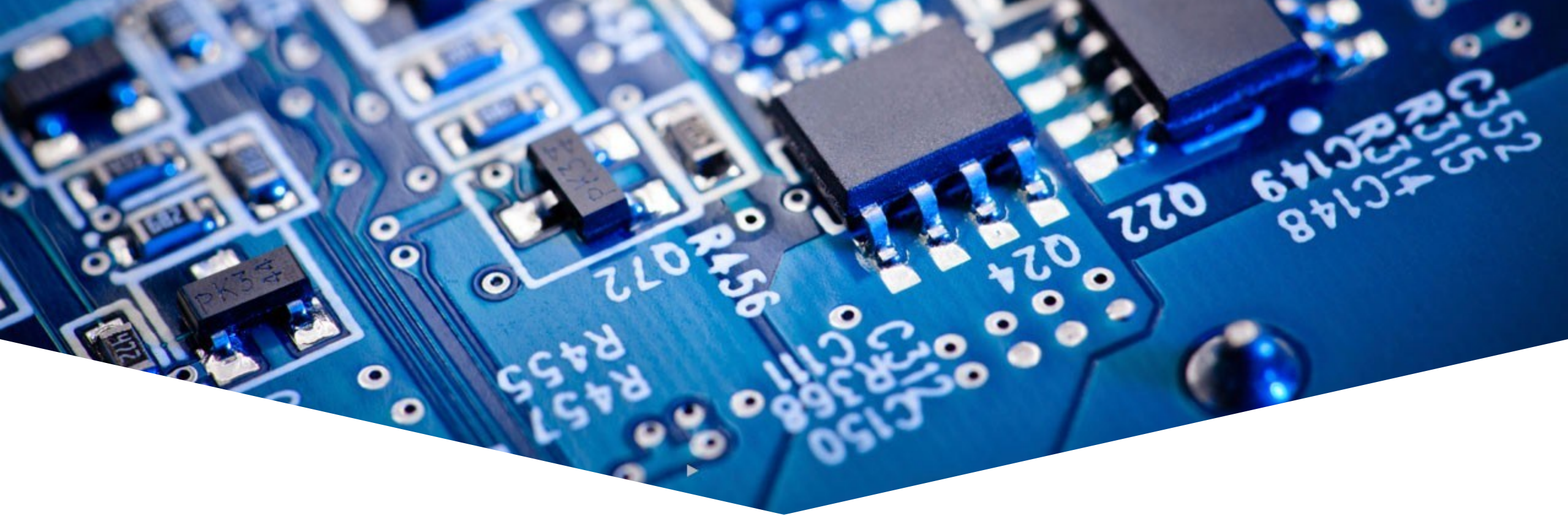


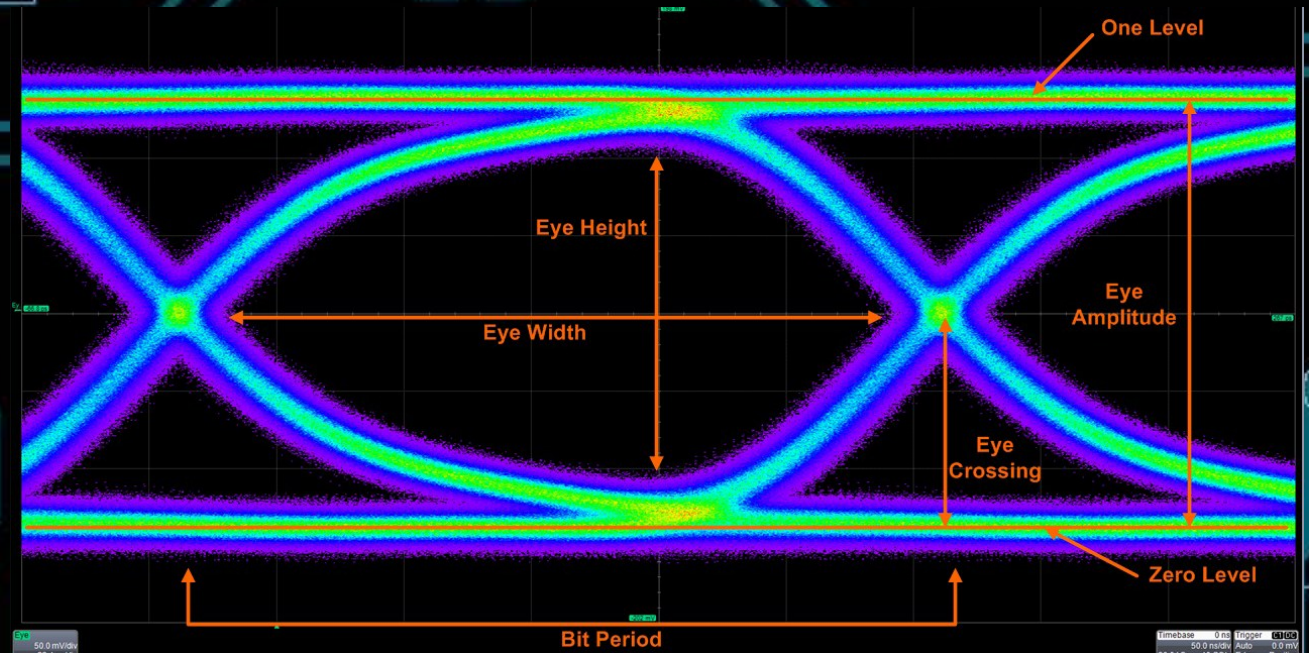


ANE21: ANALOGE ELEKTRONICA 2

WEEK 1: HIGH SPEED

Hoogfrequent PCB

(Week 3.1-3.3,4.1)



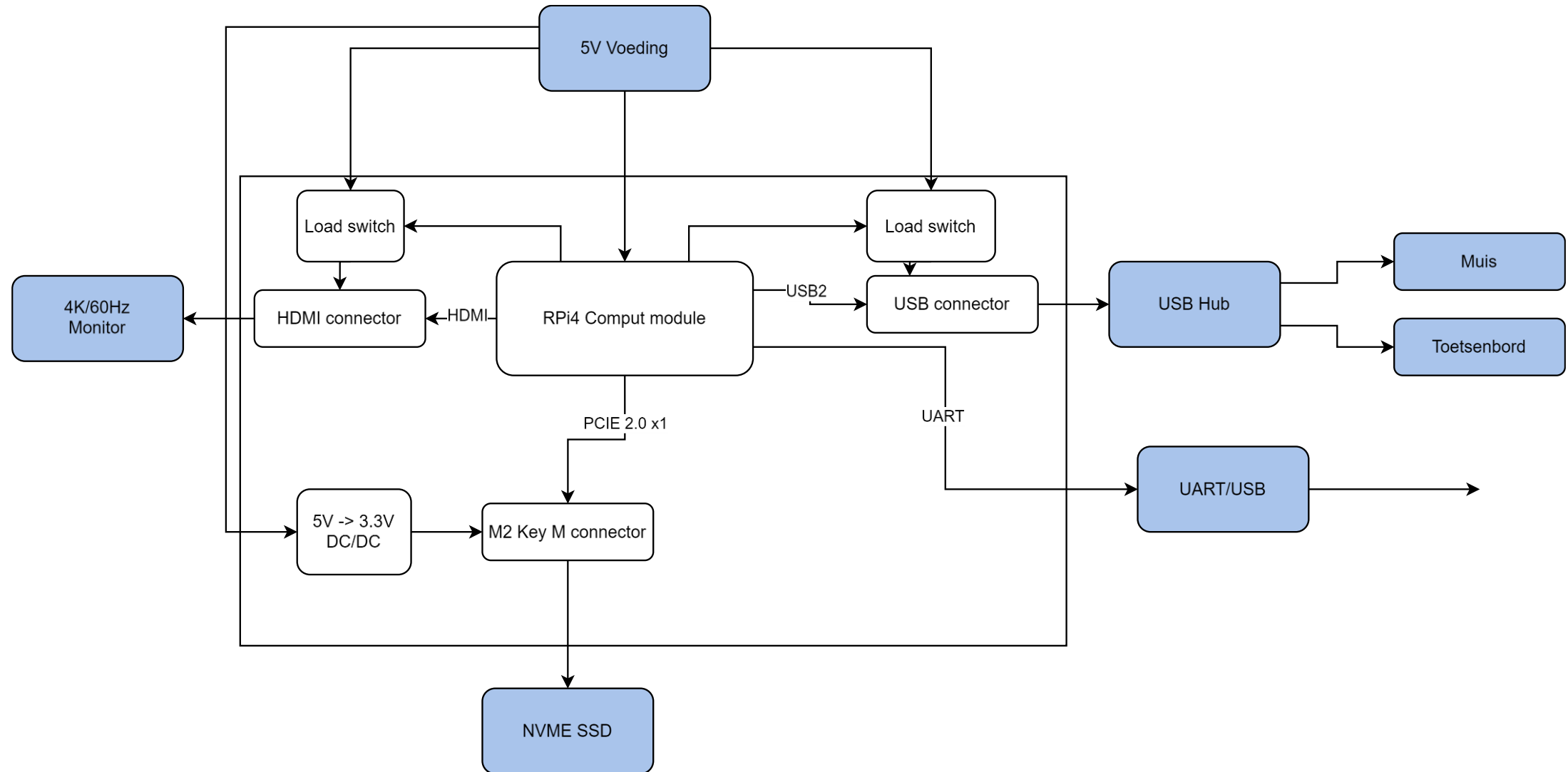
Maak een CM4 moederbord

- Demo

Minimale Eisen:

- 1xHDMI, 1xNVME, 1xUSB2
- UART, 3V3 DC/DC

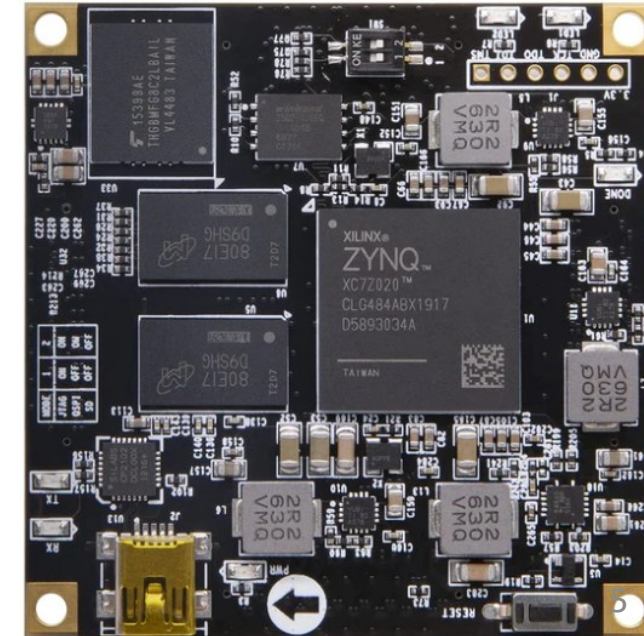
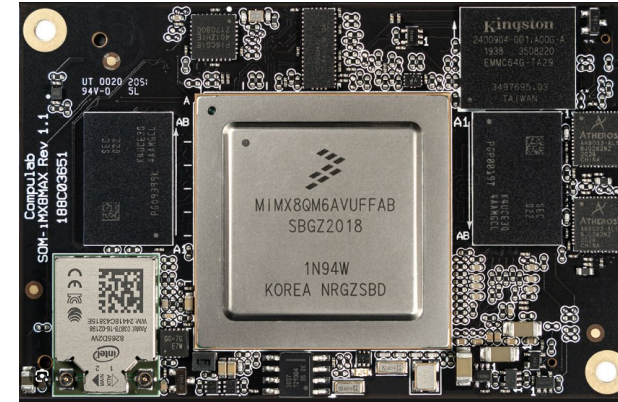
Labopdracht 1 beschrijving, rubric op brightspace



Wat is een SoC en SoM?

ANALOGIE ELEKTRONICA

- Een System on Chip
 - Bevat de meest benodigde onderdelen van een systeem op 1 chip.
 - Vaak beperkt (ingebouwd) geheugen
 - Complexe omliggende schakeling met PMIC
- Een System on Module
 - Bevat de essentiële componenten
 - SoC, geheugen, PMIC, etc.
 - Veel makkelijker toepasbaar!

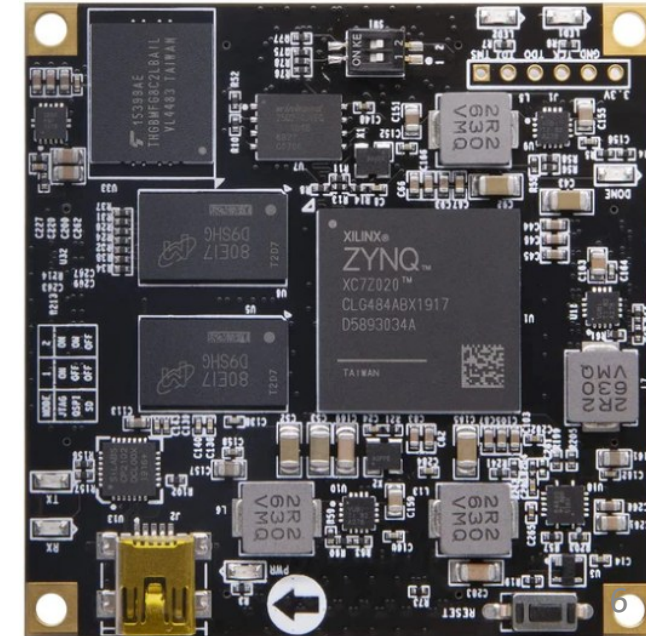
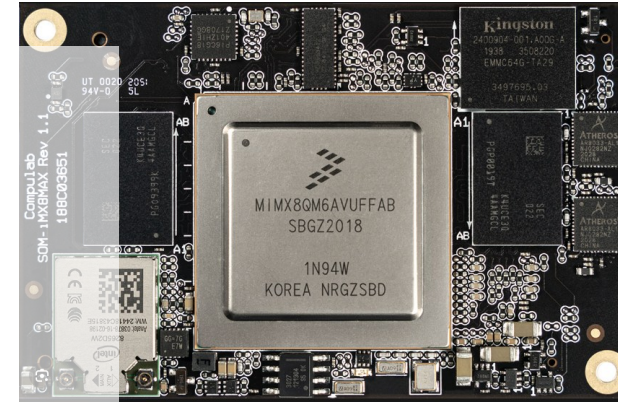


Wat is een SoC en SoM?

