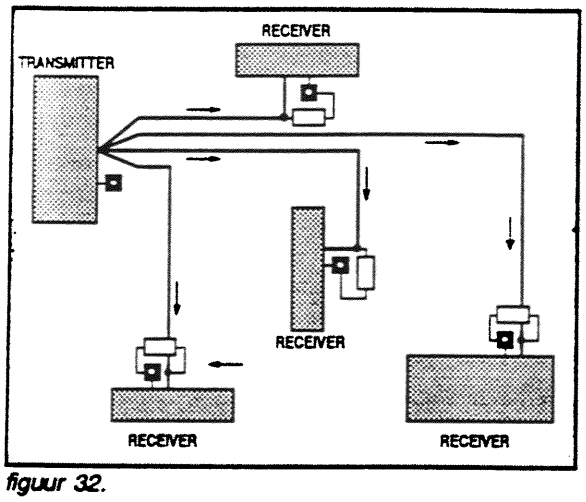
In dit voorbeeld wordt een signaal, afkomstig van een zender, verstuurd naar meerdere ontvangers tegelijk. Deze wijze van vertakken gaat alleen goed indien de lengte relatief kort is, dat wil zeggen dat de looptijd klein is ten opzichte van de stijg- en daaltijden van de pulsflanken. Zo niet dan zal een complex samenspel van reflecties voor een significante pulsvervorming kunnen zorgen.
Iedere reflectie tegen een ontvanger zal nogmaals reflecteren tegen iedere T-splitsing die de gereflecteerde golf op zijn weg tegenkomt. Ook als de transmissielijnen bij iedere ontvanger karakteristiek zijn afgesloten, zullen niet alle reflecties eenvoudig uit te bannen zijn. Het laatste stuk, tussen T-splitsing en ontvanger is op die manier wel reflectie-vrij te maken, maar het traject tussen de T-splitsingen zelf vrijwel niet. Een 50 ohm transmissielijn ontmoet dan ineens 50/2 = 25 ohm afsluitimpedantie.
In principe kan dit gedeeltelijk verholpen worden door het gemeenschappelijke spoor breder te maken zodat de karakteristieke impedantie plaatselijk daalt tot bijvoorbeeld 25 ohm, maar in praktijk is dit maar beperkt toepasbaar. Tevens is het niet mogelijk iedere willekeurig gewenste karakteristieke impedantie in praktijk te realiseren.

Een voorkeursoplossing is een oplossing waarbij de transmissielijnen onderweg geen significante obstakels ontmoeten doordat zijaftakkingen relatief kort gehouden zijn en doordat de ingangsimpedantie van de ontvangers hoog is ten opzichte van de karakteristieke impedantie. Om een idee te geven van "hoog": een impedantie van 100 ohm parallel aan een 50 ohm lopend afgesloten transmissielijn veroorzaakt 20% reflectie; 200 ohm parallel nog maar 11% reflectie. In formulevorm is reflectie gelijk aan (Z-Z0)/(Z+Z0).
De totale weglengte tot aan de laatste ontvanger kan echter zo groot zijn dat de looptijd met zich meebrengt dat bijvoorbeeld kloksignalen veel te laat aankomen. (15 cm. in glas-epoxy veroorzaakt 1 ns tijdvertraging).



figuur 31.

Als het niet mogelijk is datasignalen, die synchroon moeten meelopen met het kloksignaal, evenveel te vertragen, kan dit timingsprobleem de maximaal toelaatbare printafmetingen doen begrenzen.



figuur 32.

Een alternatief, dat minder extra weglengte introduceert, is denkbaar door vanaf de zender meerdere onafhankelijke transmissielijnen te laten vertrekken die allen lopend zijn afgesloten (ster-configuratie). Reflecties treden dan niet meer op omdat de afstand van het interne punt in de zender tot aan de vertakking gering zal kunnen zijn. Een nadeel is dan wel dat één zender de parallelschakeling van vele karakteristieke impedanties moet aansturen, hetgeen de fan-out van de zender wel eens te boven kan gaan.
Een denkbaar compromis is het signaal halverwege de print te bufferen om zo de vertakkingen te verdelen over meerdere poorten.

Een busprint waarop meerdere printen zijn aangesloten is een ander goed voorbeeld van een vertakking die voor grote hoogfrequent problemen kan zorgen. Een veilige oplossing kan er bijvoorbeeld als volgt uit zien:

- De busprint bevat alleen sporen in een microstip of stripline structuur, die aan beide uiteinden karakteristiek worden afgesloten.
- De zenders die halverwege signalen op de bus aanbieden hebben een stroombron karakter opdat hun uitgangsimpedantie voldoende hoog is ten opzichte van de karakteristieke impedantie van de bus. Die zenders dienen zich dan wel zeer dicht bij de busprint te bevinden omdat de impedantie van een zij-aftakking al fataal kan zijn (vooral omdat meerdere zenders parallel staan). Bij voorkeur bevindt de zender zich op de busprint zelf, maar direct achter de connector kan een goed compromis zijn.
- De ontvangers die halverwege signalen van de bus afhalen hebben een hoogohmige ingang opdat hun ingangsimpedantie voldoende hoog is ten opzichte van de karakteristieke impedantie van de bus. Ook deze ontvangers dienen zich zeer dicht bij de busprint te bevinden omdat de impedantie van een zij-aftakking al fataal kan zijn (vooral omdat meerdere ontvangers parallel staan). Bij voorkeur bevindt de ontvanger zich op de busprint zelf, maar direct achter de connector kan ook nu een goed compromis zijn.

