

Circuits and Signal Processing

ET2405-d2

3^e college

Arie van Staveren en Wouter A. Serdijn

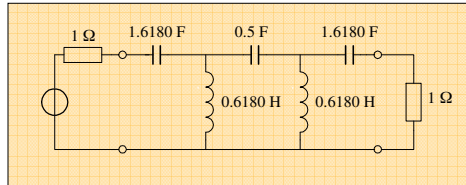
Leerdoelen

Na afloop van dit college kan je:

- oorzaken aangeven van variaties in elementwaarden;
- aangeven wat de gevoeligheid van een filter is;
- op 3 manieren maatregelen treffen tegen de gevolgen van spreiding;
- uitleggen waarom verliesvrije filters een lage gevoeligheid hebben;
- aangeven wat het verband is tussen DR en gevoeligheid.

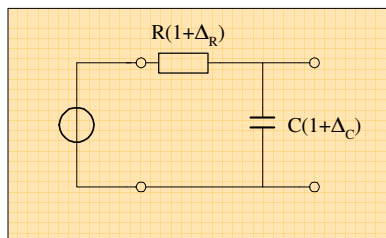
Nauwkeurigheid

Praktisch: componenten hebben geen **oneindige nauwkeurigheid!**



Wat voor type overdracht?

Afwijking componentwaarde geeft fout in filteroverdracht.



Δ_R : fout in R
 Δ_C : fout in C

Fout in kantelpunt : $\Delta_R + \Delta_C$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R(1+\Delta_R)C(1+\Delta_C)} \approx \frac{1}{2\pi RC(1+\Delta_R + \Delta_C)}$$

↑
Worst case

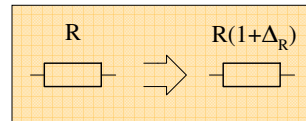
Op chip : Δ_R en Δ_C orde 10 %

Worst-case fout kantelpunt : 20 %

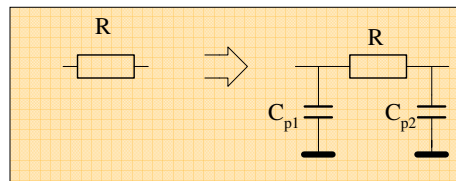
Fouten in de componenten

Fysische componenten $\Rightarrow$ modellen

- Model is goed, maar parameters niet



- Model is te eenvoudig



A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

5

Spreiding op componentwaarde

$\Rightarrow$ Eindige productienauwkeurigheid

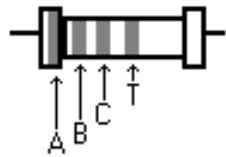
- Discrete componenten: spreiding vaak aangegeven (via codering of direct)
- Componenten op chip: spreiding kan gevonden worden in Design Manual

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

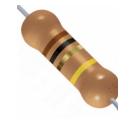
ET2045-d2 / 3^e college

6

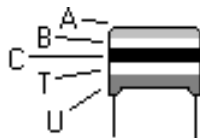
•Kool en metaalfilmweerstanden



Ring A is vaak op of tegen de buitenrand



•Foliecondensator



3 ringen: alleen A, B en C

5 ringen: A, B, C, T, U



A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

7

6-band Resistor



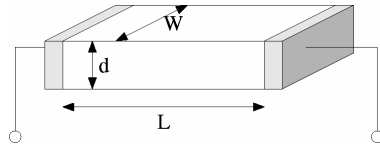
Color	1 st band	2 nd band	3 rd band	Multiplier	Tolerances	Temp. Coeff.
Black	0	0	0	$\times 10^0$		
Brown	1	1	1	$\times 10^1$	$\pm 1\%$	100 ppm/K
Red	2	2	2	$\times 10^2$	$\pm 2\%$	50 ppm/K
Orange	3	3	3	$\times 10^3$	$\pm 3\%$	15 ppm/K
Yellow	4	4	4	$\times 10^4$	$\pm 4\%$	25 ppm/K
Green	5	5	5	$\times 10^5$	$\pm 0.5\%$	
Blue	6	6	6	$\times 10^6$	$\pm 0.25\%$	
Violet	7	7	7	$\times 10^7$	$\pm 0.10\%$	
Grey	8	8	8	$\times 10^8$	$\pm 0.05\%$	
White	9	9	9	$\times 10^9$		
Gold				$\times 10^{-1}$	$\pm 5\%$	
Silver				$\times 10^{-2}$	$\pm 10\%$	
No band					$\pm 20\%$	