ANALOGIE ELEKTRONICA

Wordt steeds meer toegepast:

- Vaak Linux of ander OS
- netwerk/internet communicatie
 - Remote verbindingen
- Display
- Microcontroller met RTOS
- Koppeling microcontroller met SoM.



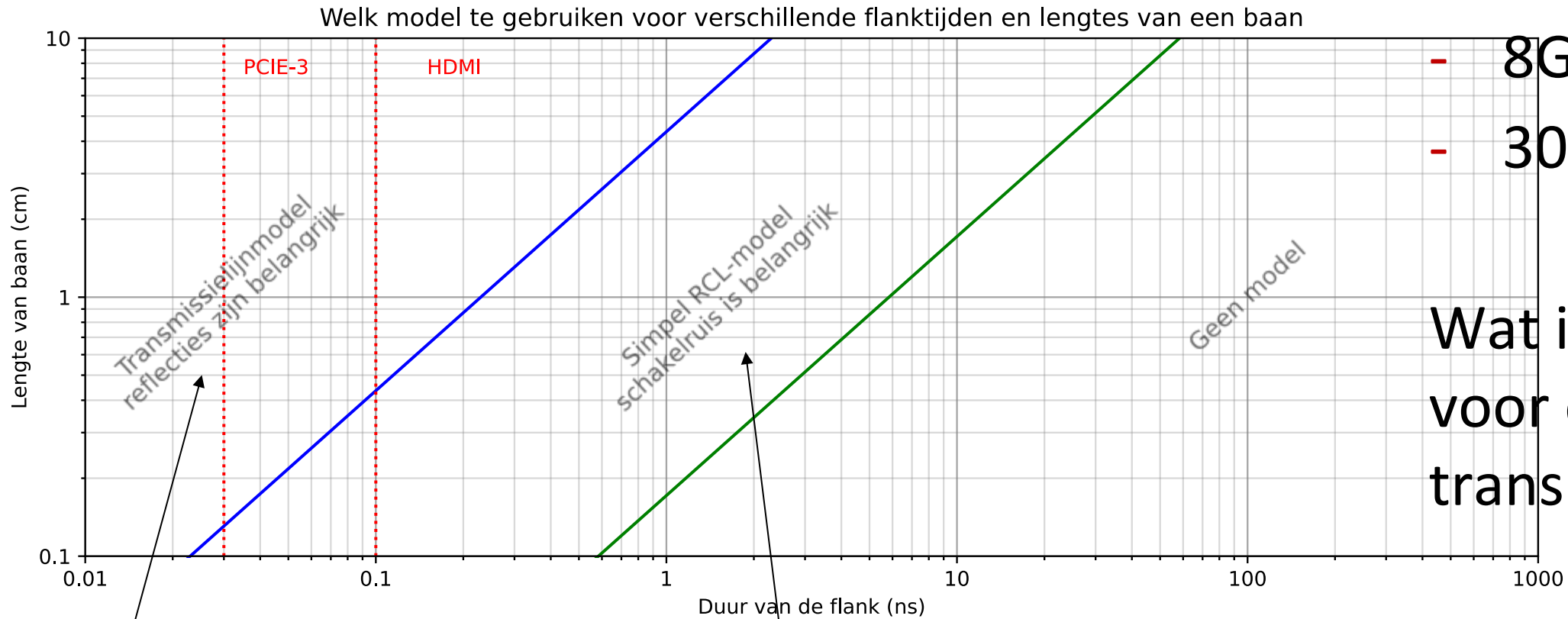
Benodigde kennis

ANALOGIE ELEKTRONICA

Hoe verbind je HDMI, DisplayPort, PCIE, Ethernet, etc...

Dit zijn allemaal hoogfrequente verbindingen...

Een simpel baantje is niet voldoende?



PCIE3:

- 8GT/s
- 30ps flanken

Wat is belangrijk voor een transmissielijn?

Vandaag

Volgende week

Impedantie Matching

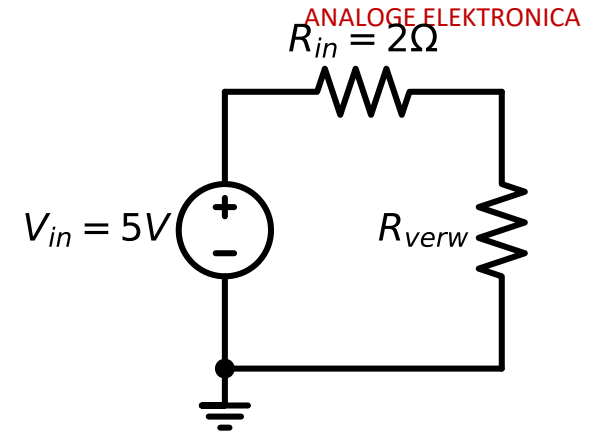
Stel we maken een handwarmer
Hoe krijgen we het maximale vermogen in
 $R_{verwarmer}$?

$$V_{R_{verw}} = \frac{V_{bron} R_{verw}}{R_{in} + R_{verw}}$$

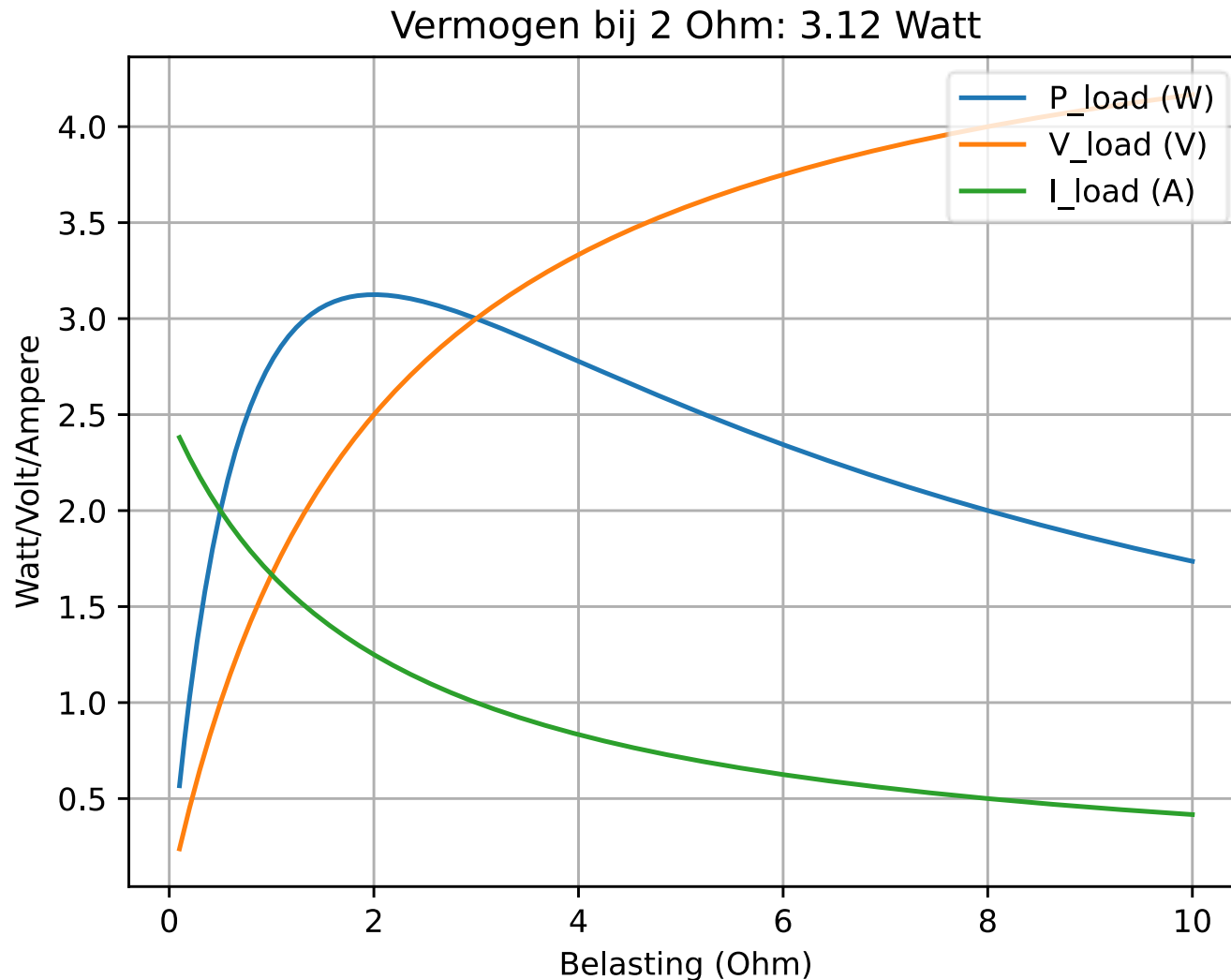
$$P_{R_{verw}} = \frac{V_{R_{verw}}^2}{R_{verw}} = \frac{R_{verw}}{(R_{in} + R_{verw})^2} V_{bron}^2$$

$$\frac{dP_R}{dR_{verw}} = \frac{[V_{bron}^2 (R_{in} + R_{verw})^2 - V_{bron}^2 R_{verw} 2(R_{in} + R_{verw})]}{(R_{in} + R_{verw})^2} = 0$$

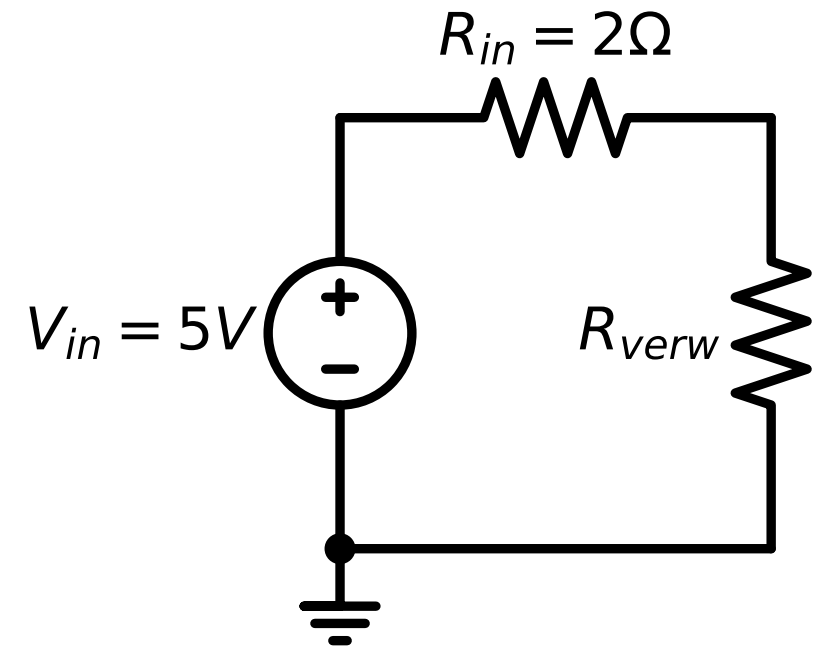
$$R_{verw}^2 = R_{in}^2 \Rightarrow R_{verw} = R_{in}$$



Impedantie Matching



$$\frac{R_{verw}}{(R_{in} + R_{verw})^2} V_{bron}^2$$



Impedantie Matching

Voor DC is de maximale vermogensoverdracht wanneer de weerstanden (impedanties) gelijk zijn.

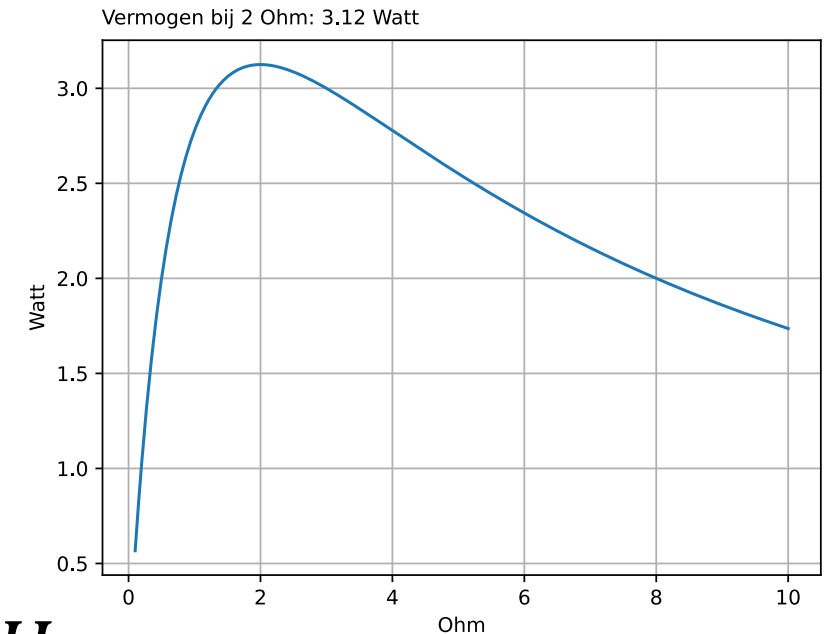
Bij AC hetzelfde... bijna.

$$Z_{bron} = \bar{Z}_{load} \text{ dus}$$

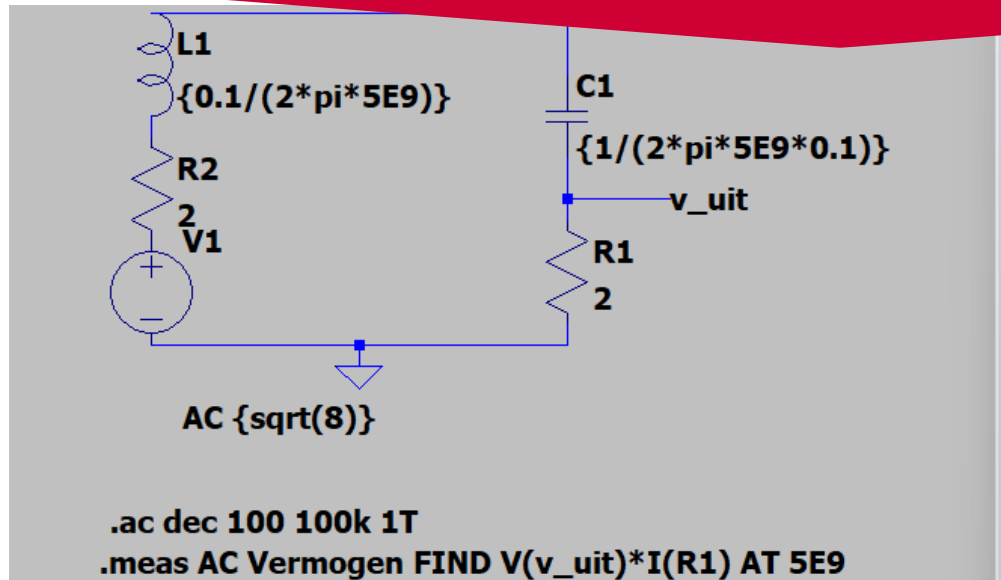
$$R_{bron} = R_{load} \text{ en } X_{bron} = -X_{load}$$

Stel bron heeft impedantie $2 + 0.1j$ op $5GHz$

Met welke Z_{load} krijg je de beste overdracht?