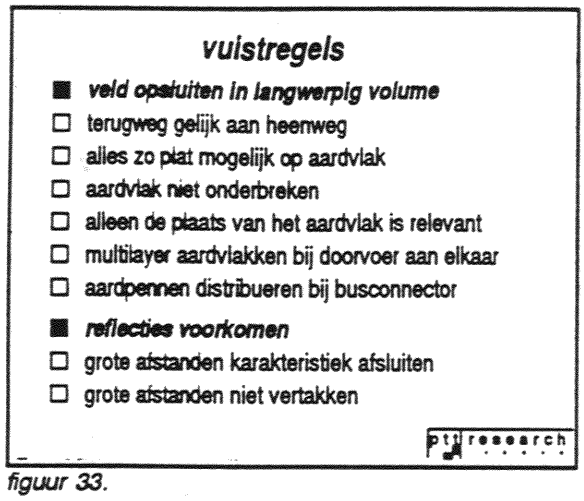
Een dergelijke configuratie is goed in staat hoogfrequentsignalen te transporteren, waarbij looptijd het enige nog overgebleven hoogfrequent effect is.

7. Vuistregels

De fouten in de vele verschillende voorbeelden die tot nog toe zijn opgesomd komen in feite slechts neer op het zondigen tegen twee hoofdregels:

1. sluit het veld op in een smal langwerpig volume.
2. sluit velden in lange transmissielijnen lopend af.

Om deze algemene regels goed in praktijk te kunnen brengen is het wenselijk te beschikken over een aantal vuistregels die de consequente toepassing van deze hoofdregels vergemakkelijken.



figuur 33.

Vuistregels

- Waak er altijd voor dat de terugweg dezelfde weg kan lopen als de heenweg anders zal het geheel niet alleen stralen en gevoelig zijn voor storingen van buiten af maar zal er ook een aanzienlijke pulsvervorming kunnen optreden.
- Hou de hele constructie zo plat mogelijk boven het aardvlak om straling en overspraak tegen te gaan. Bij gevoelige analoge schakelingen kan dit de noodzaak van tussenschotjes uitsparen omdat de terugwerking van uitgang naar ingang reduceert door een platte constructie.

Als zelfs een zeer laagfrequent, maar gevoelig circuit (microfoonversterker), geheel met SMD-componenten volgens een microstip lay-out geconstrueerd zou worden, zal zelfs zonder afscherming nog maar weinig storing uit de omgeving worden opgepikt.

- Onderbreek nooit zomaar een aardvlak indien inzicht in de consequenties ontbreekt. Ongemerkt kan dit de retourweg van vele signalen drastisch verstoren met alle gevolgen van dien.
- Alleen de plaats van het aardvlak is van belang. Extra grote vlakken buiten het gebied van signaalsporen, of extra dikke aardvlakken zoals gefreesde aluminium bakjes dragen niet bij aan een beter hoogfrequent gedrag. Dit is hooguit nuttig voor afschermingsdoeleinden.
- Verbind altijd multilayer aardvlakken met elkaar op plaatsen waar signaalleidingen van vlak wisselen. Hierdoor wordt de retourweg veilig gesteld van het signaal dat aan de andere kant weer verder moet.
- Distribueer de aardpennen bij een busconnector zodat de omweg van de retourweg beperkt blijft voor de meest verafgelegen pennen.
- Als de wegiengte zodanig groot is dat de looptijd niet meer verwaarloosbaar is ten opzichte van de stijg- en daaltijden van de pulsen, sluit dan de transmissielijnen karakteristiek af. Dit voorkomt pulsvervorming ten gevolge van meervoudige reflecties.

- Vermijd vertakkingen halverwege een lange transmissielijn omdat lopend afsluiten dan alleen mogelijk is door transmissielijnen te combineren met verschillende karakteristieke impedanties.

Wanneer zeer kritische deelschakelingen op print een afscherming vereisen dan is dat op goedkope en degelijke wijze te realiseren met een rand van blik dat via doorgemetaliseerde gaten verbonden is met een egaal koperen onderviak. Samen met een deksel van blik is de deelschakeling rondom hermetisch afgesloten. In plaats van blik geeft een rand en deksel van printplaat met egaal koper hetzelfde resultaat.

De auteur

Rob van den Brink, geboren op 21 mei 1955, studeerde elektrotechniek aan de Technische Universiteit te Delft, met microgolftechniek en analoge elektronica als specialisatie. Zijn afstudeeronderzoek betrof het ontwikkelen van een microgolfantenne. Hij trad daarna in dienst bij dezelfde universiteit voor onderzoek op het gebied van microgolf remote sensing.

Sinds 1985 is hij werkzaam bij PTT-Research op het gebied van glasvezel transmissiesystemen. Hij ontwikkelde breedbandige optische zenders en ontvangers, simulatiesoft-ware en verschillende nieuwe elektro-optische meettechnieken voor het ontwerpen van breedbandige schakelingen tot in het GHz gebied. Zijn groep realiseerde diverse analoge schakelingen voor coherent optische transmissiesystemen, zowel voor interne projecten als voor een ESPRIT (UCOL) project van de EEG.

Hij is auteur en co-auteur van diverse wetenschappelijke artikelen over optische ontvangers, optische ruismetingen (twee patenten in aanvraag) en het toepassen van microgolftechniek voor akoestische netwerk-analyse.

Op dit moment werkt hij aan zijn proefschrift over een systematische ontwerpaanpak voor breedbandig tegengekoppelde versterkers, toegepast op optische ontvangers.

Voor verdere informatie:
Ir. R.F.M. van den Brink
PTT Research
Postbus 421
2260 AK Leidschendam
Tel.: 070 - 3325389 of 070 - 3326158
Fax.: 070 - 3326477.