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

8

•Weerstanden op chip

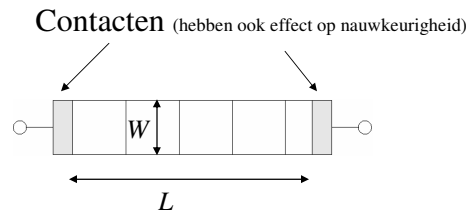


$$R = \rho \frac{L}{d \cdot W}$$

Op chip zijn ρ en d niet vrij te kiezen!

$$R = \frac{\rho}{d} \frac{L}{W} = R_{\square} \cdot N$$

$R_{\square}$: vierkantsweerstand
 N : aantal vierkanten



Informatie Design Manual:

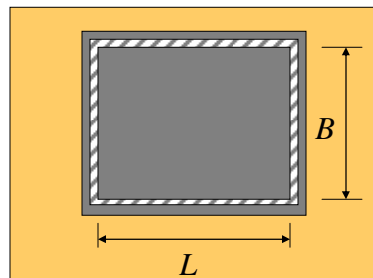
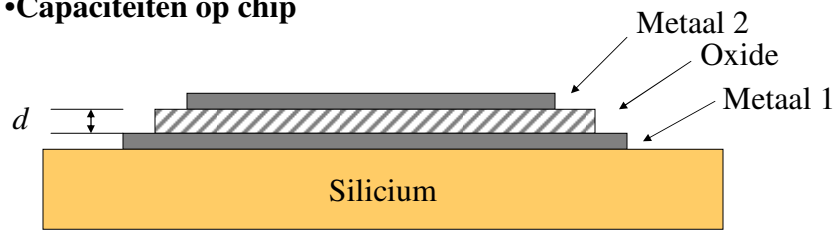
$R_{\square}$

Min (Ω)	Nom (Ω)	Max (Ω)
900	1000	1100

ΔW

Min (μ)	Nom (μ)	Max (μ)
0	0.5	1

•Capaciteiten op chip



$$C = \epsilon \frac{B \cdot L}{d}$$

Op chip zijn ϵ en d niet vrij kiesbaar!

$$C = \epsilon \frac{B \cdot L}{d} = C_{\square} \cdot B \cdot L$$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

11

Informatie Design Manual:

$C_{\square}$	Min (fF/ μm^2)	Nom (fF/ μm^2)	Max (fF/ μm^2)
	0.13	0.145	0.16

$\Delta B, \Delta L$	Min (μ)	Nom (μ)	Max (μ)
	0	0.5	1

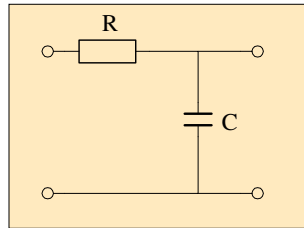
A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

12

Voorbeeld

Gegeven:



Ontwerp een R en een C z.d.d. $f_k = 1$ MHz

Wat is de nauwkeurigheid van f_k ?

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

13

Ontwerp van f_k

$$\frac{1}{2\pi RC} = 1 \text{ MHz} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \bullet \text{Product } RC \text{ bepaald} \\ \bullet \text{impedantieniveau vrij.} \end{array}$$

$$\text{Kies (bijvoorbeeld) } R = 10 \text{ k}\Omega \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \bullet 10 \text{ vierkanten} \\ \bullet C = 15.9 \text{ pF} \end{array}$$

$$A = \frac{15.9 \text{ pF}}{0.145 \text{ fF}} = 1.1 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2 = 0.11 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \quad L = B = 0.33 \text{ mm} \text{ (bijv.)}$$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

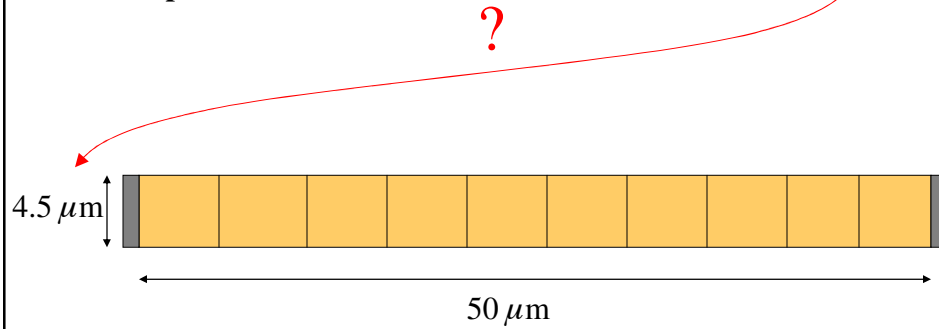
ET2045-d2 / 3^e college

14

Spreiding op W van weerstanden $0.5 \mu\text{m}$

Resultierende fout in orde van spreiding op $R_{\square}$ als: $W_{nom} = 5 \mu\text{m}$