Impedantie Matching



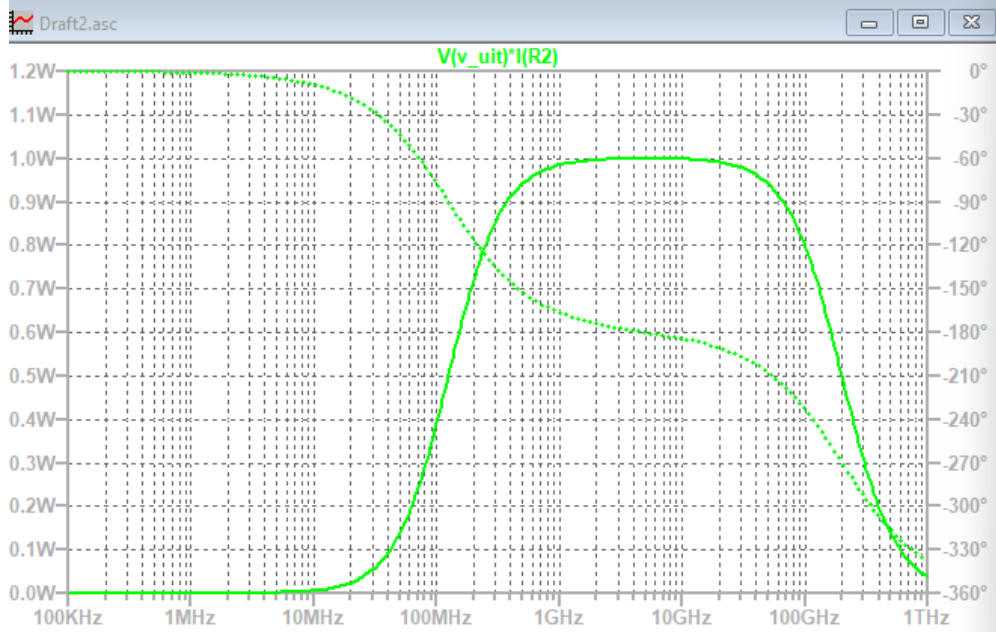
```
load count: 12
tnom = 27
temp = 27
method = modified trap
.OP point found by inspection.

vermogen: v(v_uit)*i(r1)=(-0.00434562dB,0.00014156°) at 5e+09

Total elapsed time: 0.087 seconds.
```

Waarom de componentwaarden?

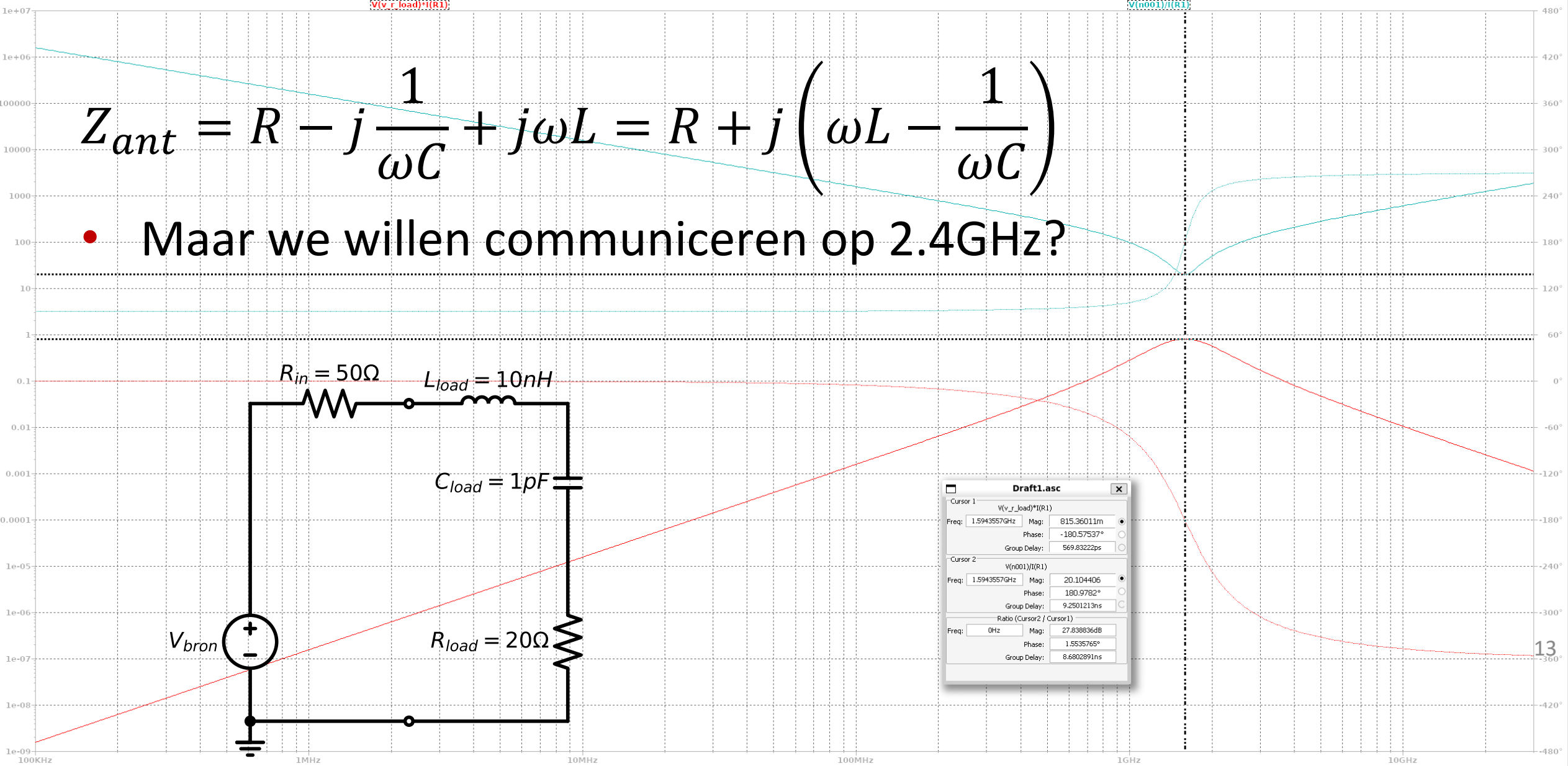
- Spoel
- Condensator
- Voeding



Voorbeeld antennemodel

$$Z_{ant} = R - j \frac{1}{\omega C} + j \omega L = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

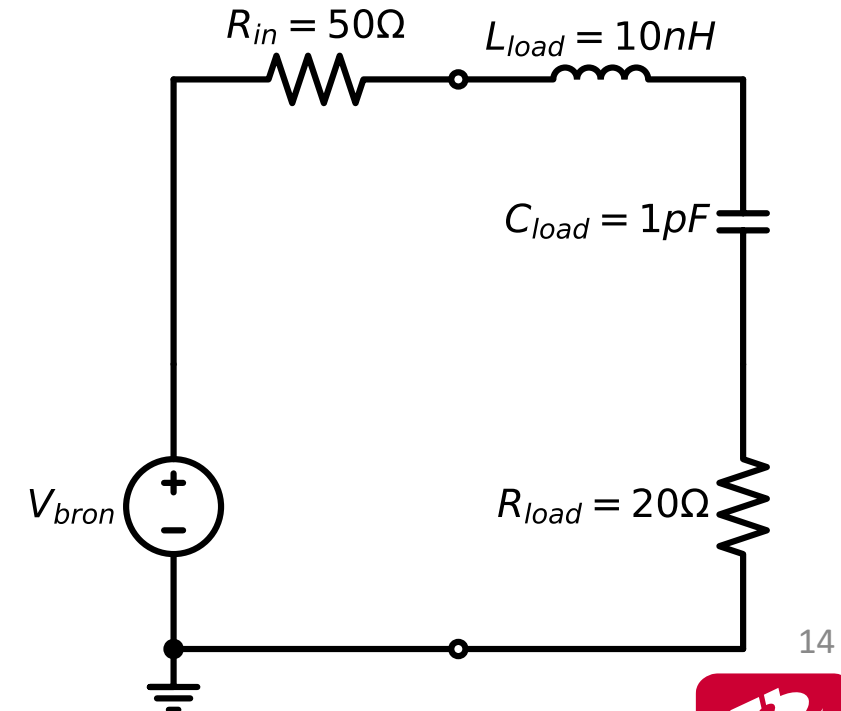
- Maar we willen communiceren op 2.4GHz?



Voorbeeld antenmodel

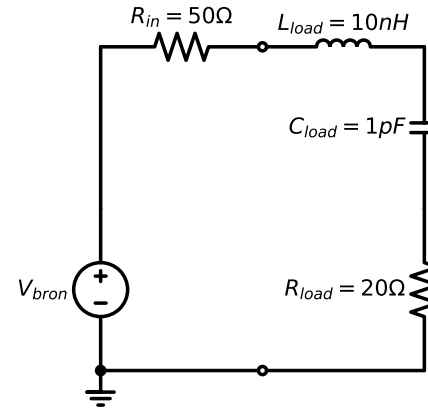
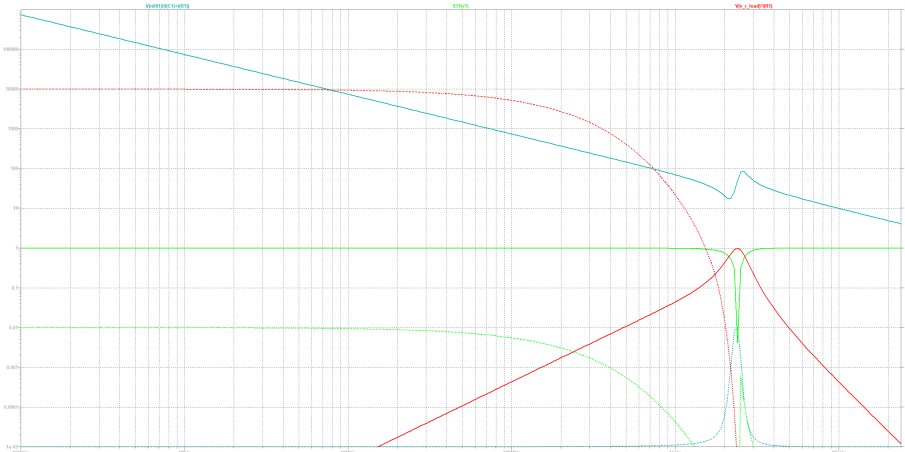
$$Z_{ant} = R - j\frac{1}{\omega C} + j\omega L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

- Bij bijv. $2.4GHz$ is $Z_{Load} = 20 + j84.5\Omega$
- Compenseren met L en C (zonder verlies)
- [RF Impedance Matching Calculator | Design Center | Analog Devices](#)
- Resultaat...



Voorbeeld antennemodel

- Resultaat...

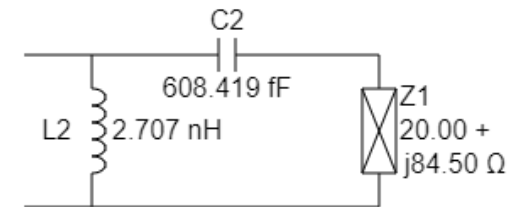
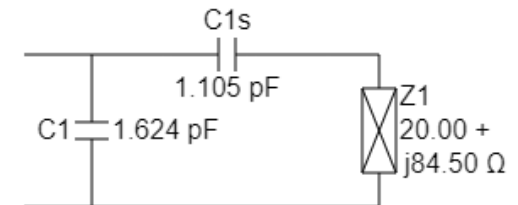


Your Inputs

Z_0 : 50 Ω
 F_0 : 2400 MHz
 Output: Single-Ended
 Input: Series Complex Load
 R_L : 20 Ω
 X_L : 84.5 Ω

