



Jan Genoe
jan.genoe@kuleuven.be

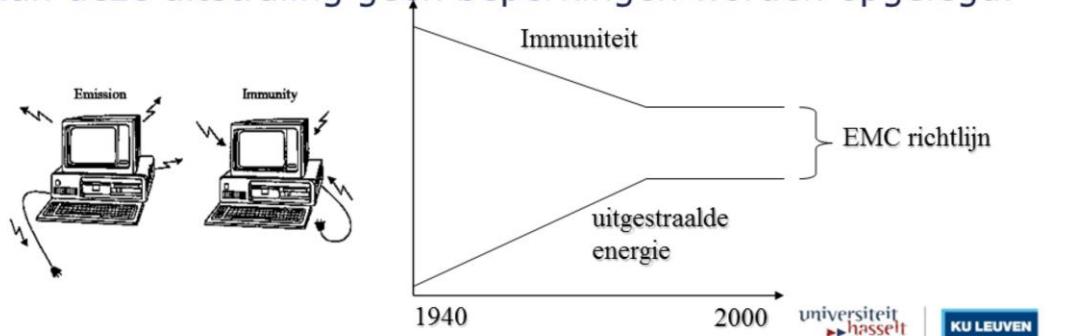
EMC basics

1



Noodzaak tot ingrijpen

- De gevoeligheid voor storing van de verschillende componenten stijgt continu door de evolutie in de technologie, zodat de immuniteit van de schakelingen daalt indien deze gevoeligheid voor storingen niet beperkt wordt.
- De uitgestraalde energie van de verschillende schakelingen stijgt continu door de evolutie in de technologie, indien er aan deze uitstraling geen beperkingen worden opgelegd.



2



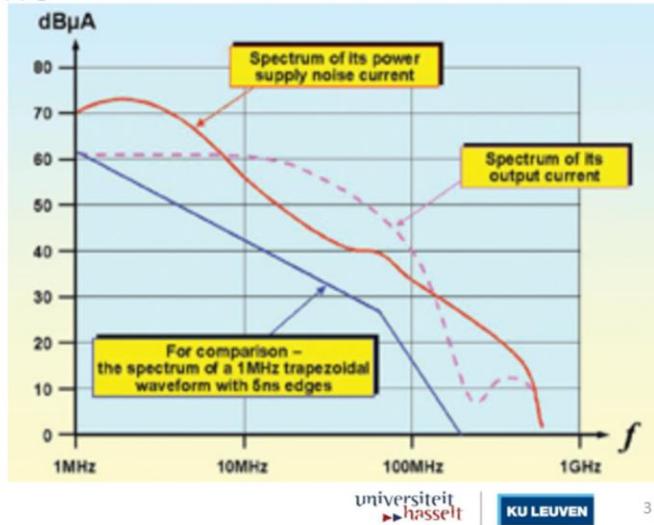
Hoogfrequent componenten

Gemeten hoogfrequent stroomcomponenten zijn hoger dan de theoretische

Voorbeeld:

6 signalen van een 74HC04:
1MHz, 5 ns stijgtijd, 5V, 50 Ω

- Theoretisch spectrum stroom
 - Blauwe lijn
- Gemeten spectrum output stroom
 - Roze stippellijn
- Gemeten spectrum power supply stroom
 - Oranje lijn





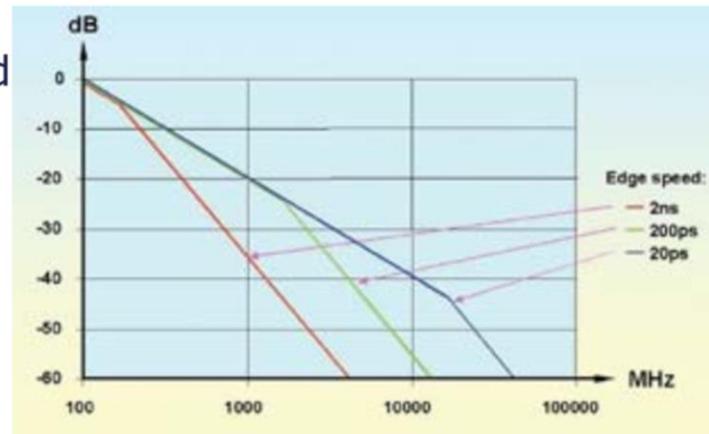
Invloed van de stijgtijd

De stijgtijd bepaalt in belangrijke mate de hoogfrequent inhoud

Voorbeeld:

100 MHz klok:

- 2000 ps (oranje)
- 200 ps (groen)
- 20 ps (blauw)



[1] "Design Techniques for EMC – Part 5: PCB Design and Layout", Keith Armstrong, UK EMC Journal, October 1999, pages 5 - 17

[2] "Design Techniques for EMC – Part 5: PCB Design and Layout", Keith Armstrong, <http://www.compliance-club.com/KeithArmstrongPortfolio>

[3] "PCB Design Techniques for Lowest-Cost EMC Compliance: Part 1" M K Armstrong, IEE Electronics and Communication Engineering Journal, Vol. 11 No. 4 August 1999, pages 185-194

[4] "PCB Design Techniques for Lowest-Cost EMC Compliance: Part 2" M K Armstrong, IEE Electronics and Communication Engineering Journal, Vol. 11 No. 5 October 1999, pages 219-226

[5] "High Speed Signal Propagation: Advanced Black Magic" Howard W. Johnson, Prentice Hall, 2003



De 2 uitersten bij DC

- Een verbinding wordt uitgevoerd met 2 ideale geleiders (zonder weerstand).
 - Het uiteinde wordt **kortgesloten** en er wordt een stroom ingestuurd.
 - We bekomen een magnetisch veld
 - We bekomen geen elektrisch veld
 - Het uiteinde blijft **open** en er wordt een spanning opgelegd.
 - We bekomen een elektrisch veld tussen de geleiders
 - We bekomen geen magnetisch veld

In het geval van AC signalen zullen er steeds stroom en spanning gelijktijdig aanwezig zijn, zodat er ook steeds een veranderend elektrisch en magnetisch veld aanwezig zijn



Basisconcept: wetten van Maxwell

- Een verandering in elektrisch veld veroorzaakt een verandering in magnetisch veld
- Een verandering in magnetisch veld veroorzaakt een verandering in elektrisch veld
- De elektromagnetische golf plant zich voort loodrecht op het elektrisch en magnetisch veld

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

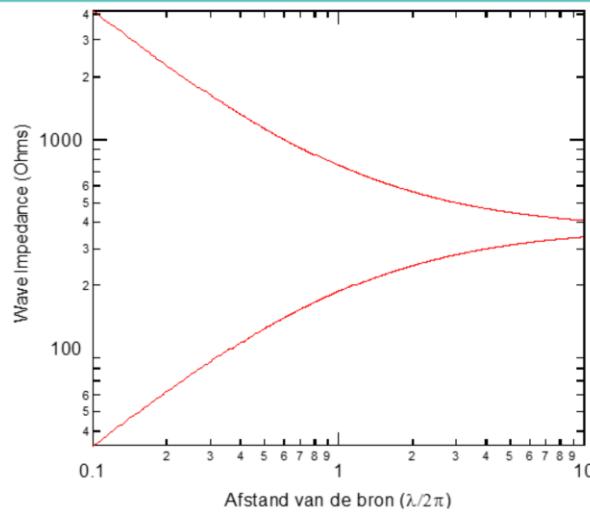


Wat is de impedantie van een golf?

- In de omgeving van een geleider waaraan AC signalen worden aangelegd is er een elektrisch en een magnetisch veld aanwezig.
- De impedantie van de golf in de omgeving is de verhouding van deze velden
- Voor een vlakke golf (verre veld): $Z_0=377\Omega$.



Overgang van het nabije naar het verre veld

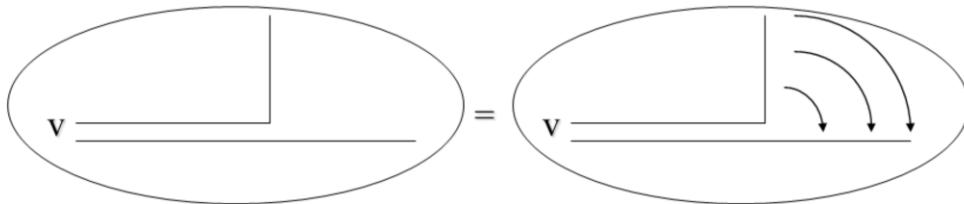


In het nabije veld kan het elektrisch of het magnetisch veld dominant zijn maar in het verre veld is de verhouding vast



Gevolgen van de wetten van Maxwell

- Hoe groter de lus, hoe meer energie wordt uitgestraald
- De lus hoeft niet gesloten te zijn door een stroom pad, een veranderend elektrisch veld is gelijkaardig



$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

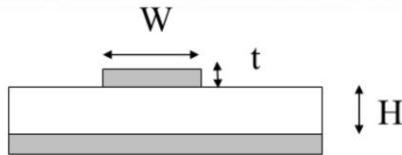


Basisregels

- Boven $\lambda/4$ is elke lus of dipool een antenne:
de efficiëntie neemt toe met
 - de stroom
 - de oppervlakte van de lus
- Vooral met power lussen opletten, want daarin lopen de grootste stromen.