Ontwerp van R :



Worst-case R : $R_{\square} = 1100 \Omega$

$W = 4.5 \mu\text{m}$ (fout in L verwaarloosbaar t.o.v. fout in W)

Fout $R \approx 20 \%$

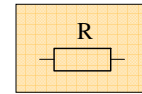
Worst-case C : $C_{\square} = 0.16 \text{ fF}$ (fout in L, B verwaarloosbaar t.o.v. fout in $C_{\square}$)

Fout $C \approx 10 \%$

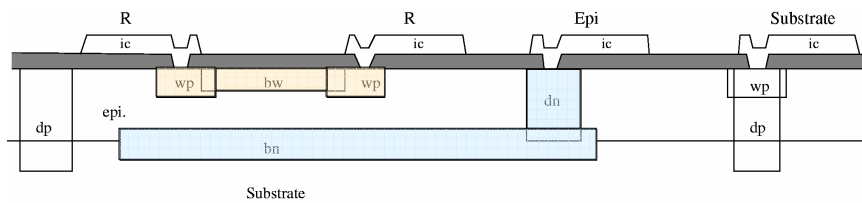
Totale worst case fout $\approx 30 \%$!

Modellen

Eenvoudigste model weerstand



Dwarsdoorsnede van weerstand op chip



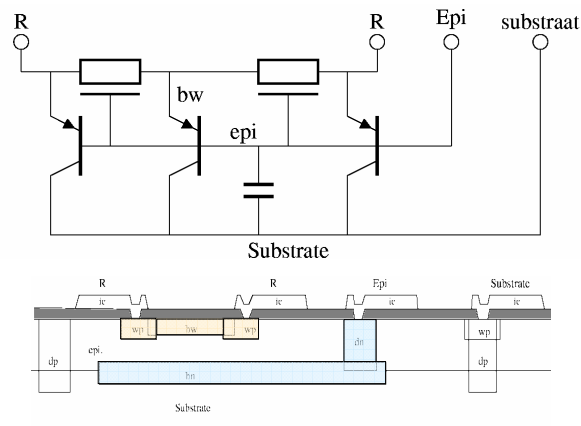
wp, bw, dp, substrate : P- gedoteerd
bn, epi, dn : N- gedoteerd

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

17

Model weerstand



A. van Staveren /
W.A. Serdijn

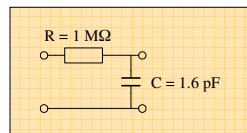
ET2045-d2 / 3^e college

18

Effect op filter

- Kies topologie z.d.d. effect parasieten minimaal is (binnenkort)

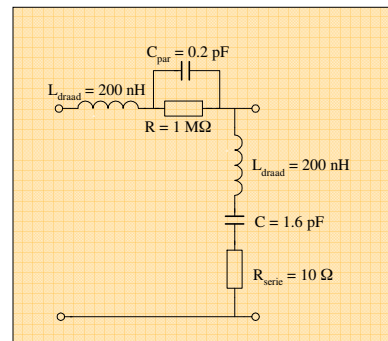
- Kies impedantie niveau z.d.d. effect parasieten verwaarloosbaar is



Ideaal ($f_k = 1 \text{ kHz}$)