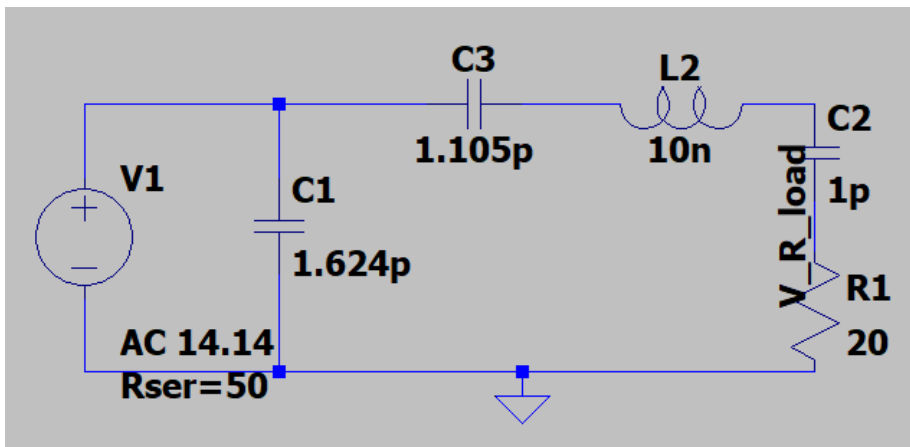
Outputs

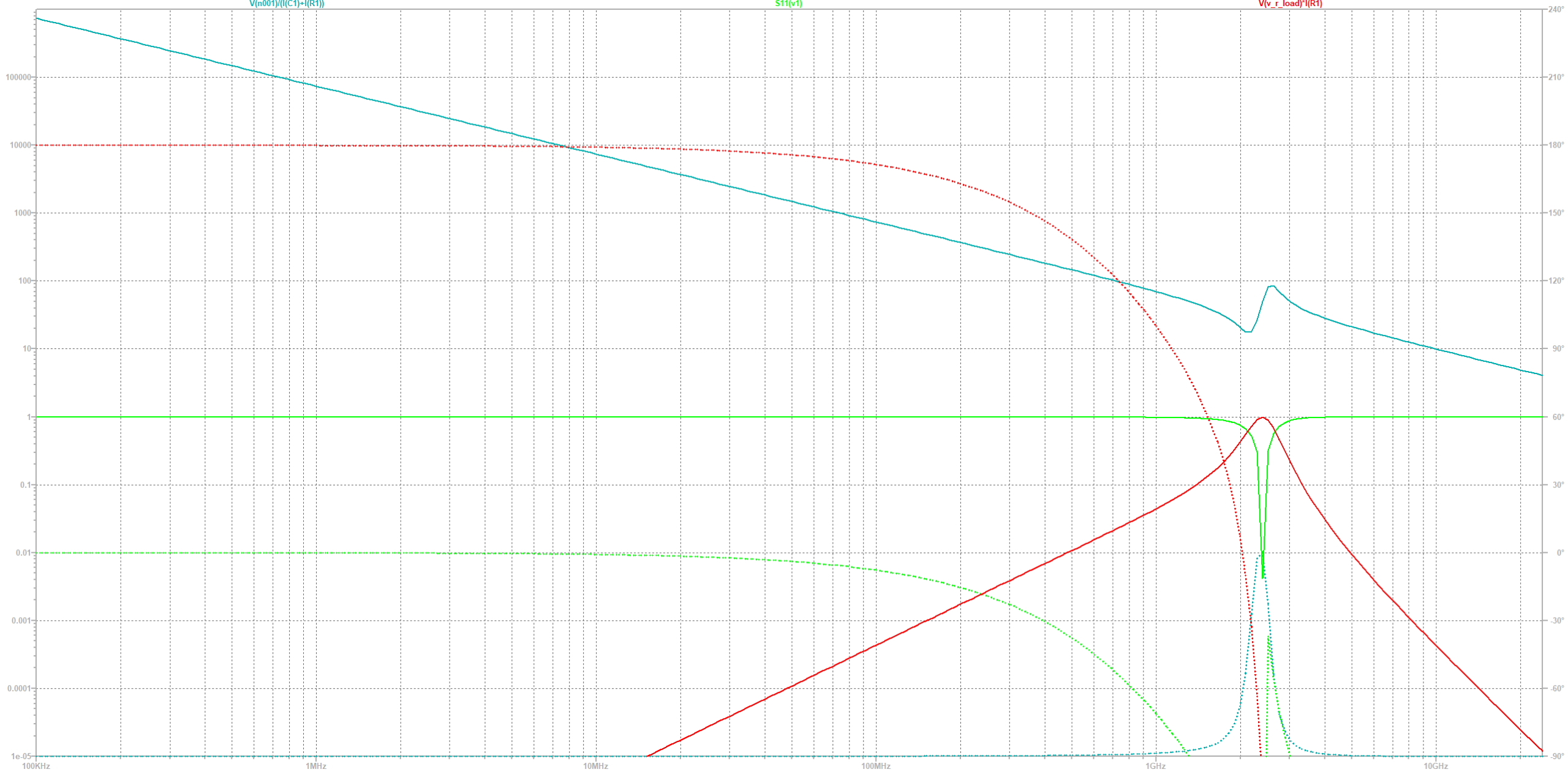
$C1_s$: 1.105 pF
 $C1$: 1.624 pF
 $Z1$: 20.00 + j84.50 Ω
 $C2$: 608.419 fF
 $L2$: 2.707 nH



$$\frac{1}{(i \times 2 \times \pi \times (2.4 \times 10^9) \times (1.105 \times 10^{-12}))} \approx -60.013 \ 176 \ 13i$$

$$\frac{((20 + (24.5 \times i)) \times (1 / (i \times 2 \times \pi \times (2.4 \times 10^9) \times (1.624 \times 10^{-12}))))}{((20 + (24.5 \times i)) + (1 / (i \times 2 \times \pi \times (2.4 \times 10^9) \times (1.624 \times 10^{-12}))))} \approx 50.012 \ 497 \ 43 + 0.011 \ 339 \ 360 \ 98i$$

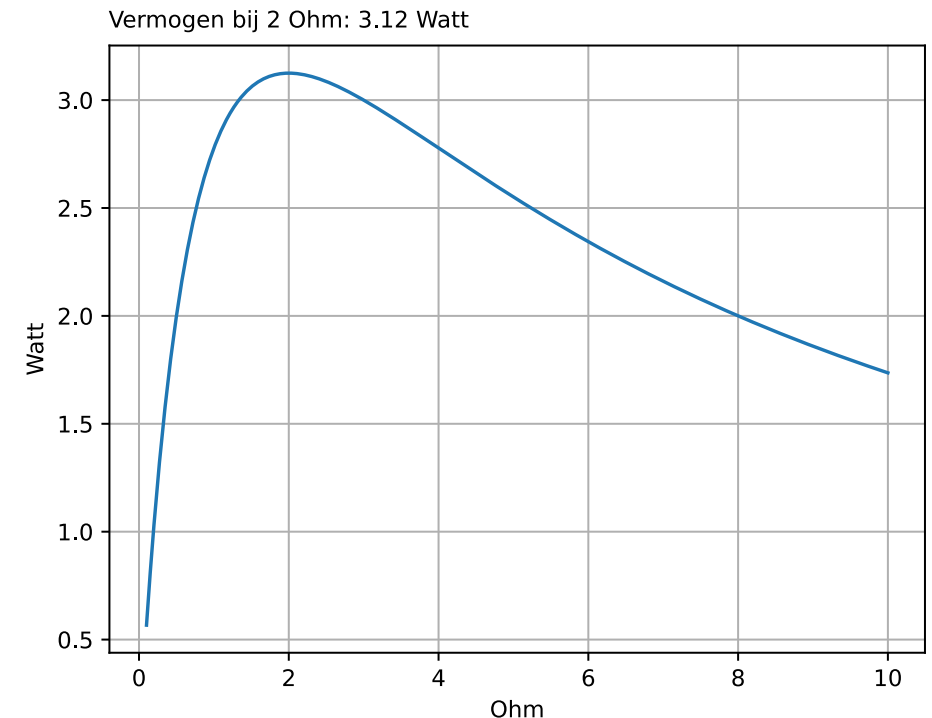




Impedantie Matching

Waarom?

- Beste vermogensoverdracht
- Al het vermogen wordt geabsorbeerd
 - Geen reflecties komen terug



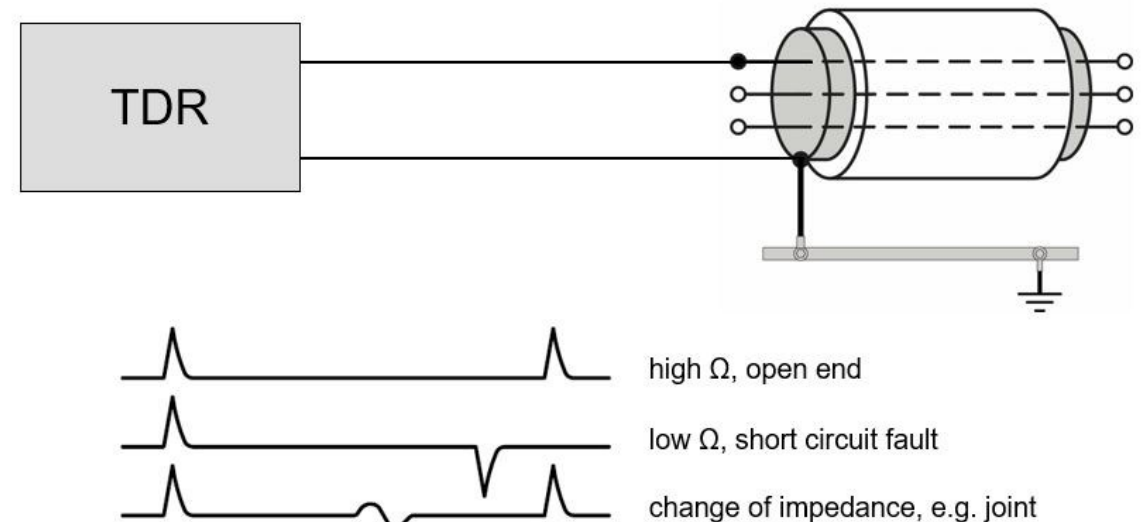
Snelle bussen

- HDMI gebruikt $100\Omega \pm 5\%$
- PCIE 2.0 gebruikt $70\Omega - 100\Omega$ (CM4 wilt 90)
- USB4 gen3 (PCIE 3/4) $85\Omega \pm 5\%$

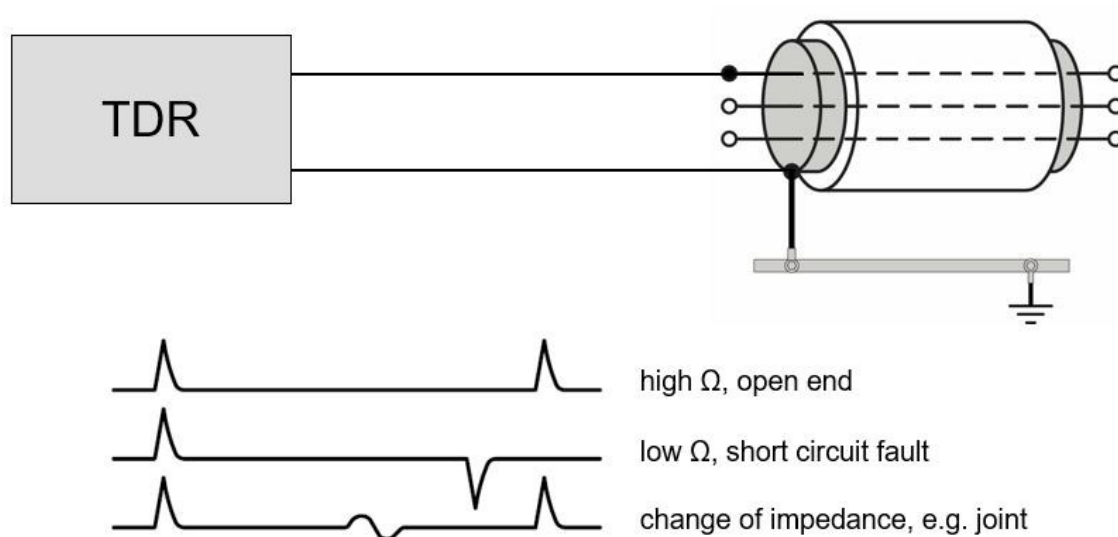
2.2 Differential Impedance Requirement

The plug connector impedance target is specified to minimize reflection from the plug. The differential impedance of a plug connector should be within $85\Omega \pm 9\Omega$, as seen from a 40 ps (20% – 80%) rise time. The impedance profile of a plug connector should fall within the limits shown in Figure 2-5.

- Het afstemmen van de impedanties is belangrijk voor de vermogensoverdracht. Maar hoe zit het met reflecties?
- Time Domain Reflectometry
 - <https://youtu.be/DovunOxly1k?si=gSv6xoDvyMvS84ZW&t=206>
- Wat is de propagatiesnelheid?

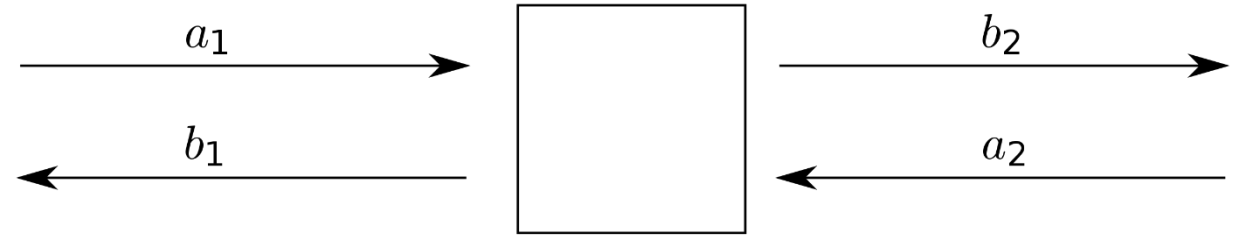


- Wat zou er gebeuren met een sinus?
 - <https://youtu.be/DovunOxIY1k?si=aENGUx-kWD8DBBIm&t=434>
- Wat met een blokgolf?
 - Lab!