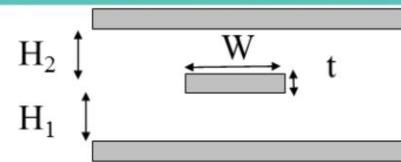


Microstrip tegenover striplijn



Microstrip

- Kan RF energie naar buiten stralen
- Lagere capacitieve belasting
 - dus snellere signalen mogelijk
- Enkel buitenzijde PCB



Striplijn

- Gelegen tussen 2 referentie vlakken
- Trager omwille van de capacitieve belasting
- Geen RF straling naar buiten
- Immuun voor externe ruis



Volgens welk pad loopt de stroom op PCB?

- Men kan zich voorstellen dat de verschillende terugvoerpaden allen in parallel staan
- Elk pad heeft zijn eigen impedantie
 - DC stroom verdeelt zich volgens het pad bepaald door de kleinste weerstand.
 - AC stroom verdeelt zich volgens het pad bepaald door de kleinste inductantie
 - Dit houdt in dat de AC stroom terugloopt zodat de lus met de aanvoerstroom zo klein mogelijk is
 - In het geval van een volledig grondvlak houdt dit in dat de stroom terugloopt onder het originele baantje

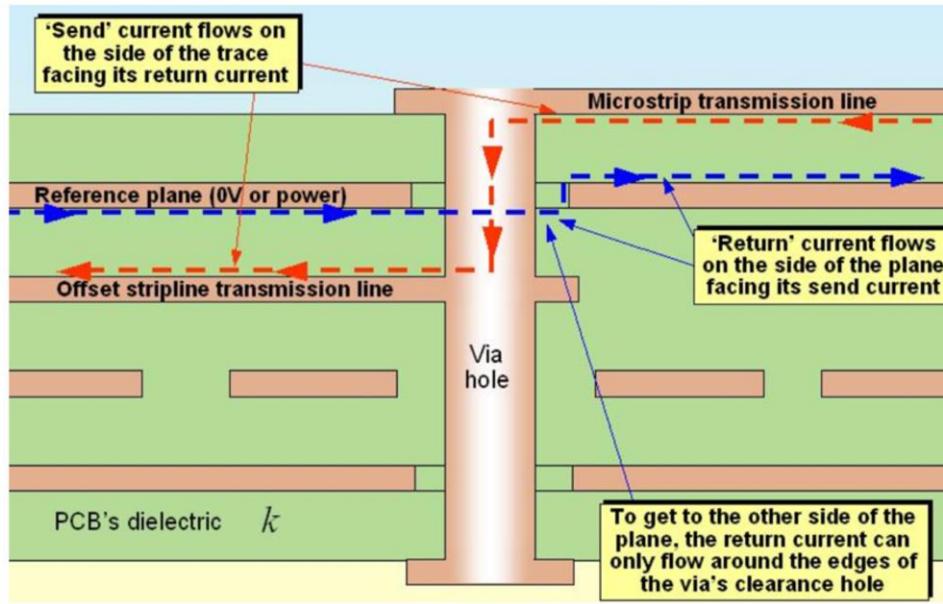


Beeld vlak

- Als een signaal langs een lijn loopt, loopt er een stroom door die lijn, om de capaciteit van die lijn op te laden.
- Langs de grond loopt er een tegengestelde stroom.
- Wanneer er in het grondvlak een gat is moet de stroom er rond lopen.
- Dit vormt een lus en veroorzaakt EMI.
- Laat gaten in het grondvlak zo klein mogelijk zijn en nooit aaneensluiten.



Terugloop stroom grondvlak

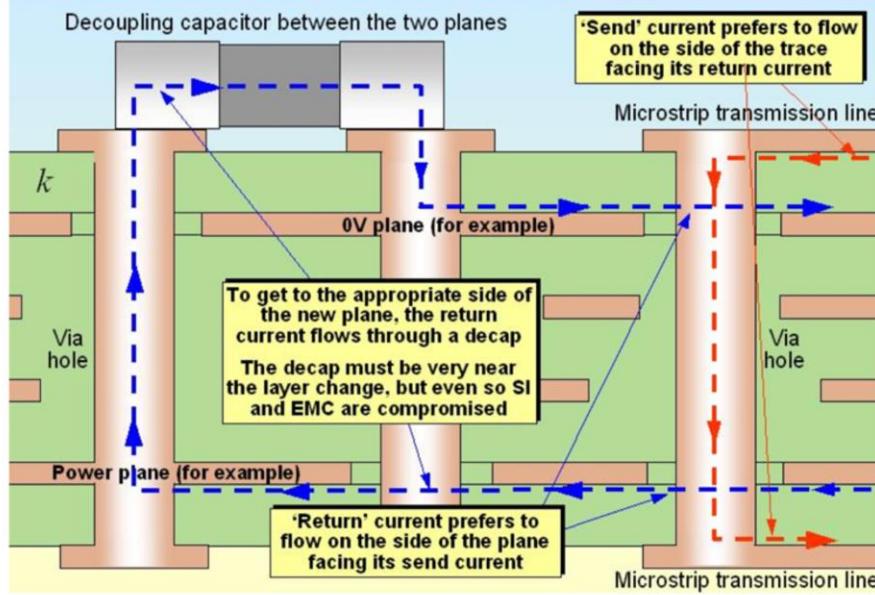
universiteit
hasselt

KU LEUVEN

14



Terugloop stroom grond+power

universiteit
hasselt

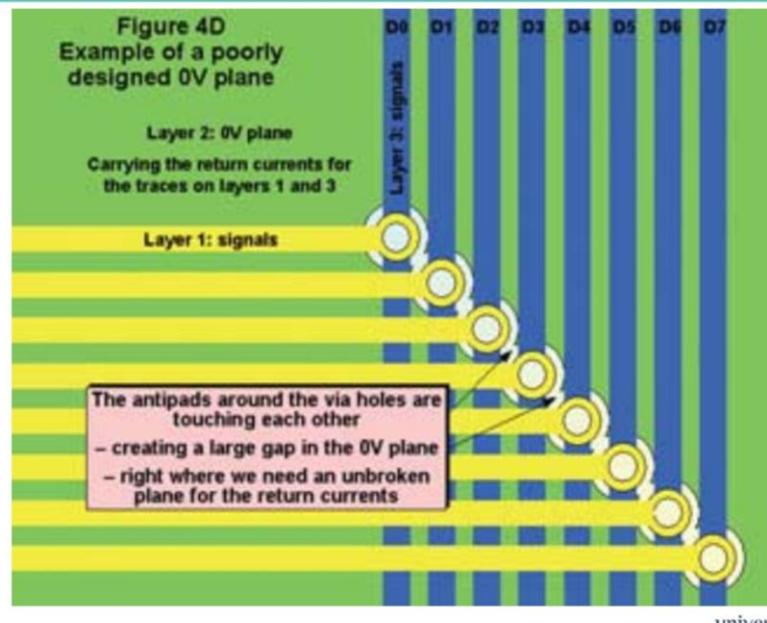
KU LEUVEN

15

In dit geval loopt de stroom langs de dichtstbijzijnde ontkoppelcondensator tussen power en grond terug.



Slecht design



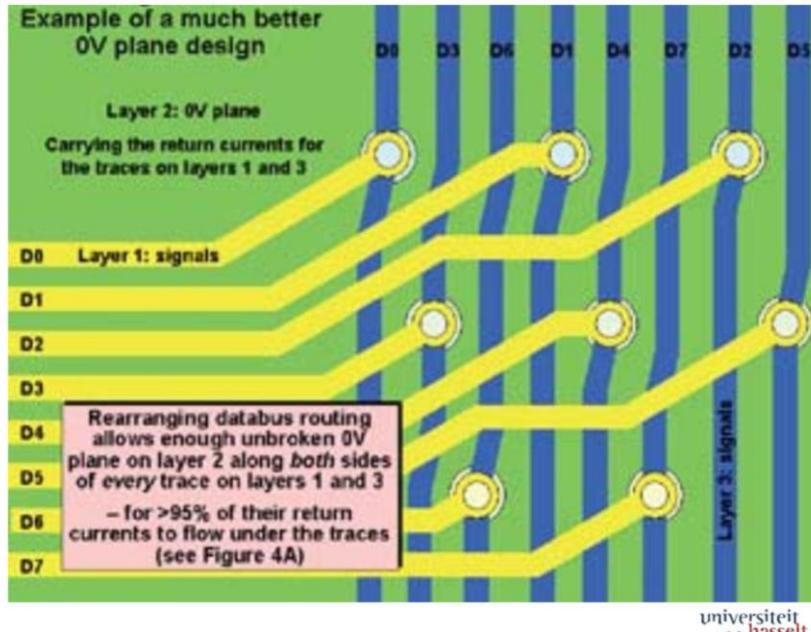


Beter design





Nog beter design

universiteit
hasselt

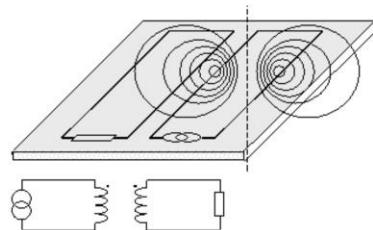
KU LEUVEN

18



Inductieve koppeling tussen nabijgelegen lussen

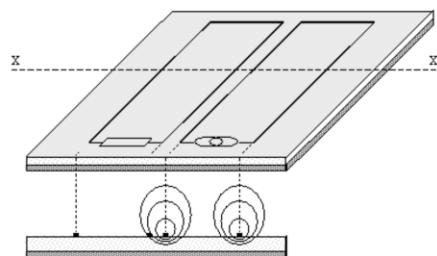
- Voorbeeld zonder een grondvlak
- Een belangrijk deel van het magnetisch veld gaat door de nabijgelegen lus