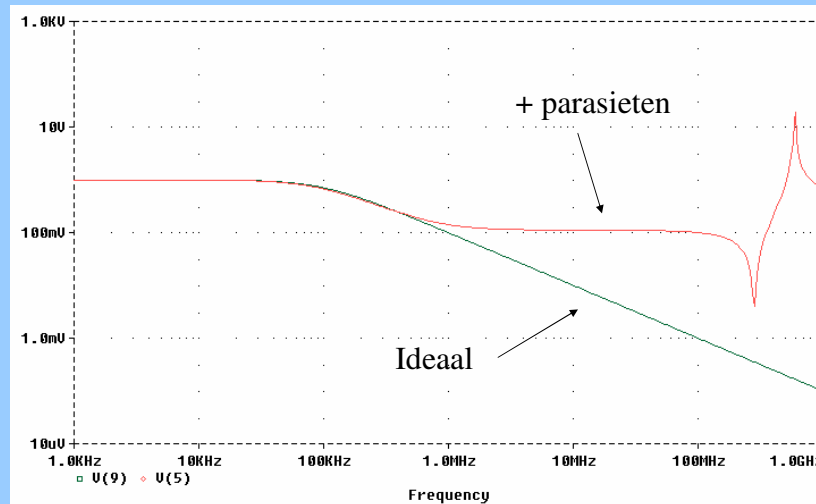
A. van Staveren /
W.A. Serdijn

+ parasieten



ET2045-d2 / 3^e college

19

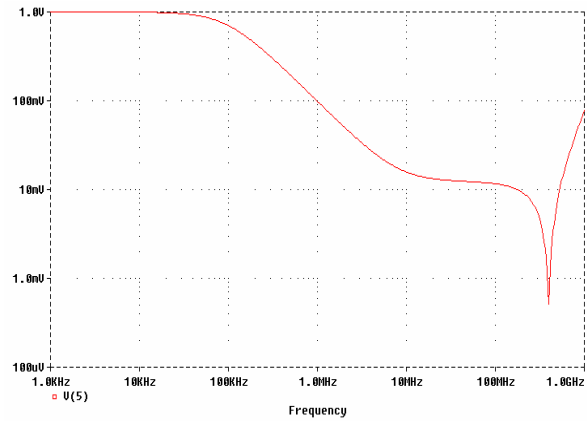
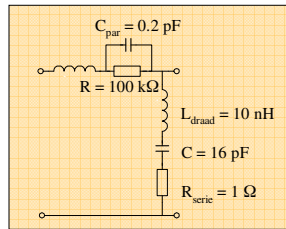


Waardoor komen de afwijkingen?

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

20



- Impedantieniveau factor 10 omlaag
- Aansluitdraden factor 10 korter gemaakt

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

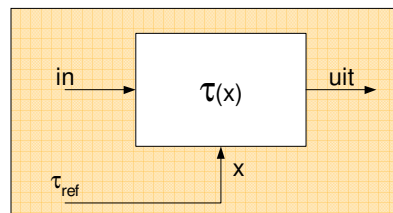
21

Filters en spreiding

Absolute nauwkeurigheid niet beschikbaar op chip



Externe referentie nodig voor wegregelen fouten



A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

22

Filters en spreiding

Hoe effect van spreiding op τ minimaliseren?

1.
2.
3.

Reductie fouten in overdracht

1. Maak gebruik van trimming en tuning;
2. Correleer de verschillende foutbronnen;
3. Gebruik filters die ongevoelig zijn voor spreiding in componentwaarden.

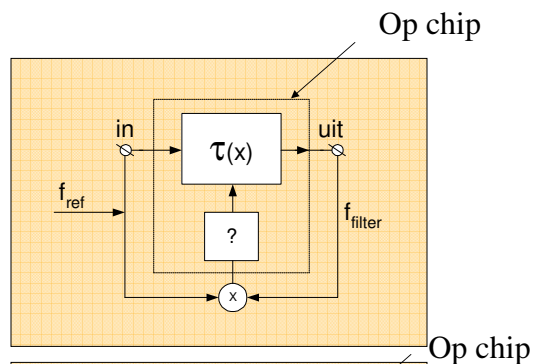
Trimming en Tuning

Trimming : afregelen tijdens productiefase

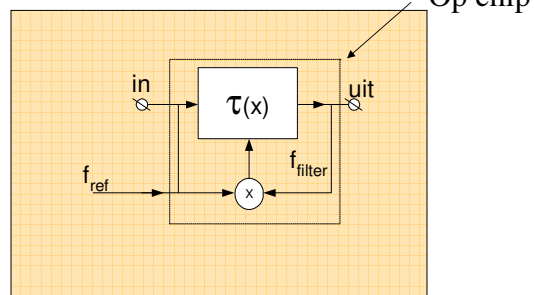
Tuning : afregelen tijdens de bedrijfsfase

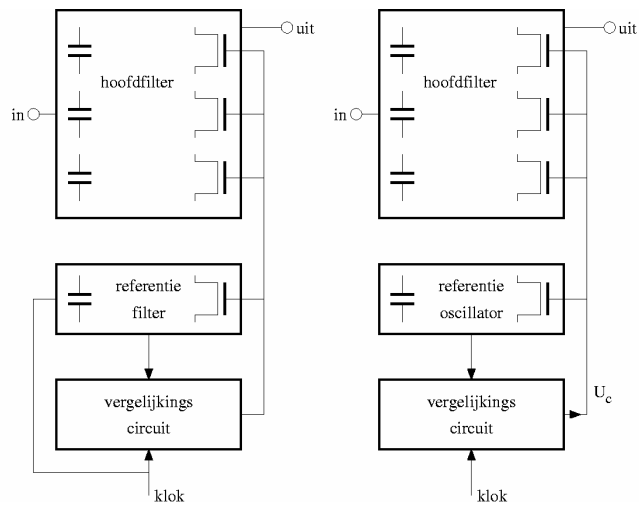
Trimming:

Welke functie heeft het blok met het vraagteken?