S-Parameters en VSWR

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$



$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2$$

s_{11} is een complex getal die aangeeft welke fase en amplitude de reflectie heeft bij de ingang. (frequentieafhankelijk)

s_{21} is de spanningsversterking

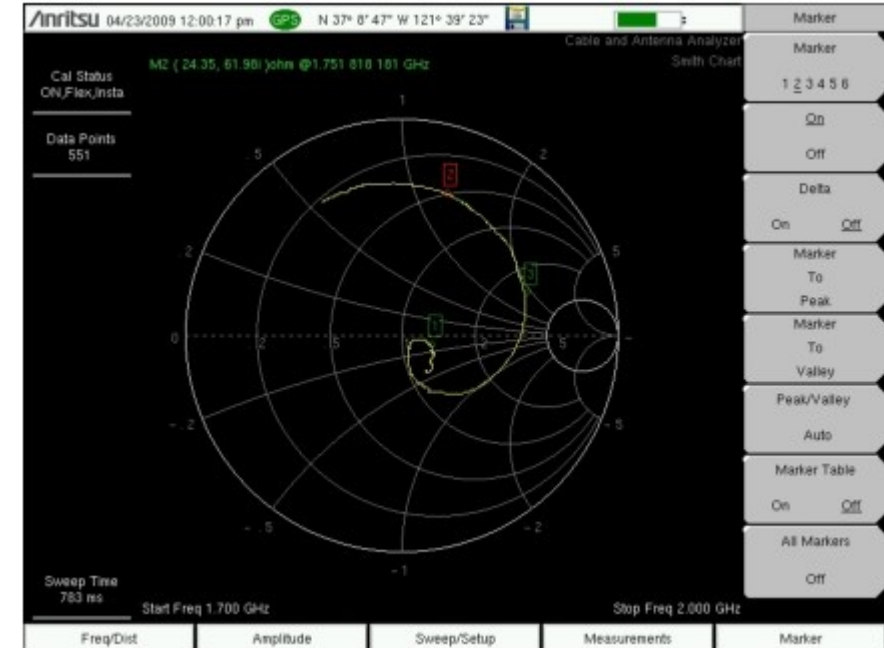
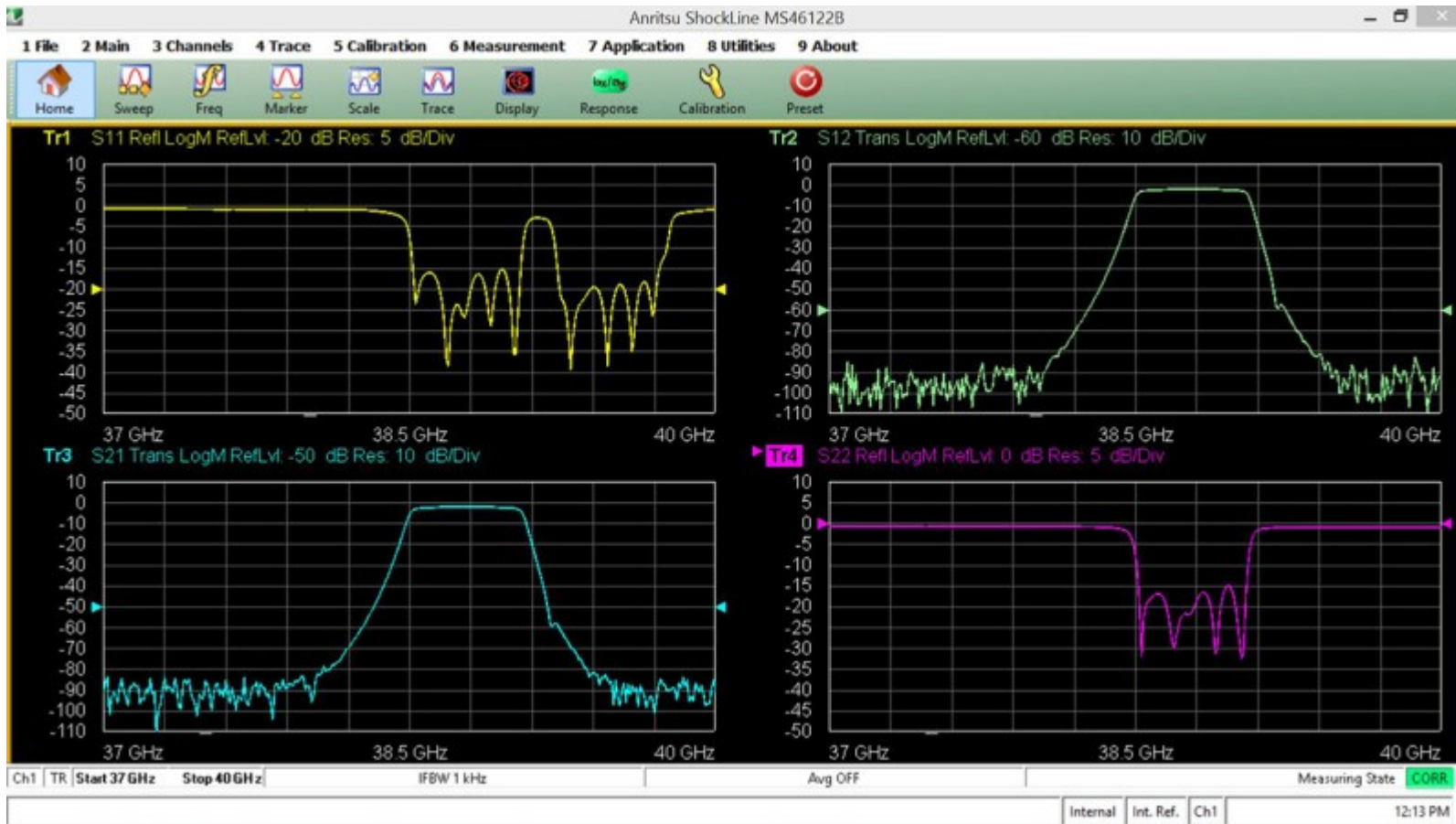
s_{12} is de inverse spanningsversterking

s_{22} is de reflectie van de uitgang (a_2)

Vector Network Analyzer

ANALOGIE ELEKTRONICA

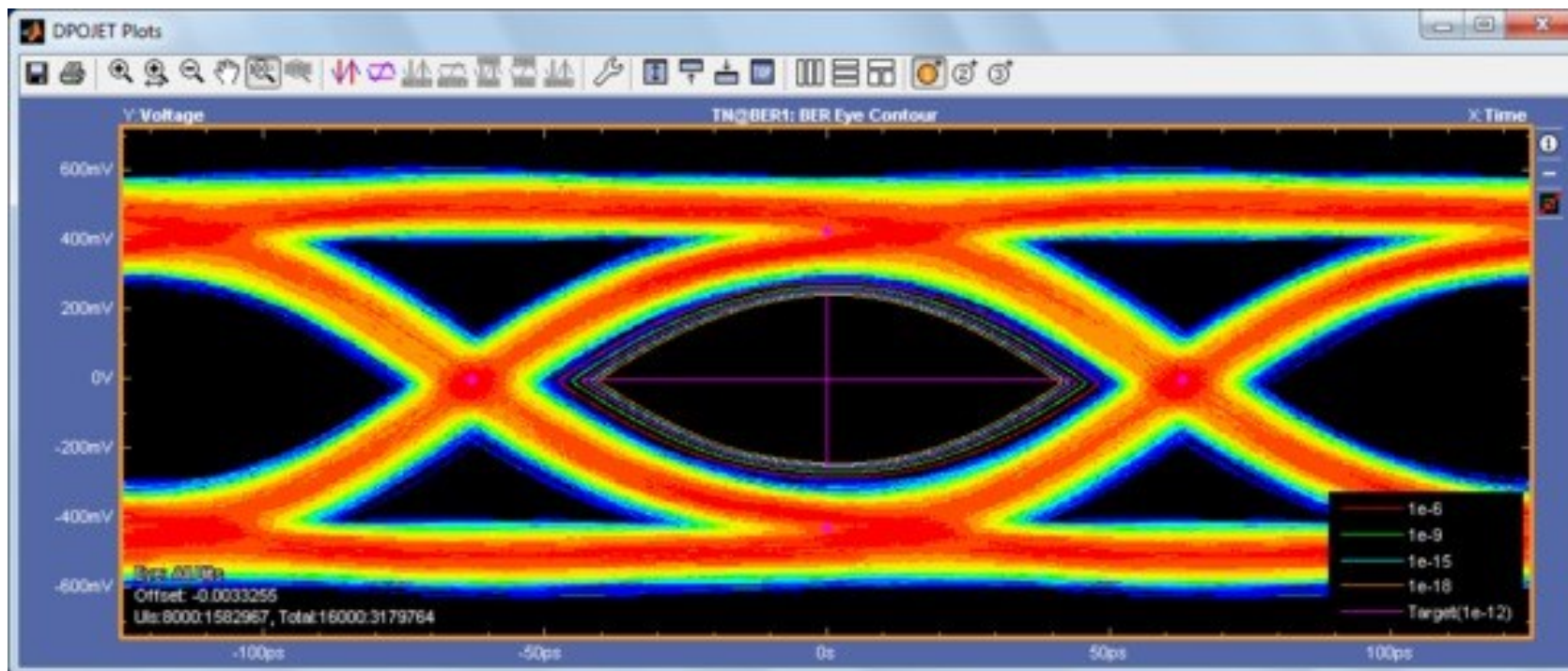
Kan de S “vectoren” bepalen

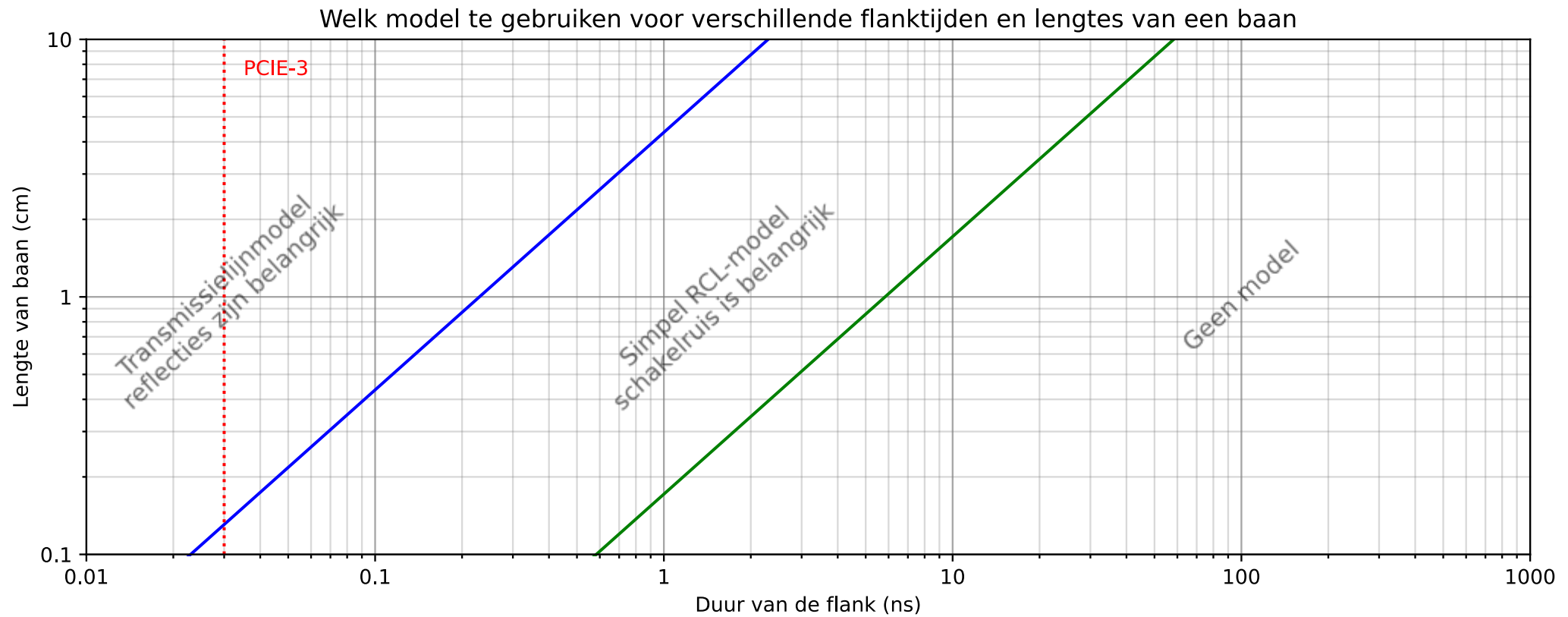


Signaalintegriteit tijddomein

ANALOGIE ELEKTRONICA

- Eye diagram
 - Aspecten?





Bronnen

- Capacitieve koppeling
- Inductieve koppeling

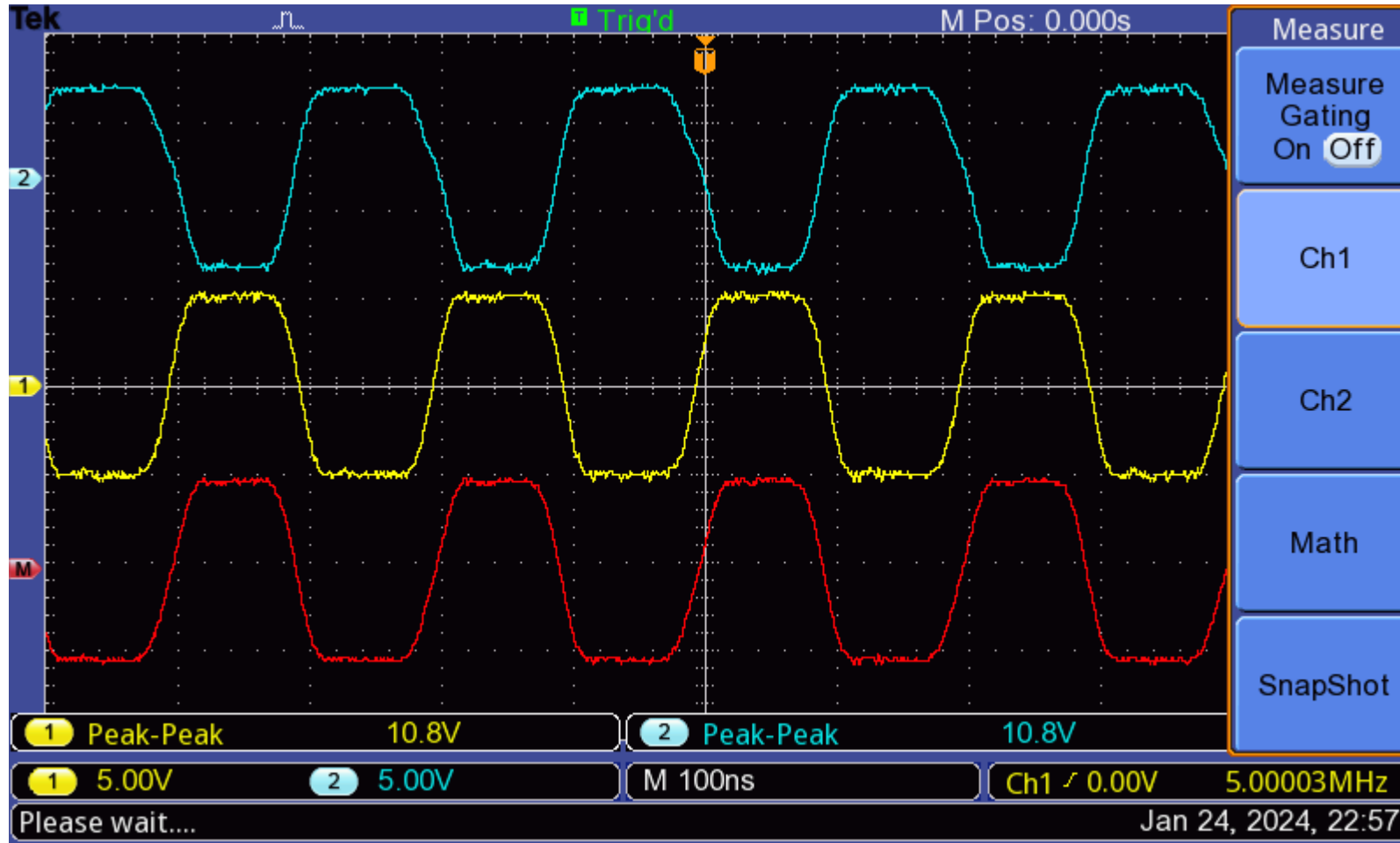
Kleinere PCB's -> Banen dicht bij elkaar