Inductieve koppeling tussen nabijgelegen lussen

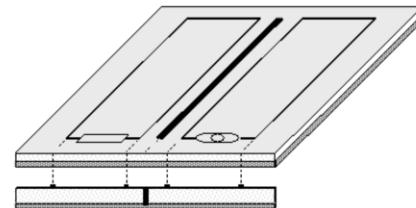
- De aanwezigheid van het grondvlak vermindert de inductieve koppeling al in belangrijke mate





Geleidend scherm

- Het gebruik van een geleidend scherm kan de magnetische koppeling nog verder terugdringen





Doelstelling ontkoppeling

Verhinderen dat energie overgaat van
een deel van het circuit
naar een ander deel van het circuit



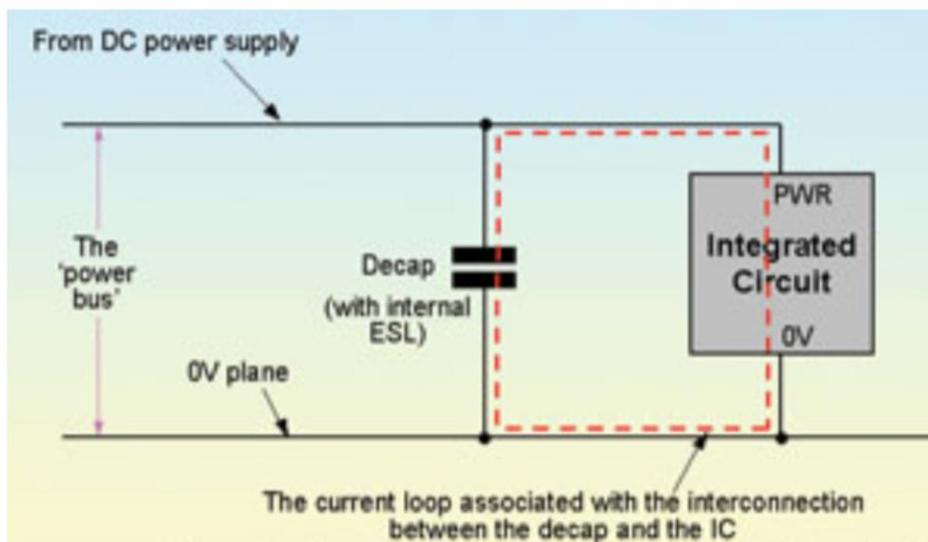
Onderscheid

- **Ontkoppel capaciteiten**
 - verwijderen de RF energie op de voedingsspanning
 - oorzaak: snelle schakelen van hoogfrequent componenten
- **Bypass capaciteiten**
 - verwijdert onnodige RF ruis
 - vervult andere filter functies
 - oorzaak: draden vangen signalen op
- **Bulk capaciteiten**
 - Onderhoud van een constante voedingsspanning



Ontkoppel condensator

Elke power pin heeft een ontkoppel condensator nodig



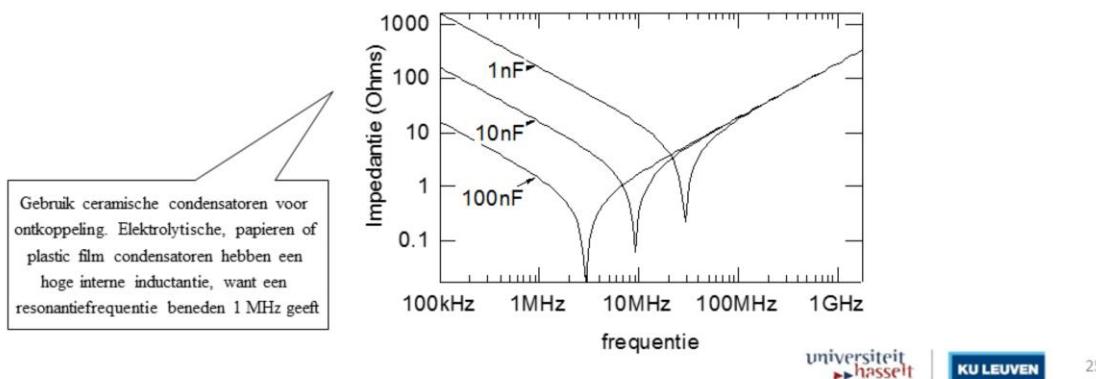
KU LEUVEN

24



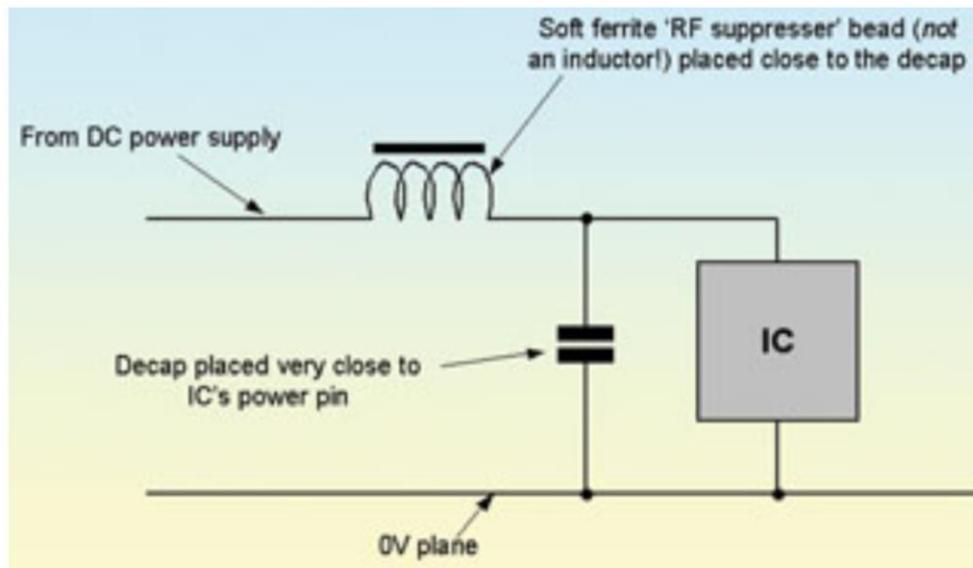
Serie resonantie frequentie

- Het equivalente circuit van elke condensator is een seriekring van een condensator, weerstand en inductantie.
- De inductantie van een pootje van 6 mm is 15 nH
- De impedantie van een dergelijke condensator loopt als het volgt:



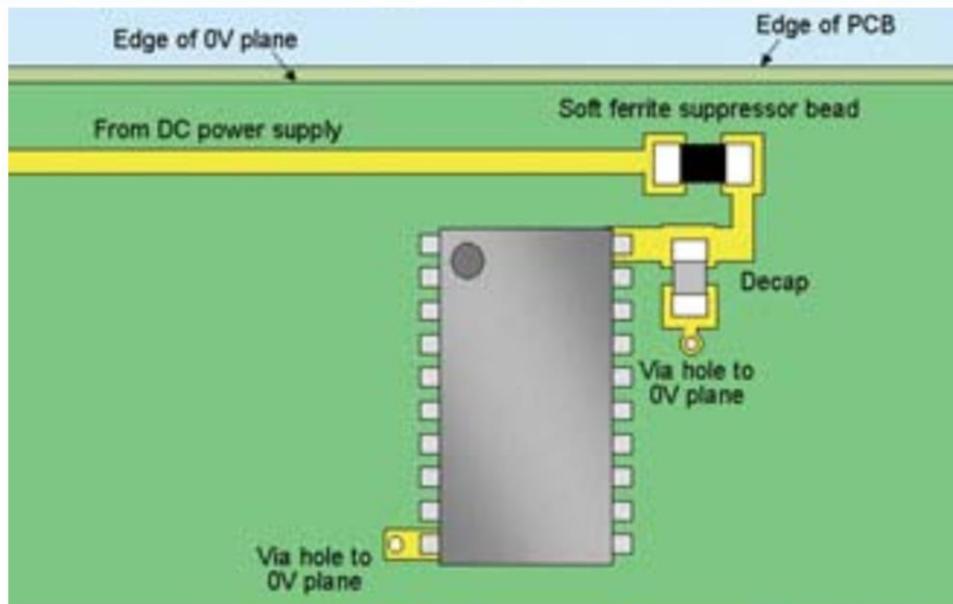


Beperken AC op VDD





Beperken AC op VDD

universiteit
hasselt

KU LEUVEN

27



Keuze van de ontkoppelcondensator

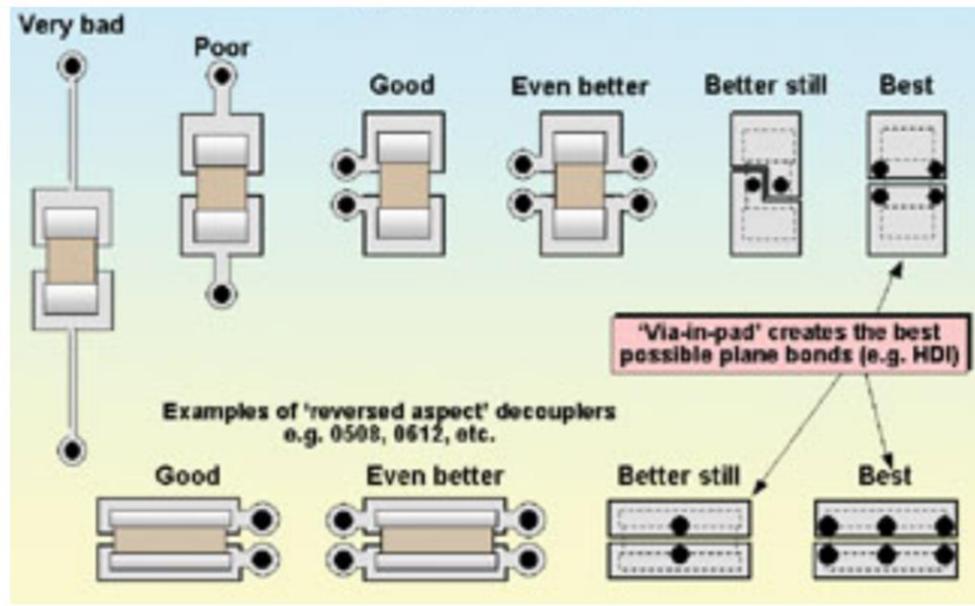
- De grootte van de condensator is bepaald door
 - De maximale schakelstroom: I
 - De tijd dat die stroom nodig is: Δt
 - De toelaatbare spanningsdaling: ΔV
- De minimale resonantiefrequentie van de condensator moet overeenkomen met de stijg of daaltijd van het signaal