Tuning:

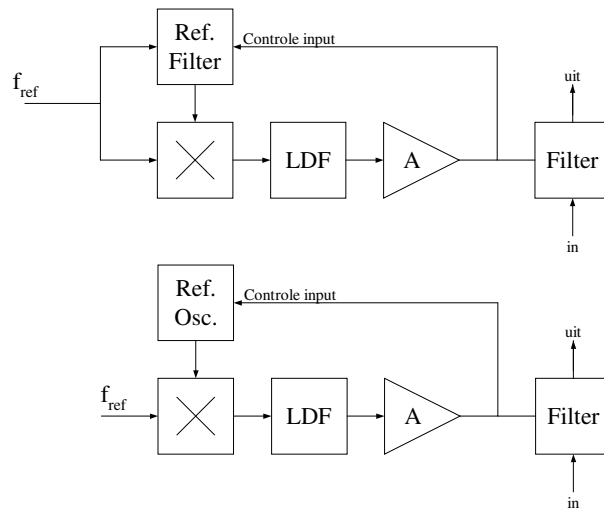




A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

27



A. van Staveren /
W.A. Serdijn

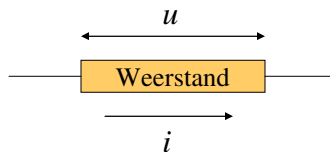
ET2045-d2 / 3^e college

28

Correleren van fouten

$$f_c = \frac{1}{2\pi R(1+\Delta_R)C(1+\Delta_C)} \approx \frac{1}{2\pi RC(1+\Delta_R+\Delta_C)}$$

Fout = 0 als : $\Delta_R = -\Delta_C$

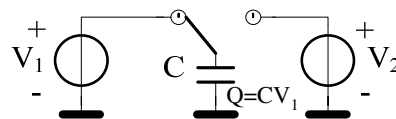


A. van Staveren /
W.A. Serdijn

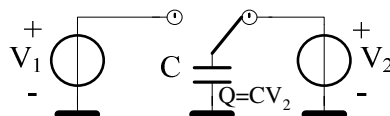
ET2045-d2 / 3^e college

29

Switched capacitor filters:



$$\Delta Q = C(V_1 - V_2)$$



$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = C(V_1 - V_2) \\ \text{N maal per seconde} \end{array} \right\} \Delta Q f = C(V_1 - V_2)f \Rightarrow i = C(V_1 - V_2)f$$

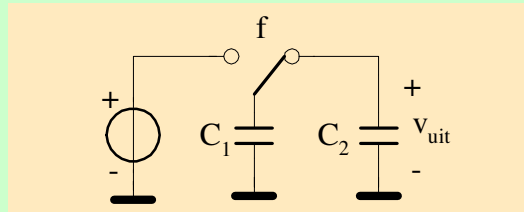
$$\Rightarrow R_{eq} = (fC)^{-1}$$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

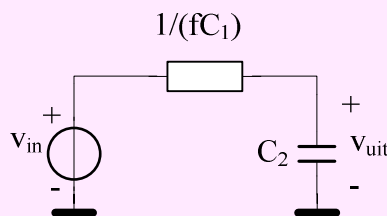
30

Oefening



Bereken kantelpunt van dit filter.

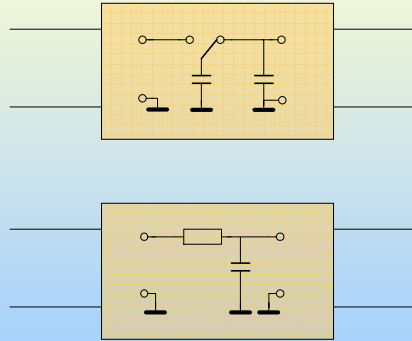
Kantelpunt switched-cap filter



$$f_k = \frac{1}{2\pi \frac{1}{fC_1} C_2} = \frac{fC_1}{2\pi C_2} \quad \Rightarrow \quad \Delta f_k = \frac{f}{2\pi} \cdot \frac{C_1}{C_2} \cdot (1 + \Delta_{I2} + \Delta_f)$$

⇒ Fout bepaald door matching
($\Delta_{I2} < 1\%$ op chip!, $\Delta_f \ll 1\%$)

Blackbox demo



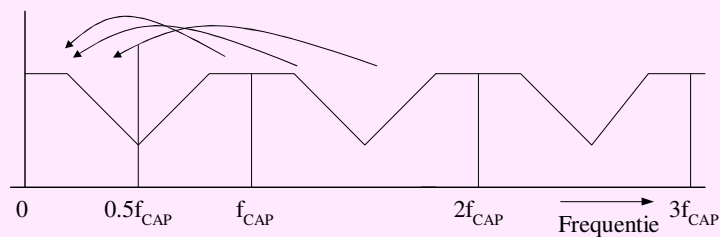
Hoe zijn deze twee te onderscheiden?