Hogere frequenties -> parasitaire componenten spelen een rol

Oplossing

- Differentiële signalen
- LVDS

Differentieel signaal



1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

Eigenschappen

ANALOGIE ELEKTRONICA

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

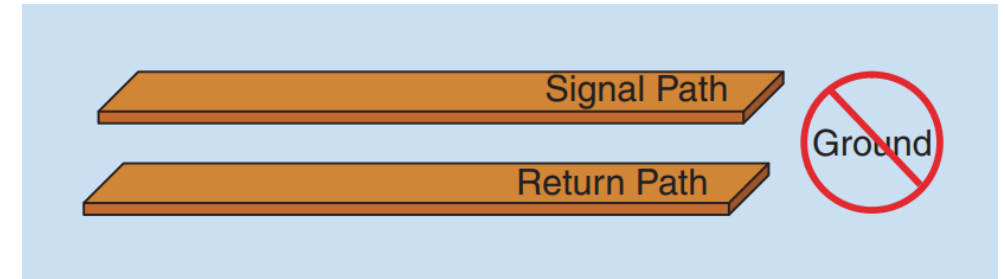


Figure 2. A transmission line is composed of two conductors, a signal conductor and a return conductor. Avoid calling the return conductor ground.

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen

2. Signalen zijn dynamisch

$$v = \frac{c}{\sqrt{Dk}} \approx \frac{29.98 \frac{cm}{ns}}{\sqrt{4.4}} = 14.3 \frac{cm}{ns}$$

3. Signalen zien een instantane impedantie

4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom

5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen

6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld

7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert

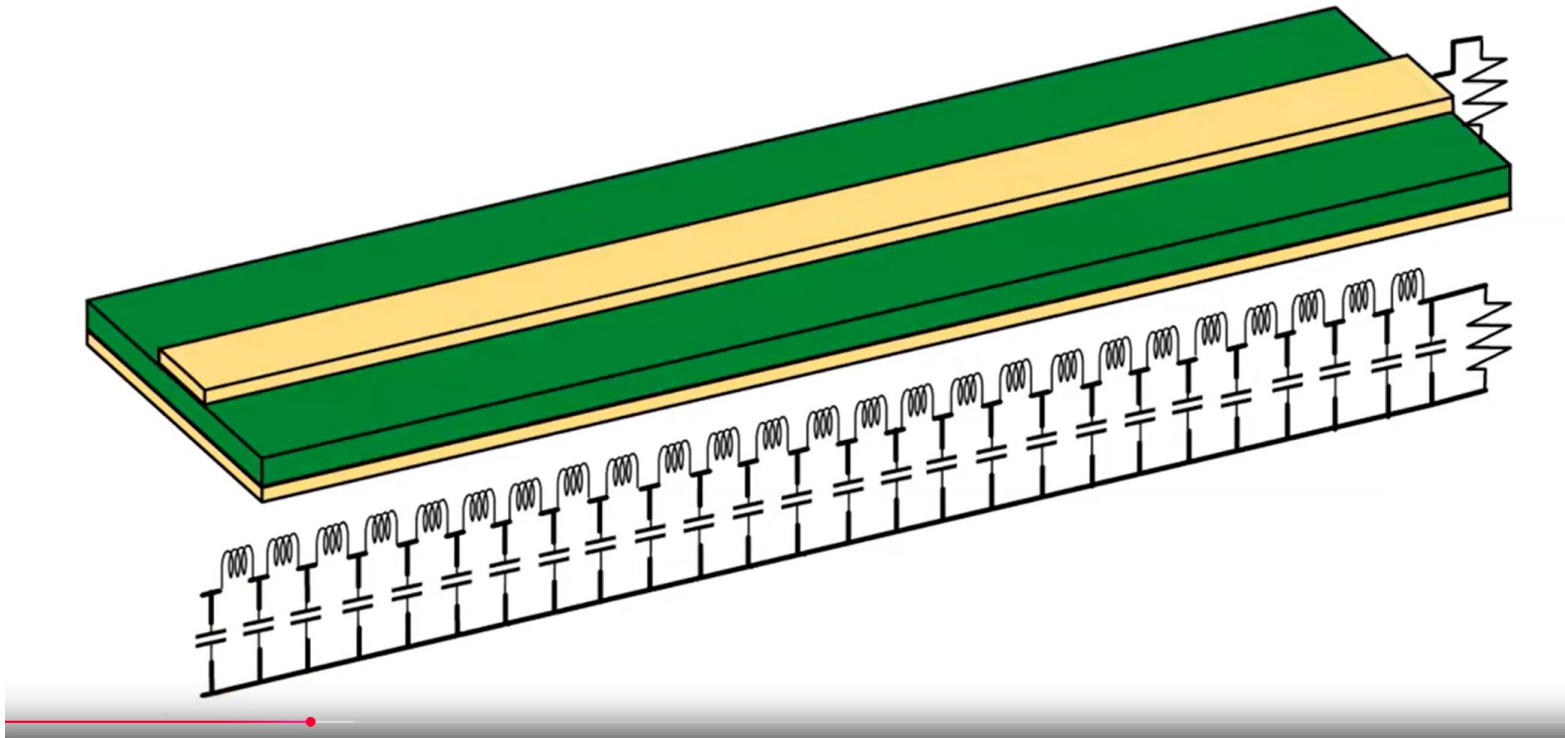
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping

9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{vC_L V} = \frac{1}{vC'_L}$$
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \Delta t = \frac{\Delta x}{V}, \Delta Q = CV$$

4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen



1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen

$$\rho_{reflectie} = \frac{V_{gereflecteerd}}{V_{inkomend}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

Eigenschappen

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld

$$L = \frac{N}{I}$$

$$V = \frac{dN}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

ANALOGIE ELEKTRONICA

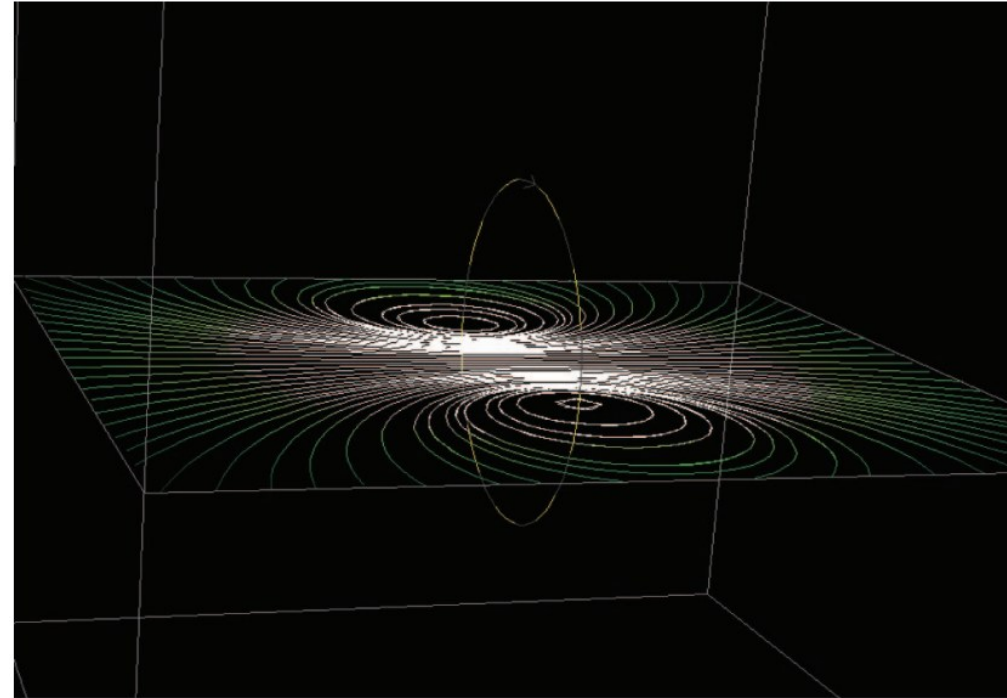
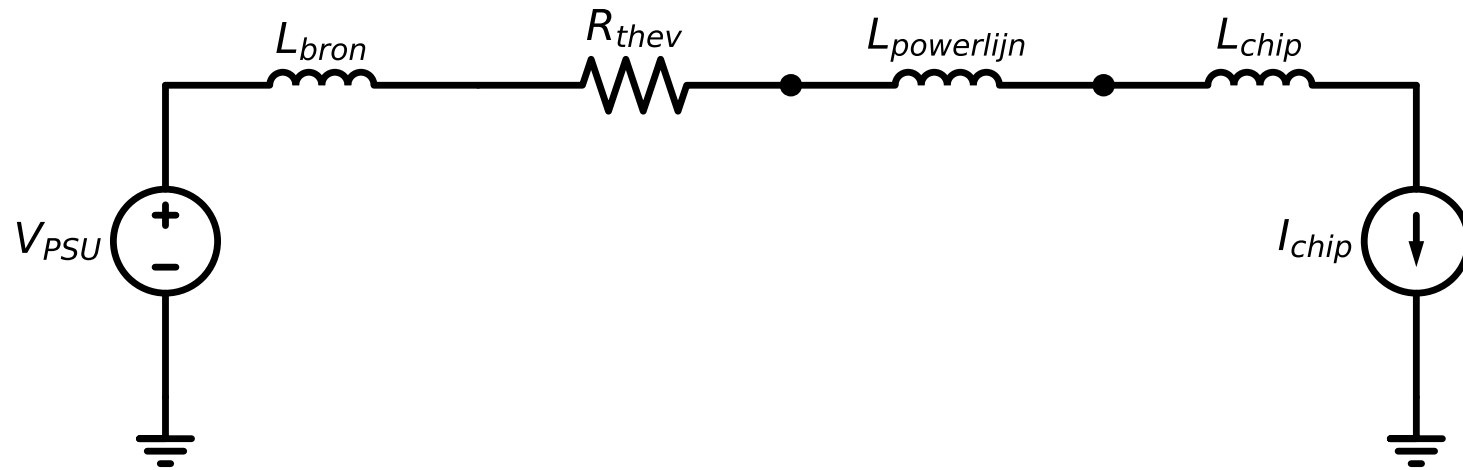


Figure 8. Rings of magnetic field lines surrounding a current loop. Inductance is a measure of the total number of rings of magnetic field per amp of current. We count the rings of magnetic field surrounding the current loop by integrating the field density inside the current loop.

RCL model

ANALOGIE ELEKTRONICA



$$V = L \frac{di}{dt}$$

Eigenschappen

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

ANALOGIE ELEKTRONICA

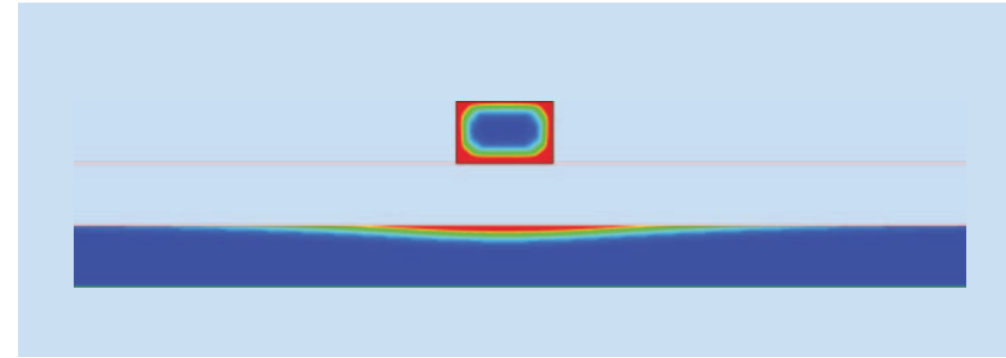
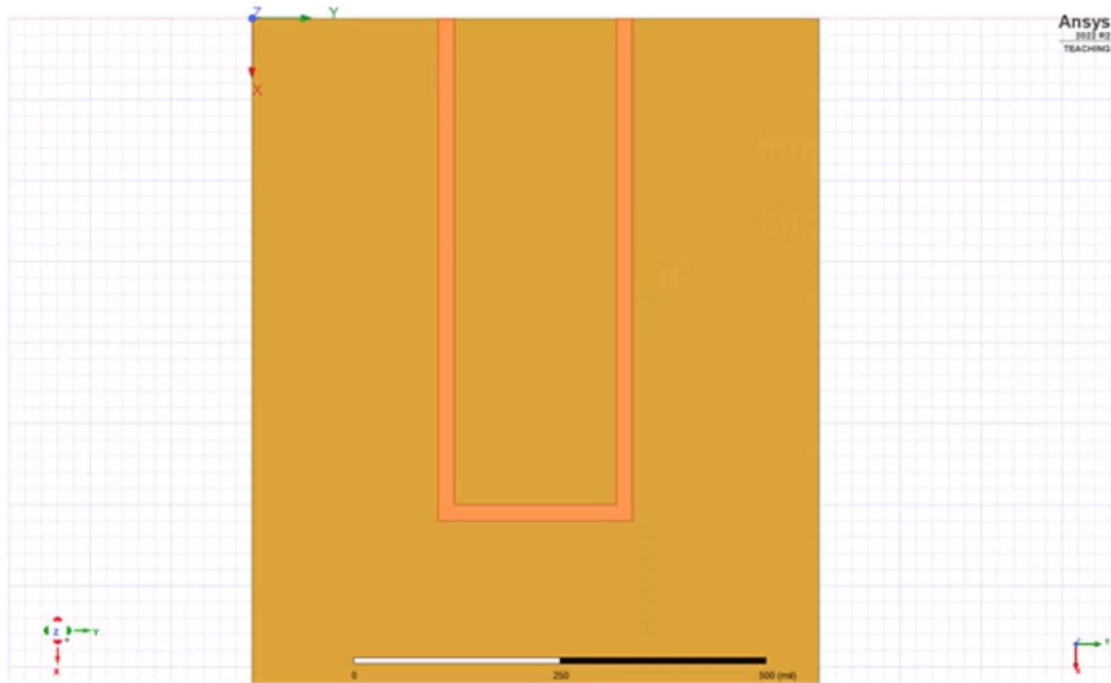


Figure 9. Current distribution in the signal and return conductors at 100 MHz for copper traces is driven by two forces: current within each conductor wants to spread out as much as possible, while the signal and return current want to get as close together as possible.