$$C = I \times \Delta t / \Delta V$$

$$f = 1 / (3.5 \times t_{rise,fall})$$



Spoelwaarde van capaciteit verlagen

universiteit
hasselt

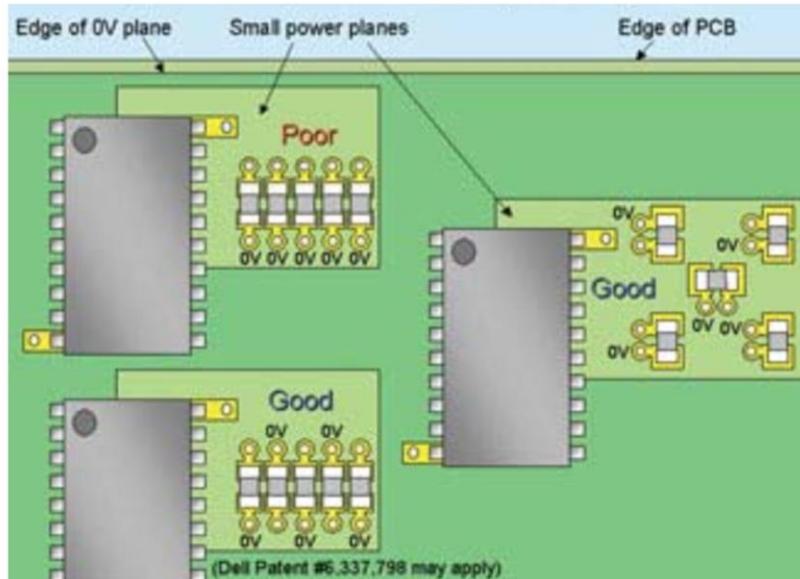
KU LEUVEN

29



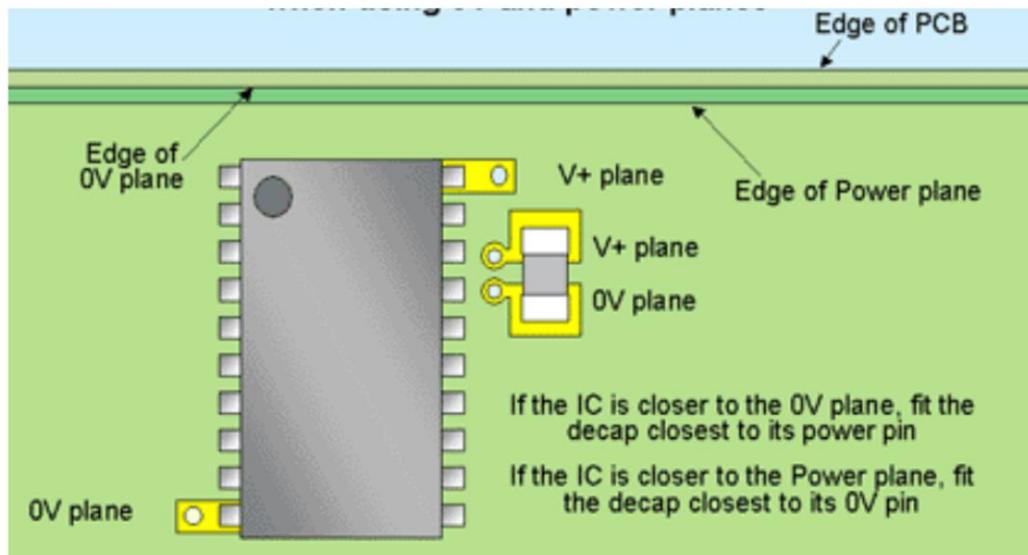
Meerdere C in parallel

Verschilt van 1 grote C als de stroom tegengesteld loopt





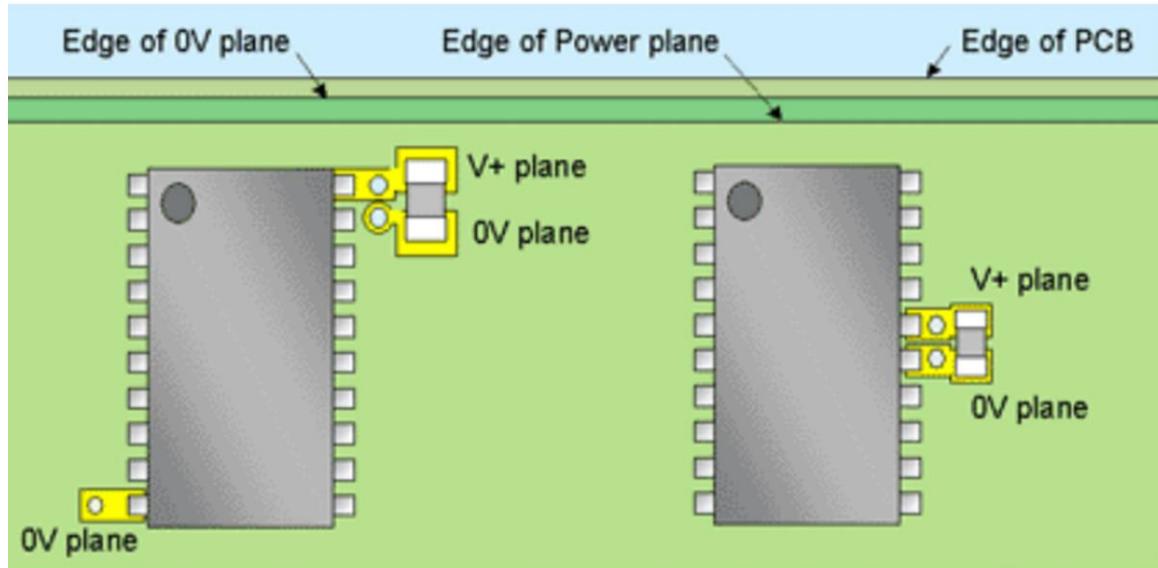
Ontkoppeling met power plane





Ontkoppeling met power plane

Betere versie



2



Mogelijke PCB multilagen stapeling

Altijd een grondvlak in de buurt

2 lagen	(S1) S2 G P
4 lagen, 2 routing	S1 G P S2
6 lagen, 4 routing	S1 G S2 S3 P S4
6 lagen, 4 routing	S1 S2 G P S3 S4
6 lagen, 3 routing	S1 G S2 P G S3
8 lagen, 6 routing	S1 S2 G S3 S4 P S5 S6
8 lagen, 4 routing	S1 G S2 G P S3 G S4
10 lagen, 6 routing	S1 G S2 S3 G P S4 S5 G S6



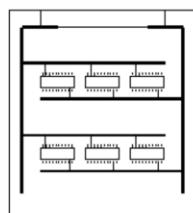
2 lagen PCB lay-out : Rooster configuratie

- Aan de ene zijde van de PCB loopt de voeding en de grond horizontaal, aan de andere zijde lopen deze verticaal
- Zorg dat elke mogelijke lus kleiner is dan 10 cm².
- Ontkoppelcapaciteiten tussen de voeding en de grond aan elke connector en aan elke IC

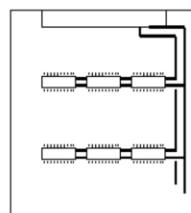


2 lagen PCB lay-out : Ster configuratie

- Werk stervormig vanaf de power connector
- Laat de voeding en de grond parallel met (of onder) elkaar lopen en zo dicht mogelijk bij elkaar om de lusoppervlakte te minimaliseren.
- Alleen voor ontkoppelcapaciteiten te kunnen plaatsen mag de afstand tussen voeding en grond groter worden dan de minimale afstand
- Bijkomende tips:
 - zorg voor een return pad onder/parallel elk signaal
 - zorg voor een grondvlak onder elk IC



slechte lay-out

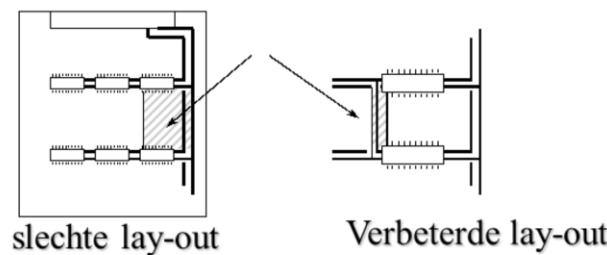


Verbeterde lay-out



Ontwerpen zonder een volledig grondvlak

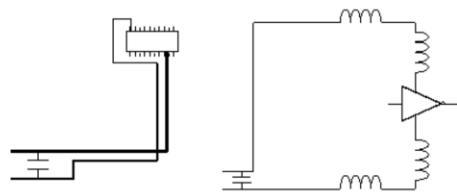
- Elke signaal dat 2 circuits verbindt vormt een lus met het grondvlak