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

33

Overdracht Switched-cap filter



- Overdracht tot $0.5f_{CAP}$ gelijk aan tijdcontinue filter
- Overdracht gespiegeld rond $0.5f_{CAP}$
- Hogere banden vouwen naar $0 - 0.5 f_{cap}$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

34

Stroboscoop demo

Ruis Switched-Capacitor

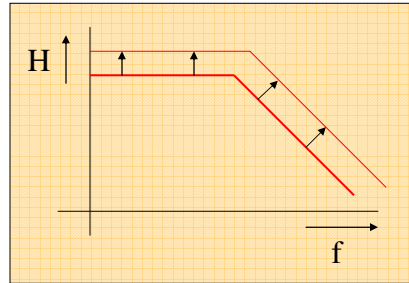
S van een geschakelde capaciteit die een weerstand R nabootst is:

$$S=4kTR$$

Dus voor thermische ruis geen verschil!

Filters ongevoelig voor spreiding

Overdracht wijzigt t.g.v. fouten:



Hoe verandert overdracht (H) t.g.v. variatie in component (x)?
(ook naar afgeleide kenmerken zoals -3 dB punt)

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

37

Gevoeligheid

$$S_x^H = \frac{\frac{\partial H}{\partial x}}{\frac{H}{x}} = \frac{x}{H} \frac{\partial H}{\partial x}$$

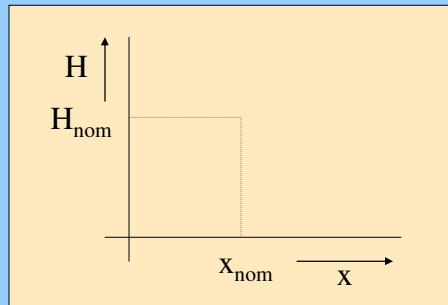
- Belangrijk voor een goed ontwerp!
- Ideaal is $S=0$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

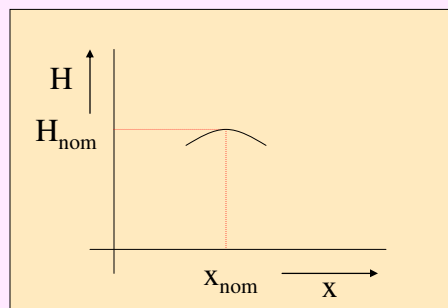
ET2045-d2 / 3^e college

38

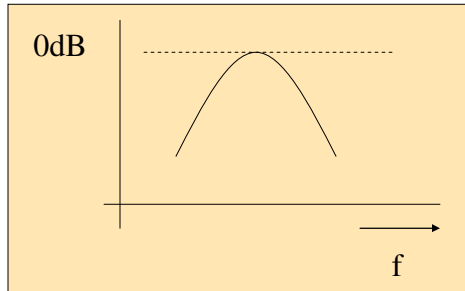
$$\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{is ontwerp doel}$$



Wat is de vorm van $H(x)$ rond x_{nom} ?



Verliesvrij - Gevoeligheid



Passief filter: **L**, **C**

“Nullen” bepaald door **L** en **C**

T.g.v. spreiding zal $H \leq 0$ dB zijn (passief)

→ afgeleide naar **L** en **C** in 0dB-punt is 0 → gevoeligheid = 0

Verliesvrij $\equiv$ ongevoelig

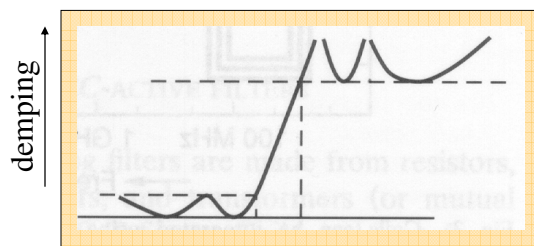
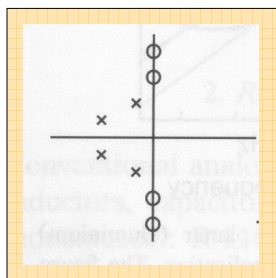
A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