Principle #1: Return current re-distributes in the plane under a signal line, with freq



1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping magnetron effect

$$\sigma \propto f \cdot Dk$$

9. Gemeenschappelijke stromen zend uit -> EMC problemen

Bron : Essential Principles of Signal Integrity (Eric Bogatin) IEEE

1. Alle verbindingen vormen transmissielijnen
2. Signalen zijn dynamisch
3. Signalen zien een instantane impedantie
4. De terugkeerstroom is net zo belangrijk als de signaalstroom
5. Reflecties ontstaan bij plotselinge impedantieveranderingen
6. Inductie: hoe efficiënt genereert de geleider een magnetisch veld
7. Stroom gaat lopen zodat de lusinductie minimaliseert
8. Dielektrische materialen absorberen veldenergie en zorgen voor demping
9. Gemeenschappelijke stromen zenden uit -> EMC problemen

stripline vs microstrip

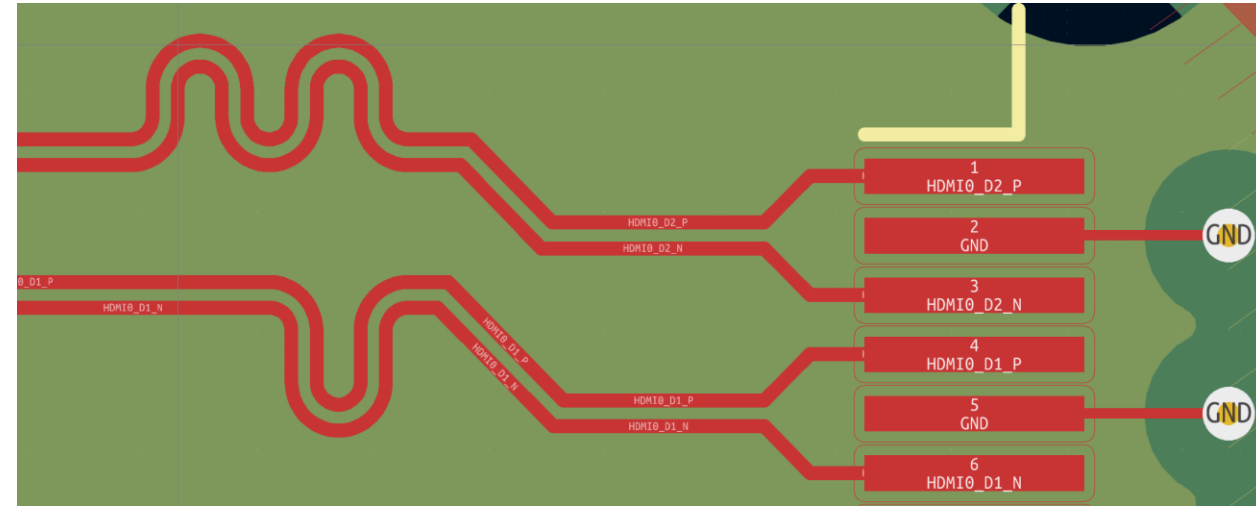
$3\mu A$ op $100MHz$ door $1m$ kabel levert $120 \frac{\mu V}{m}$ op $3m$ afstand

Differentiële banen

ANALOGIE ELEKTRONICA

Afstand

- Kleine afstand binnen paar
- Grote afstand tussen paren
- 5W regel

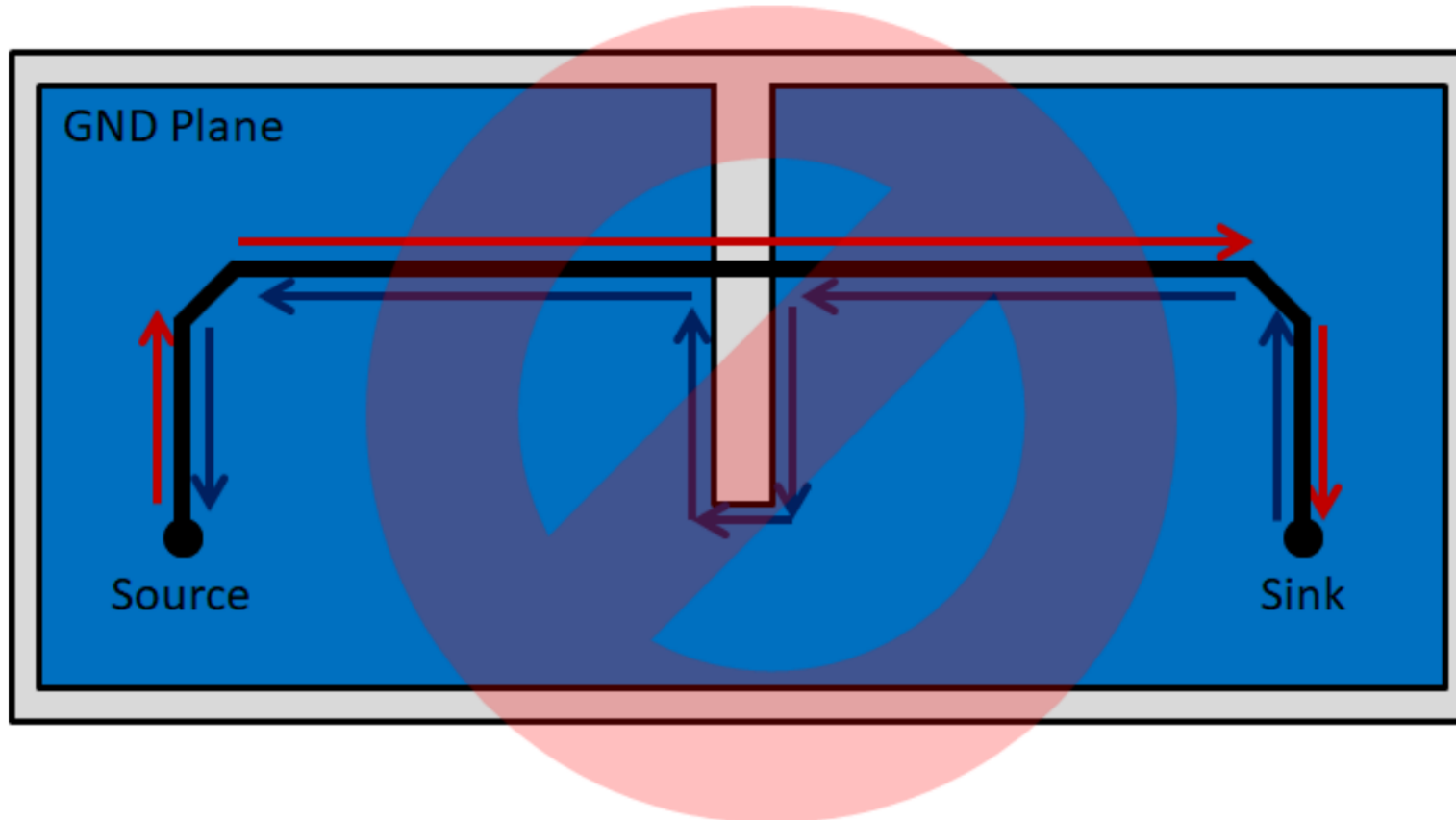


Terugkeerpaden

- Groundplane onder elk paar
- Geen via's (complexe terugkeerpaden)

Gelijke lengtes





The red arrows are the signal path and the blue arrows are the return path.

Figure 5. Routing Across a Split Plane

RF signalen altijd op een laag afgeschermd door een ground laag.

Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4
(RF) signaal + voeding	ground	RF signaal	ground
ground	(RF) signaal + voeding	ground	(RF) signaal + voeding
			
ground	(RF) signaal + voeding	voeding	ground
(RF) signaal + voeding	ground	signaal	signaal

[OSH Park Docs ~ Services ~ 4 Layer Prototype Service](#)

[Controlled Impedance PCB Layer Stackup- JLCPCB](#)

[Stackup for 4,6,8 layers Multi-layer laminated structure - Custom PCB Prototype the Easy Way – PCBWay](#)

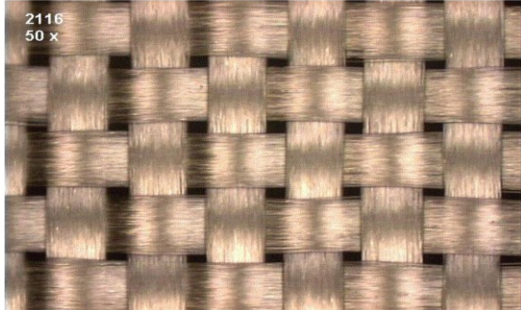
Thickness	Copper thick (outer/inner)	Layer No.	StackUp	Laminated chart Thickness
1.6mm±10%	1/1oz	L1		Copper 18 um--plating to 35um
				PP 0.11 mm(2116) dielectric constant 4.29 ± (The DK value is not absolute and will vary depending on the base material's models and thickness.)
		L2		Core 1.2mm with 1/1 oz Cu
		L3		PP 0.11 mm(2116) dielectric constant 4.29 ± (The DK value is not absolute and will vary depending on the base material's models and thickness.)
		L4		Copper 18 um--plating to 35um

Impedantie van banen

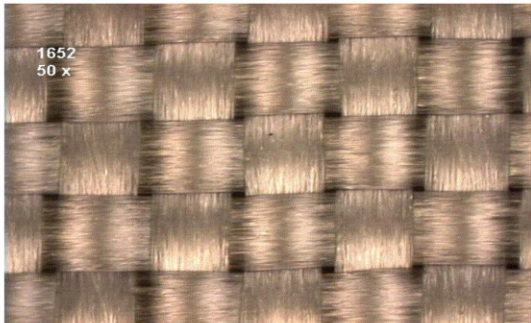


Wat is prepreg?

ANALOGIE ELEKTRONICA



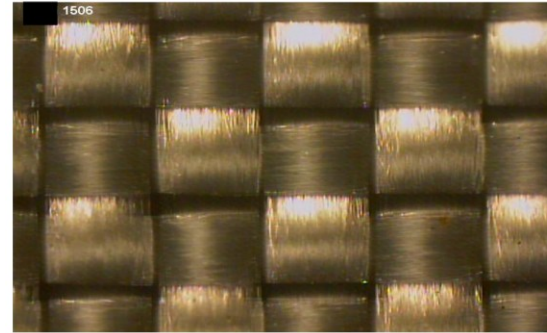
2116
Warp & Fill Count: 60 x 58 (ends/in)
Thickness: 0.0038" / 0.097 mm



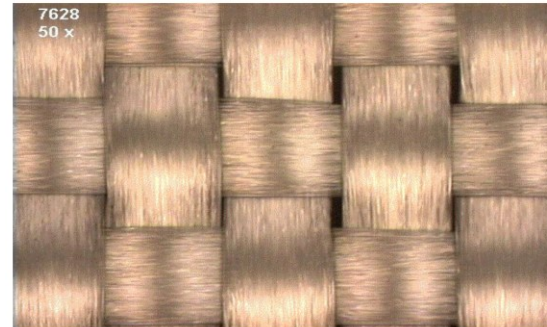
1652
Warp & Fill Count: 52 x 52 (ends/in)
Thickness: 0.0045" / 0.114 mm

Photos courtesy of Isola R & D Laboratories

www.isola-group.com



1506
Warp & Fill Count: 46 x 45 (ends/in)
Thickness: 0.0056" / 0.140 mm



7628
Warp & Fill Count: 44 x 32 (ends/in)
Thickness: 0.0068" / 0.173 mm

Photos courtesy of Isola R & D Laboratories

www.isola-group.com

Prepreg wordt geïmpregneerd met hars
Heeft frequentieafhankelijke eigenschappen

Frequentieafhankelijk gedrag

[is420-high-performance-laminate-and-prepreg_Dk_Df_Tables.pdf \(isola-group.com\)](https://www.isola-group.com/is420-high-performance-laminate-and-prepreg_Dk_Df_Tables.pdf)