Kruisen van de power en grond lijnen

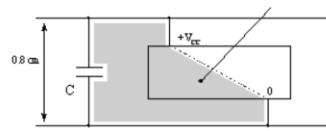
- Door een vermindering van de lusoppervlakte van de voeding, is de IC minder gevoelig aan storingen





Lus met de voedingsspanning

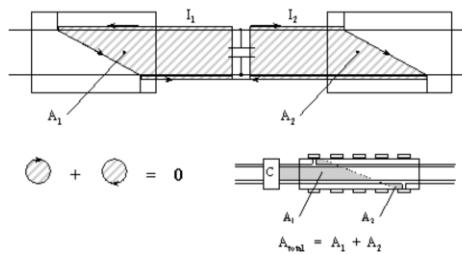
- Deze stralende voedingsspanningslus bedraagt tussen de 1.2 en 1.7 cm² voor een 20 pin DIL package





Gedeeltelijk wegwerken van de flux

- De uitgestraalde magnetische flux kan verminderd worden door te zorgen dat de flux van naast liggende IC tegengesteld is
- We beschouwen hiervoor het product van de AC stroom van de voedingen en de oppervlaktes





4 lagen PCB lay-out

1. (Component zijde): snelle signalen en klokken
2. Grond vlak
3. Power vlak
4. (Soldeer zijde): signalen

Beste EMI onderdrukking

Zo dicht mogelijk bij elkaar

Minder goed omdat de meeste IC
een grotere pull-down current hebben.



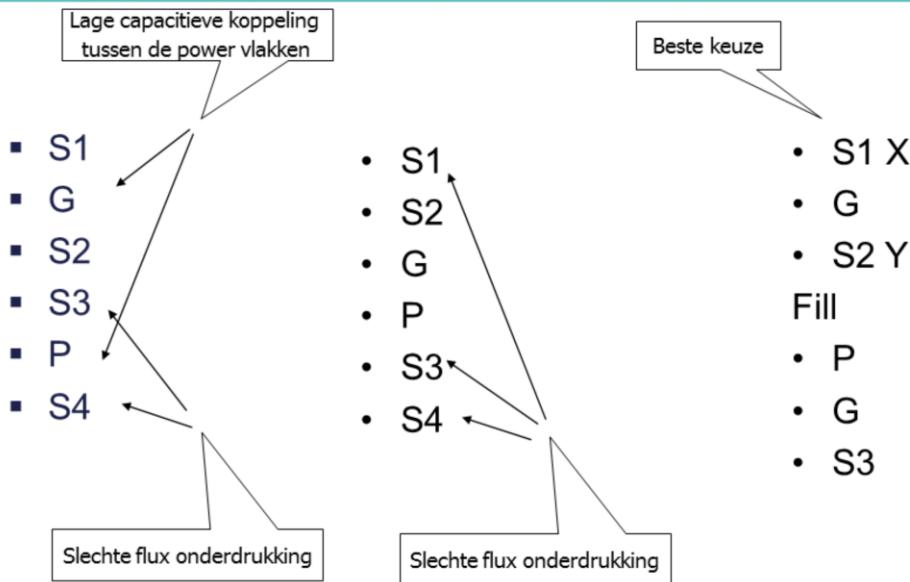
Typical 4 layer PCB

4-layer: type1	
Cu foil	Thickness μ
Prepreg 2125	18
Prepreg 7628	100
Prepreg 7628	200
Core 35 /35	35
Prepreg 7628	550
Prepreg 7628	35
Prepreg 7628	200
Prepreg 7628	200
Prepreg 2125	100
Cu foil	18

1656 \AA



6 lagen PCB lay-out





8 lagen PCB lay-out

- S1
- S2 X
- G
- S3 Y
- S4
- P
- S5
- S6

Beste keuze

- S1 X
 - G
 - S2 Y
- Fill 1
- P
 - G
- Fill 2
- S3 X
 - G
 - S4 Y

Slechte flux onderdrukking



10 Lagen PCB

- S1 X

- G

- S2 Y

Fill 1

- S3

- P

- G

- S4

Fill 2

- S5 X

- G

- S6 Y

Beste keuze

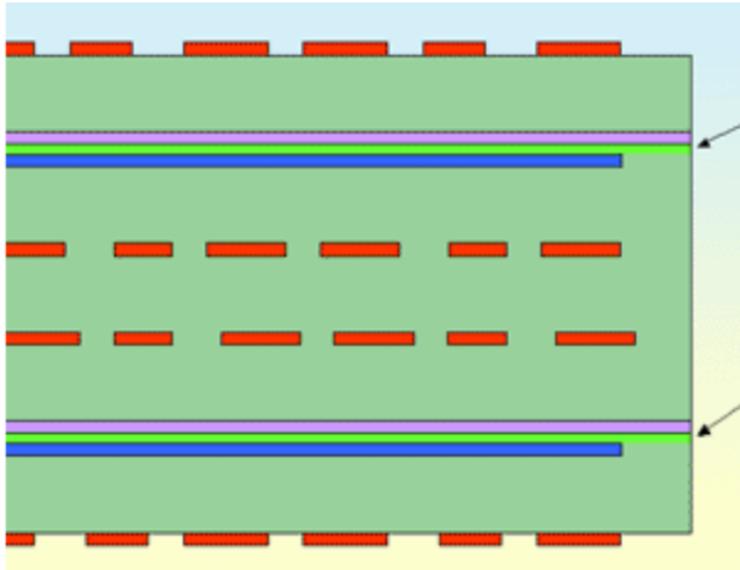


20 H-regel

- Aan de randen van het power vlak hebben we RF stromen, en een deel van de flux ten gevolge van deze stromen wordt uitgezonden als EM straling.
- We kunnen dit voorkomen als we het power vlak kleiner maken als het grondvlak.
- $20 * H$ is een goede maat voor het kleiner maken van het power vlak (H is de afstand tussen grond en power vlak)
- Een power pin mag uitspringen in de verboden zone
- Als we de PCB opsplitsen in partities, geldt de 20 H regel ook voor de verschillende partities



20 H-regel

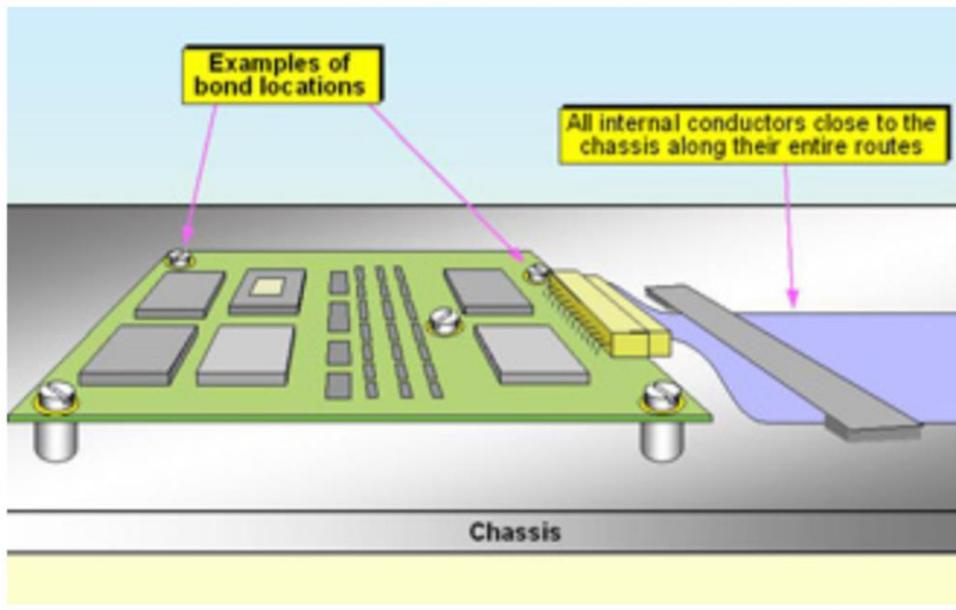


Grond (roze),
isolatie (groen, dikte=H),
en
power (blauw)

Grond (roze)
isolatie (groen, dikte=H),
en
power (blauw)