41

Voorbeeld

Vijfde – orde Cauer (elliptisch) filter

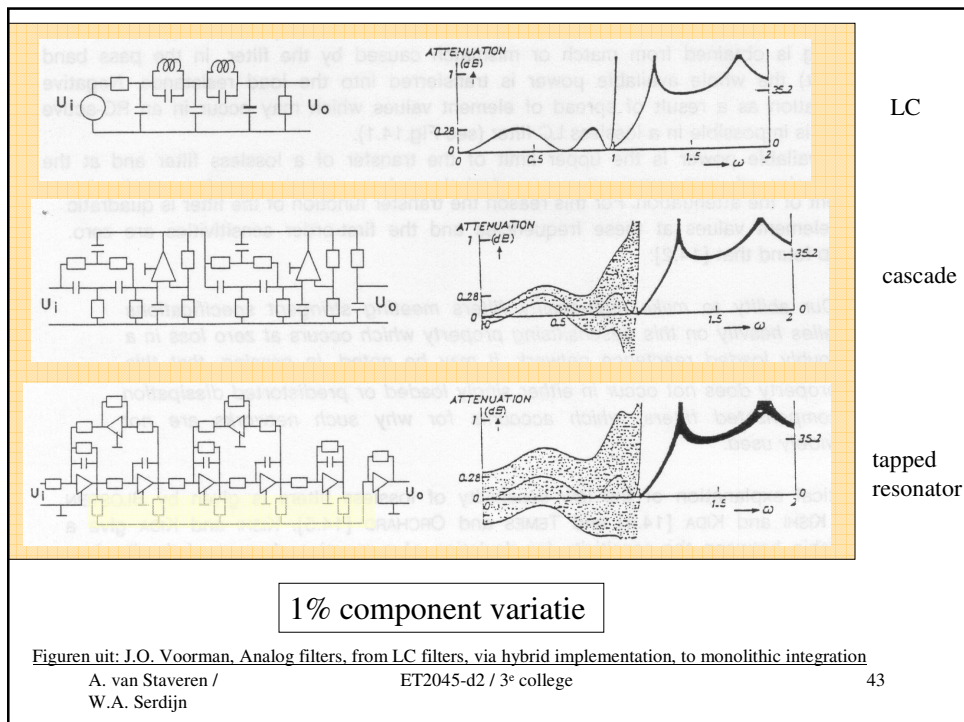


Figuur uit: J.O. Voorman, Integrated Continuous-Time Filter

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

42



Ongevoeligheid – actieve filters



Actieve filters - ongevoeligheid

Integratoren moeten een “passief” klemgedrag hebben

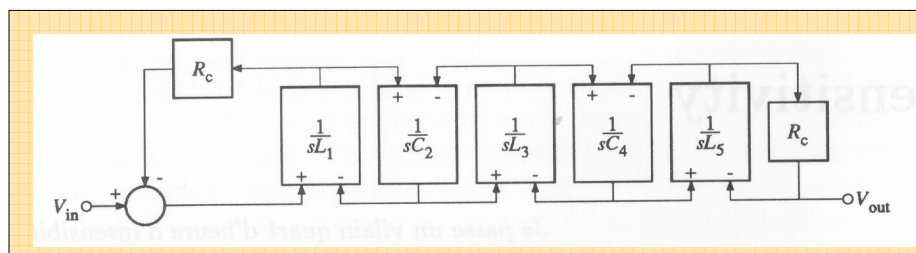
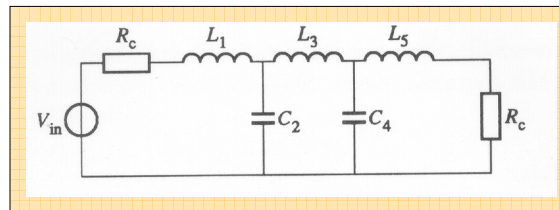


Voldoe aan de poortvoorwaarden

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

45



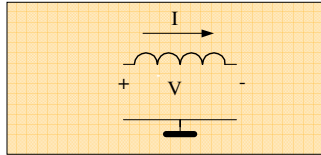
Voor DC: $V_{in} - V_{out} = V_{out}$ $\Rightarrow V_{in} = 2V_{out}$ (Als DC-gain hoog is)