Dielectric Constant(Dk) / Dissipation factor (Df) Table

Core Data

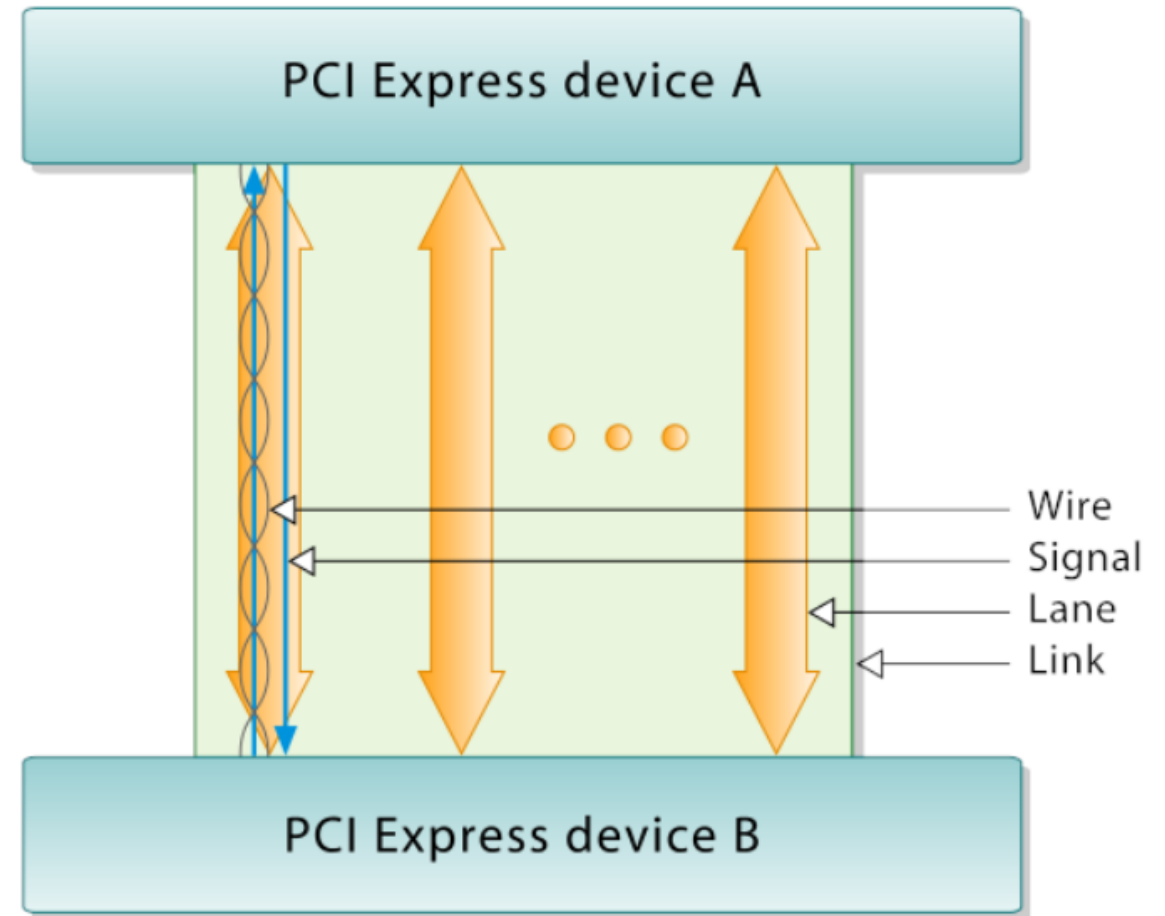
Constructions	Resin Content %	Thickness (inch)	Thickness (mm)	Dielectric Constant (DK)/ Dissipation Factor (DF)			
				100 MHz	1 GHz	2 GHz	10 GHz
1x106	72%	0.002	0.050	4.30 0.1800	4.10 0.1800	3.95 0.0210	3.90 0.0240
1x1080	64%	0.003	0.075	4.65 0.0180	4.26 0.0180	4.15 0.0210	4.10 0.0230
1x2116	47%	0.004	0.100	4.60 0.0160	4.52 0.0160	4.35 0.0170	4.25 0.0170
1x2116	55%	0.005	0.125	4.75 0.0160	4.37 0.0160	4.25 0.0170	4.20 0.0170
1x1652	52%	0.006	0.150	4.75 0.0170	4.40 0.0170	4.25 0.0180	4.20 0.0190
1x7628	43%	0.007	0.175	4.90 0.0160	4.58 0.0160	4.45 0.0170	4.35 0.0170
1x7628	48%	0.008	0.200	4.85 0.0160	4.50 0.0160	4.40 0.0170	4.35 0.0180
2x2116	55%	0.010	0.250	4.75 0.0160	4.37 0.0160	4.25 0.0170	4.20 0.0170
2x1652	52%	0.012	0.300	4.75 0.0170	4.40 0.0170	4.25 0.0180	4.20 0.0190

[User Guide to the JLCPCB Impedance Calculator](#)
[Controlled Impedance Calculator - JLCPCB](#)
[Impedance Calculator \(protoexpress.com\)](#)

- Point-to-point
- 1 Link
 - Differentieel 100MHz refclk
 - x1 -> 2 paren
 - Differentieel RX paar
 - Differentieel TX paar
 - x16 -> 32 paren

PCIE 2.0 elk paar 5Gbps

Wat is de bit-tijd?



Net als UART: Rx->Tx , Tx->Rx , behalve naar een connector.

Koppelcondensatoren ~200nF:

Tx -----| |-----> (differentieel. Polariteit mag omgedraaid worden)

Rx <-----| |----- (differentieel. Polariteit mag omgedraaid worden)

REFCLK -----| |-----> (differentieel. Polariteit mag **NIET** omgedraaid worden)

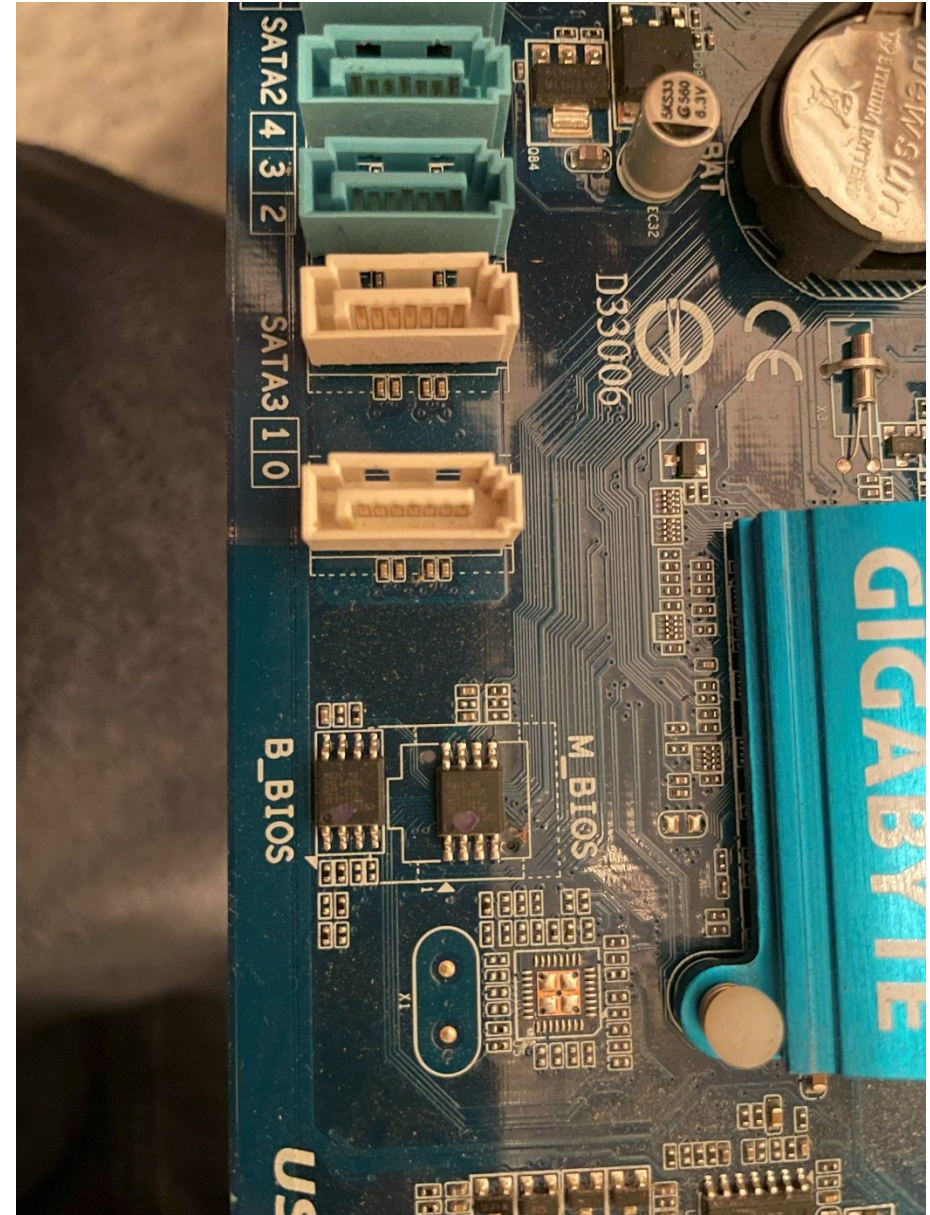
Connecting a PCIe device follows the standard PCIe convention. The CM4 has on-board AC coupling capacitors for CLK and PCIe_TX signals. However the PCIe_RX signals need external coupling capacitors close to the driving source (the device TX), if you are using an external PCIe/NVMe card these capacitors will be on-board. The PCIe convention is that if you are wiring directly to an IC then the TX and RX pairs need to be swapped (i.e. TX → RX, RX → TX). If you are wiring to a connector then this is typically labelled from the host point of view and so TX/RX swaps aren't required. Additionally the PCIe_CLK_nREQ must be connected to ensure the CM4 produces a clock signal, and the PCIe_nRST should also be connected to ensure the device is correctly reset when required.

The differential PCIe signals should be routed as 90Ω differential pairs, with suitable clearances. There is no need to

PCIe



ANALOG ELETTRONICA



Analyseert het kanaal

1. Welke polariteit?
2. Welke maximale snelheid zonder bitfouten?
3. Welke afstandverschillen tussen paren?

En maakt communicatie mogelijk binnen de gegeven omgeving!
Veel andere protocollen zijn niet zo vergevend.

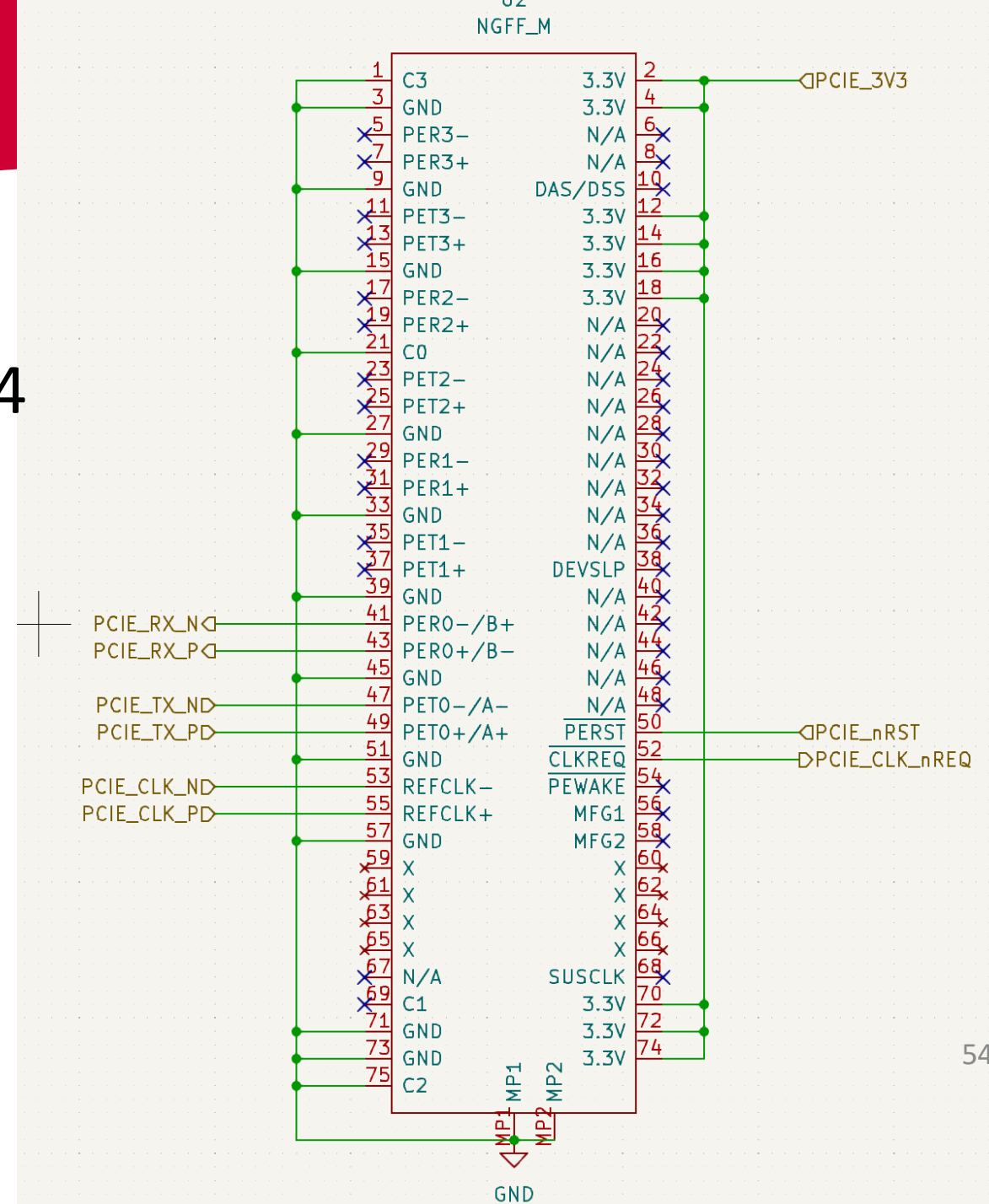
NVME

PCIe reset

PCIe wake -> niet aanwezig op CM4

Clock Request

SMBUS



Digikey “How to Make a Raspberry Pi CM4 Carrier Board”

<https://youtube.com/playlist?list=PLEBQazB0HUyRwj761b-MLNEu8FA8WKSG&si=HXPZYw9O5kJebyIQ>

Hackaday:

[PCIE FOR HACKERS: EXTERNAL PCIE AND OCULINK](#)

[PCIE FOR HACKERS: OUR M.2 CARD IS DONE](#)

[PCIE FOR HACKERS: AN M.2 CARD JOURNEY](#)

[PCIE FOR HACKERS: EXTRACTING THE MOST](#)

[PCIE FOR HACKERS: LINK ANATOMY](#)

[PCIE FOR HACKERS: THE DIFFPAIR PRELUDE](#)

[M.2 FOR HACKERS – CARDS](#)

[M.2 FOR HACKERS – CONNECTORS](#)

[M.2 FOR HACKERS – EXPAND YOUR LAPTOP](#)

ANE21

Wiki met het lesmateriaal:

https://bitbucket.org/HR_ELEKTRO/ane21/wiki/Home