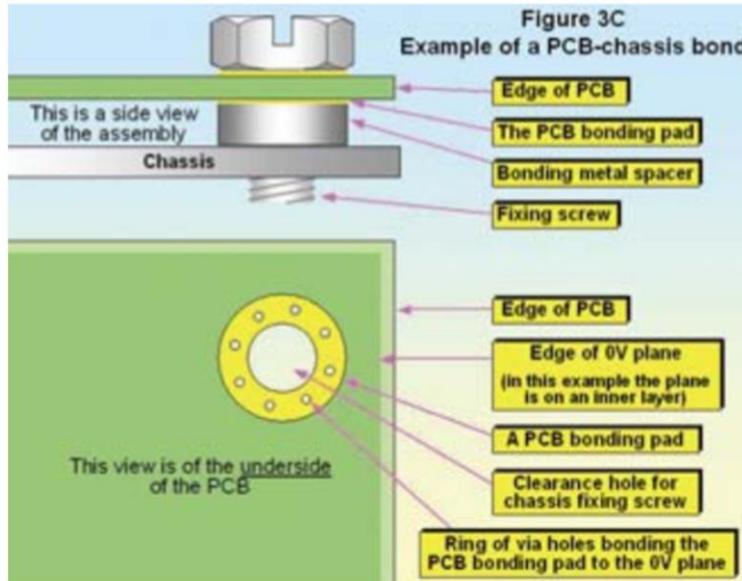


Verbinding met de kast





Verbinding met de kast



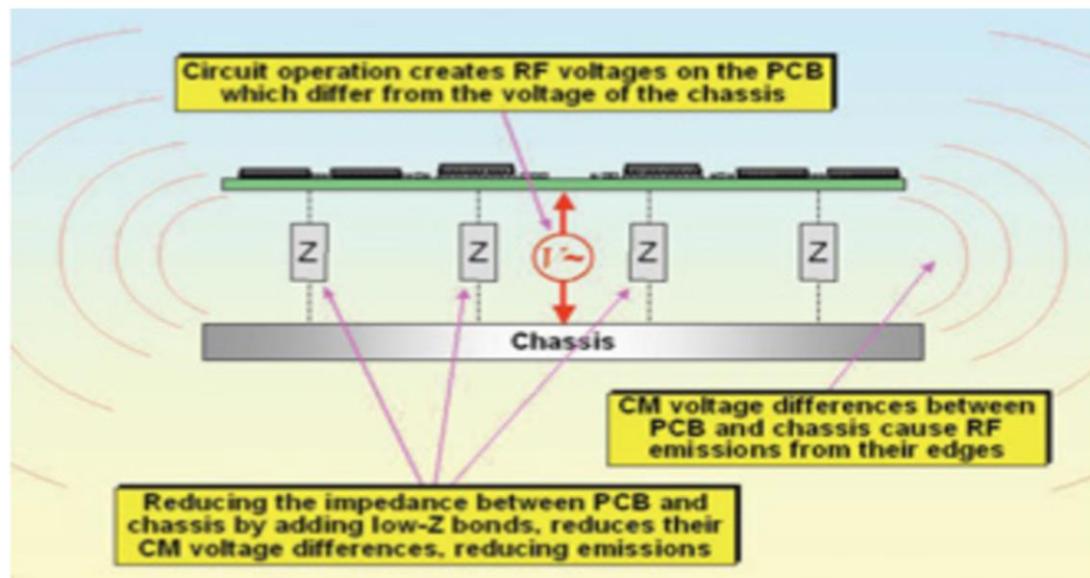


Grounding methodes

- Single point grounding
 - lengte van de verbinding bepaalt de impedantie
 - serie verbinding
 - parallel verbinding
- Meervoudige grounding
 - lagere impedantie naar de grond
 - lussen kunnen ontstaan: de resonantie van een lus moet veel groter zijn dan de maximale frequentie in het circuit
 - Plaats de verbindingen met de kast op minder de $\lambda/20$ uit elkaar



Meervoudige grounding





Bepaling van $\lambda/20$

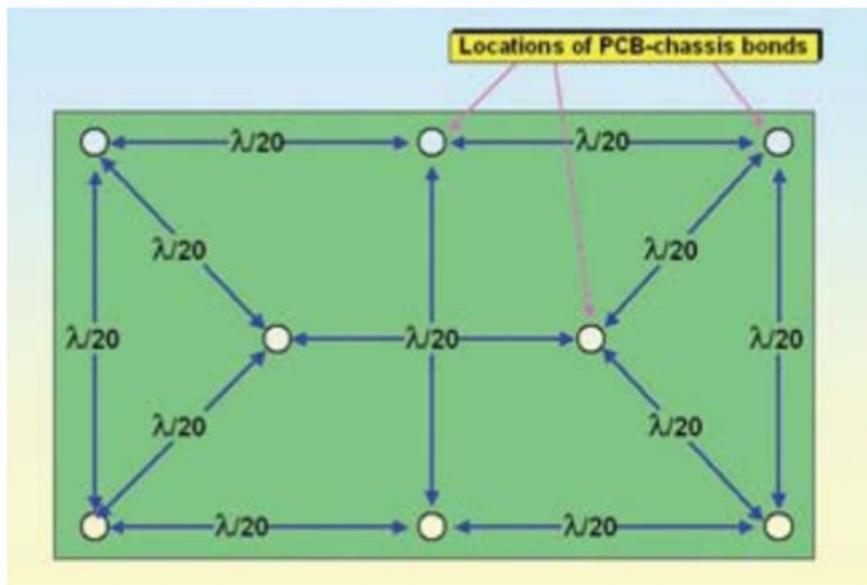
$$\frac{\lambda}{20} = \frac{3 \cdot 10^8}{20f} = \frac{15 \cdot 10^6}{f}$$

Bv: 200 MHz geeft 7.5 cm

f is steeds de hoogste frequentie in het circuit



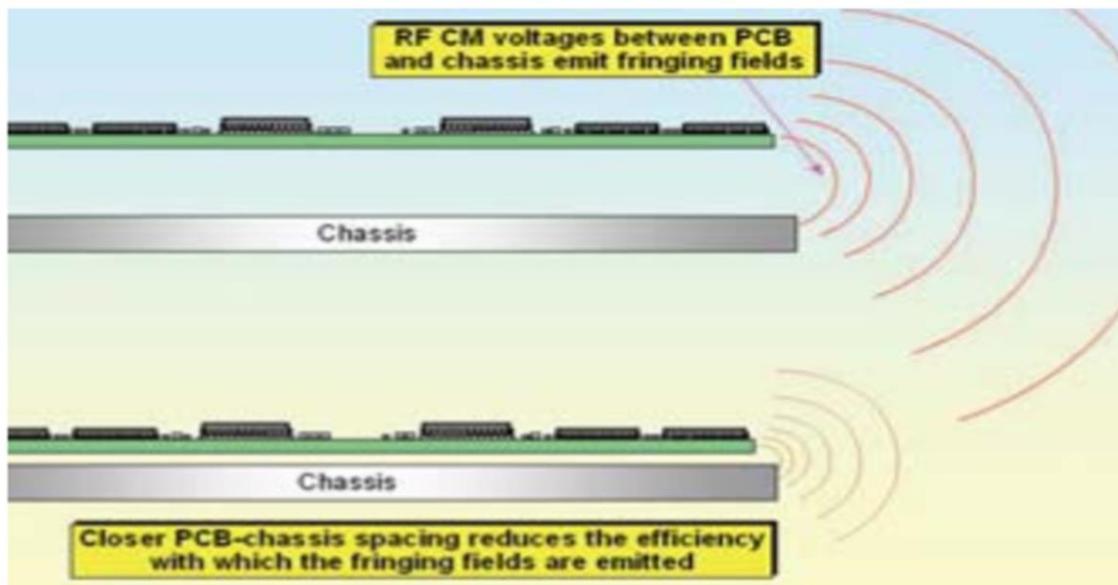
Meervoudige grounding $\lambda/20$ regel



[1] Keith Armstrong, “Audio-Frequency Shield Current Induced Noise is Negligible”, Audio Engineering Society 114th Convention, Amsterdam, March 2003, tutorial session S5 on “Grounding and Shielding”



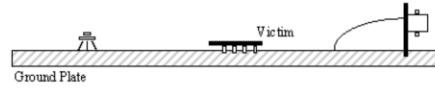
Verklein de afstand PCB kast



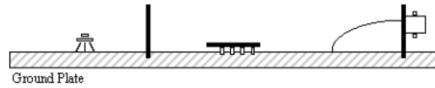


Screening technieken op PCB

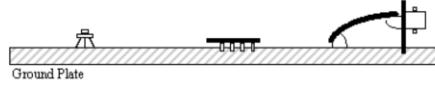
- Zonder scherm



- Met scherm



- Met coax afscherming





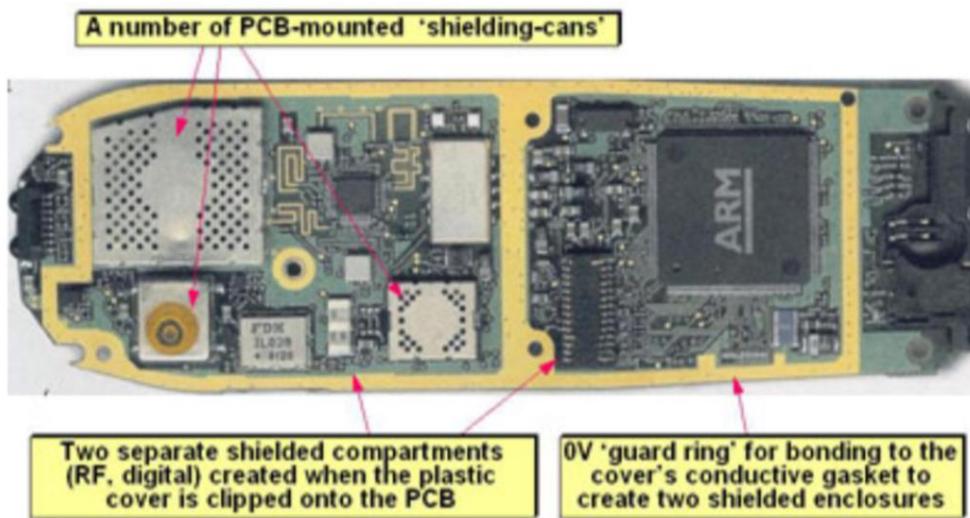
Probleemstelling

- I/O circuits krijgen heel wat stoerbronnen te verwerken, waarvan de aard in grote mate verschilt
- Derhalve moet
 - elke I/O regio fysisch gescheiden zijn van het hoogfrequent digitaal PCB deel
 - er gefilterd worden op zowel binnengkomende als buitenstaande signalen
 - de aarding van de connectoren goed verzorgd worden
 - zeker niet met een kabel in de vorm van een lus (varkensstaart)