$\Rightarrow$ Onafhankelijk van L en C $\rightarrow (= 0\text{dB})$

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

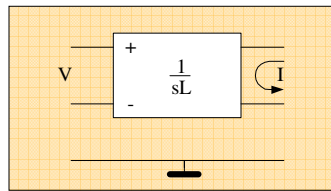
ET2045-d2 / 3^e college

46



$$I = \frac{V}{Ls}$$

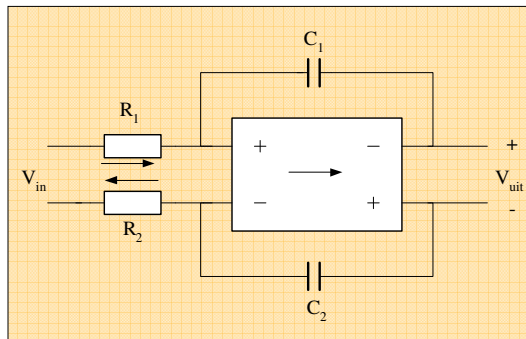
Passief gedrag:
 $-L > 0$



Als poortvoorwaarden gelden:

$$I = \frac{V}{Ls}$$

Altijd een passief gedrag ($L > 0$)

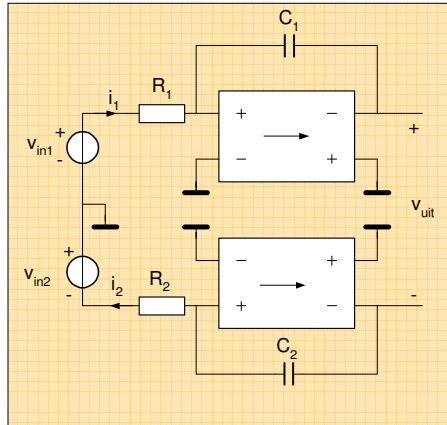


$$V_{uit} = \frac{-V_{in}}{R_1 + R_2} \frac{1}{sC_1} + \frac{-V_{in}}{R_1 + R_2} \frac{1}{sC_2} = \frac{-V_{in}}{s(R_1 + R_2)C_1 // C_2}$$

>0



Ondanks mismatch altijd passief gedrag als aan de poortvoorwaarden is voldaan! ($I_{R1} = I_{R2}$)



$$V_{uit} = \frac{-V_{in1}}{R_1} \frac{1}{sC_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} \frac{1}{sC_2}$$

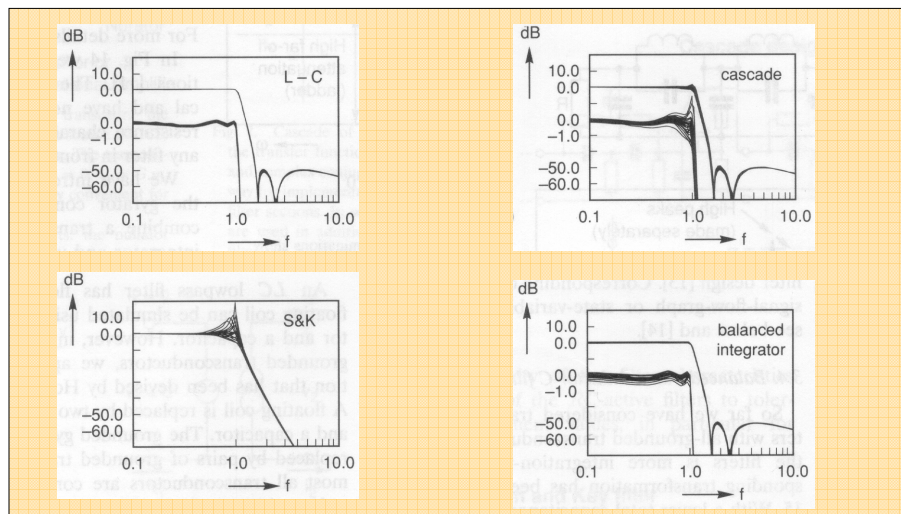
V_{in1} en V_{in2} bepaald door matching ➡ kan actief gedrag vertonen

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

49

Vijfde-orde Chebyshev laagdoorlaat filter



Figuur uit: J.O. Voorman, Integrated Continuous-Time Filter

A. van Staveren /
W.A. Serdijn

ET2045-d2 / 3^e college

50

DR versus Gevoeligheid

Relatie DR en gevoeligheid:

Filter met hoog DR is (on)gevoelig voor component variaties

...waarom?

DR versus Gevoeligheid

Hoog DR  ongevoelig voor ruis

Component variatie kleine verstoring  ruis

Hoog DR  ongevoelig voor component variaties

Bijv: LC filters, en ook DR geoptimaliseerde state-space filters