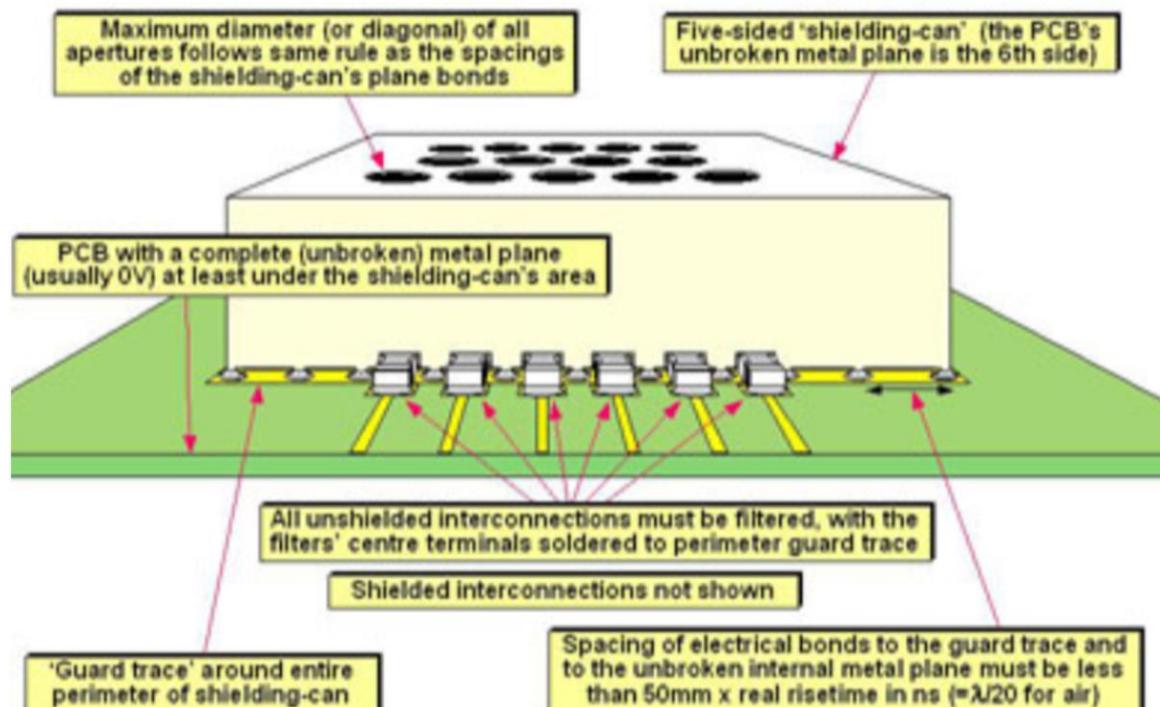
Shielding: voorbeeld

Digitaal en RF worden gescheiden door het deksel
Verschillende RF componenten hebben een scherm



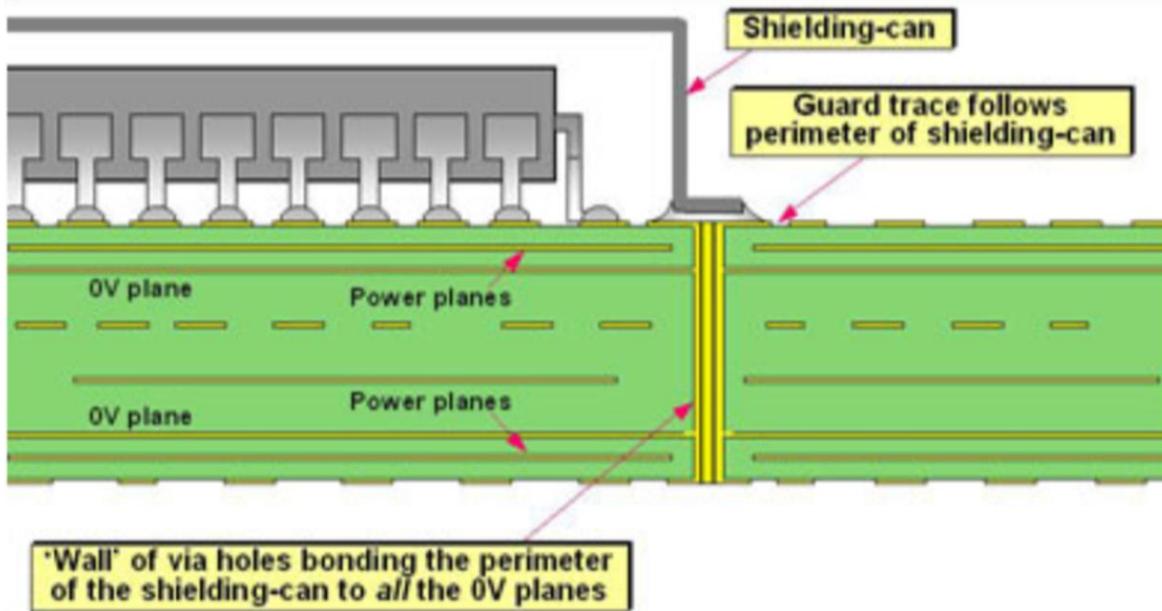
KU LEUVEN

56



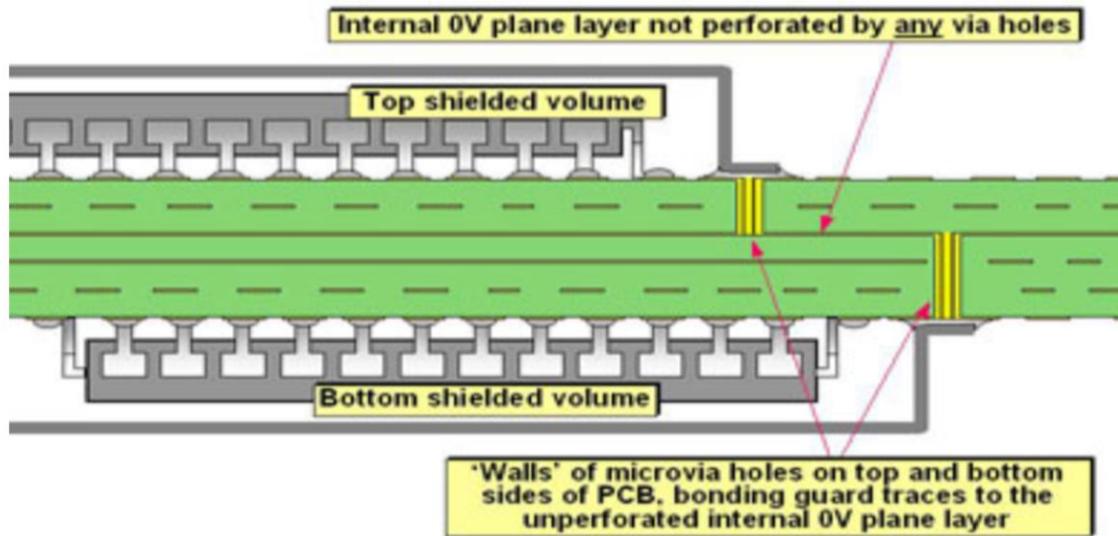


Verbinding scherm-grond





Verbinding scherm-grond





Partitionering

- Functionele subsystemen
 - verschillende I/O systemen moeten in duidelijk gescheiden (geïsoleerde) gebieden geplaatst worden
- Rustige gebieden
 - vb: op de digitale power zit hoogfrequent schakelruis; deze mag de voeding van een analoge IC niet beïnvloeden
- Bouwen van een gril (fence)
 - een set van baren die verbonden zijn met het grondvlak.
 - Afstand tussen de baren : $\lambda/20$
 - zorgt ervoor dat straling niet kan overgaan van een deel van het circuit naar een ander deel van het circuit.
 - Voorzie dit op voorhand, achteraf is de verbinding met het grondvlak moeilijk



Graven van grachten

- Een partitie is vergelijkbaar met een kasteel waarrond overal een gracht ligt
- Een gracht wordt gevormd door de afwezigheid van koper op alle vlakken
- Signalen die niets te maken hebben in de partitie komen er ook niet binnen

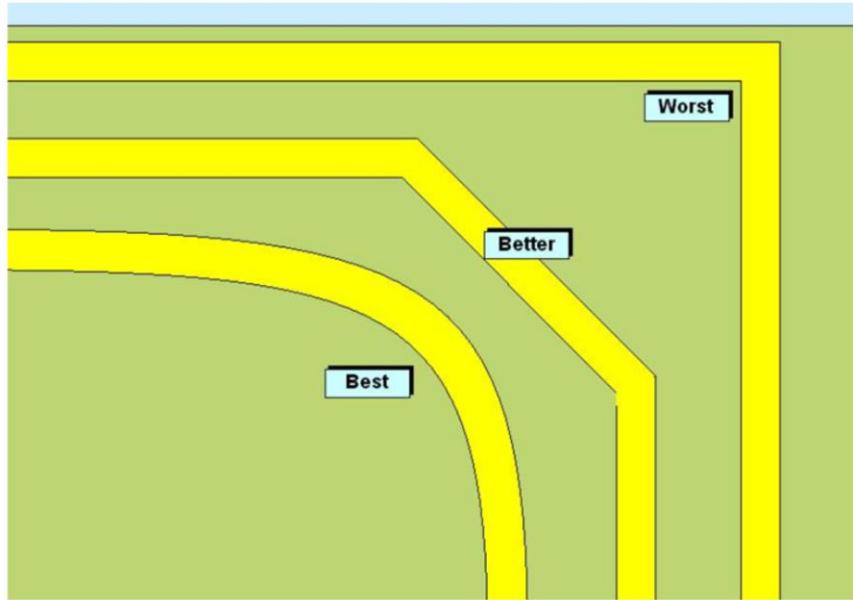


Binnenkomen op het eiland

- Isolatie transformer of opto-isolator: 100 % isolatie behalve
 - grond verbinding
 - eventueel power (langs inductantie)
 - eventueel ontkoppel capaciteit
- Brug over de gracht
 - Op slechts één plaats kunnen signalen, power en grond binnen in de partitie
 - Voorzie extra verbindingen met het chassis aan beide zijden van de brug als multipoint grounding verkozen is



Hoeken aan traces



universiteit
hasselt

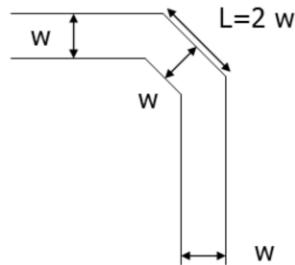
KU LEUVEN

63



Hoeken aan traces

- Een hoek van 90° is af te raden op een PCB
 - dit levert lokaal een veel grotere capaciteit op
 - beneden de 10 GHz : kap de hoeken af met stukje 45°
 - boven de 10 GHz: zorg voor ronde hoeken



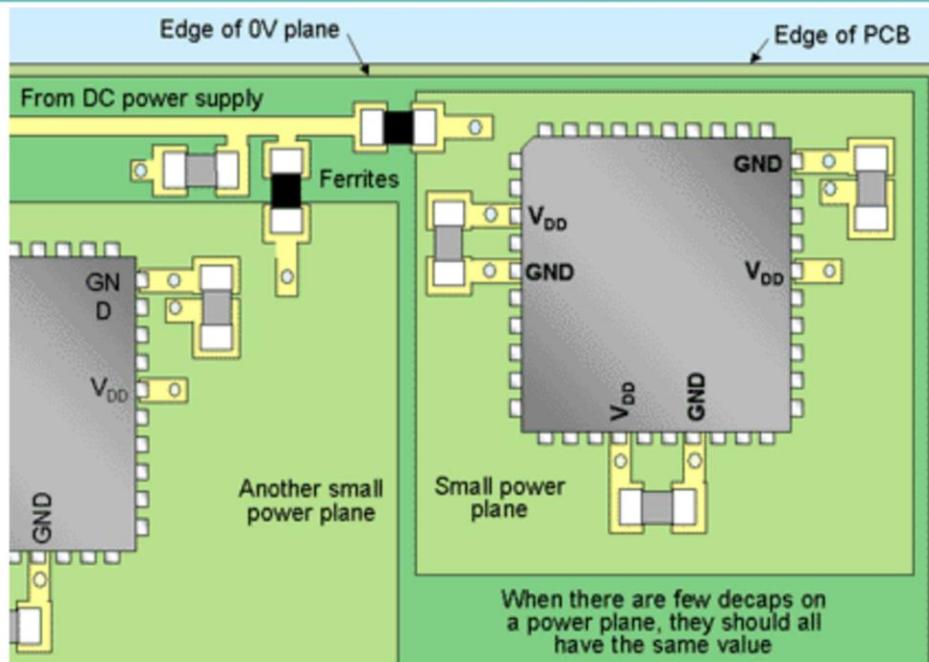


selectie van ferieten

- Wordt gebruikt om hoogfrequent componenten uit een signaal weg te filteren.
- Hoe hoger de permeabiliteit, hoe lager de frequentie
- Hoe hoger de DC stroom, hoe minder de effectiviteit
 - een luchtspleet biedt hier de oplossing



ferieten



KU LEUVEN

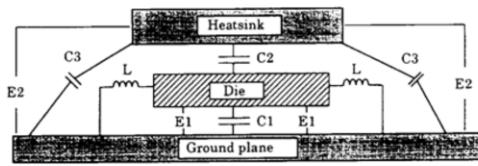
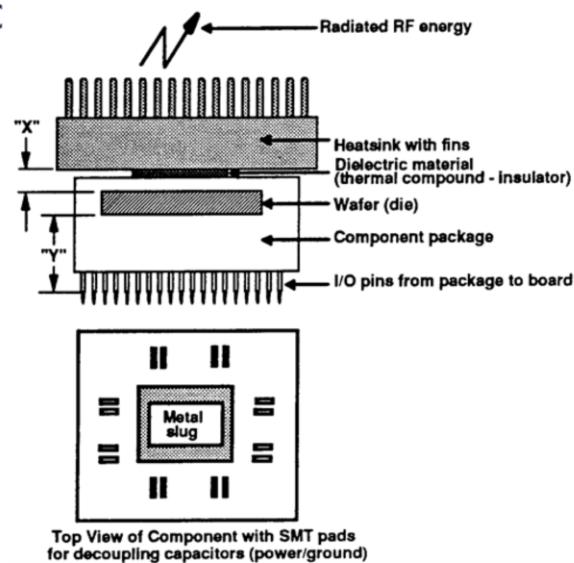
66



Het gronden van een heatsink

Een heatsink boven op een IC kan een antenne zijn voor hoogfrequent signalen in de IC

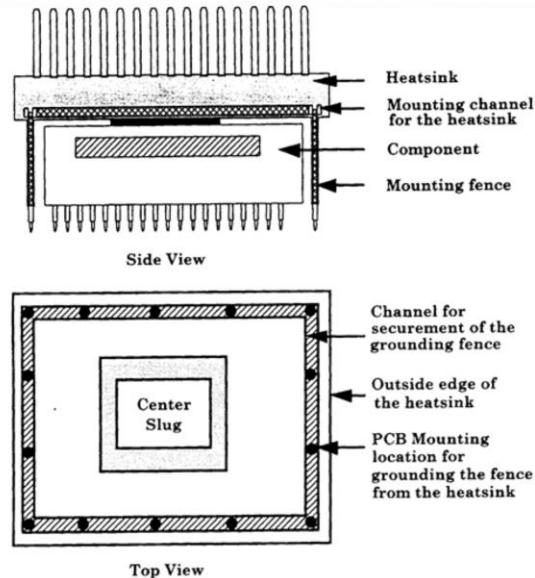
- De Heatsink moet zo dicht mogelijk bij de IC aangebracht zijn om thermische redenen => grote capacitieve koppeling
- De IC en heatsink staan hoog boven het grondvlak => veel kleinere capaciteiten.





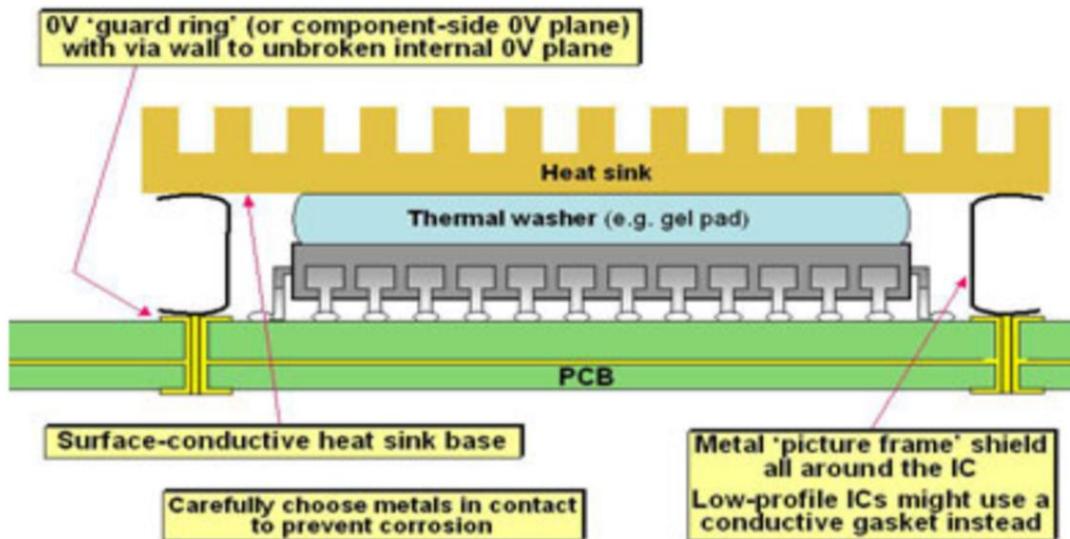
Het gronden van een heatsink

- Een goede oplossing is de heatsink te verbinden met het grondvlak door baren (een gril)
- De via's naar het grondvlak moeten op voorhand voorzien zijn





Het gronden van een heatsink





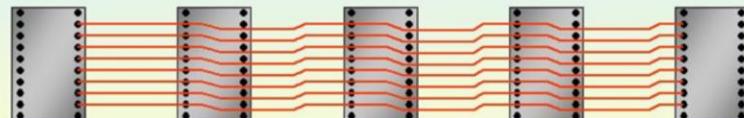
Capacitive belasting

(line terminating resistors not shown)

Z_0 and V both vary along the trace due to variable capacitive loading



Regular load spacing can maintain a constant Z_0 and V along the trace, as long as signal rise/fall times are not too short



Varying the trace width to compensate for capacitive loading can maintain constant Z_0 and V along the trace (for any rise/fall times)



universiteit
hasselt

KU LEUVEN

70