# Circuits and Signal Processing ET2405-d2

5e college

Arie van Staveren en Wouter A. Serdijn



# Leerdoelen

Na afloop van dit college kan je:

- de beperkingen van het model van Black aangeven;
- uitleggen hoe het asymptotic-gain model afgeleid kan worden vanuit superpositie;
- het asymptotic-gain model toepassen voor analyse en voor synthese.

# Tegenkoppeling

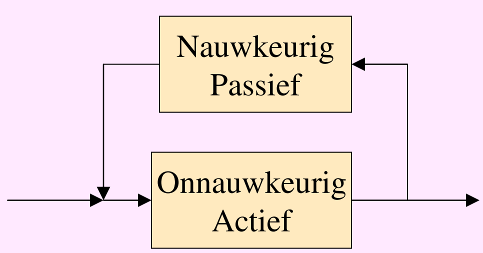
Waarom ook al weer?



Realiseren van nauwkeurige versterking (overdrachten) met:

-nauwkeurige passieve elementen ⇒ nauwkeurigheid

-Onnauwkeurige actieve elementen ⇒ versterking



# Superpositie I

Voor een *lineair* netwerk geldt:

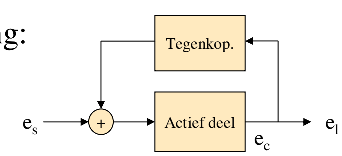
$$y = H(x_{1,} x_2) \leftrightarrow y = H_1 x_1 + H_2 x_2$$

Uitgangssignaal ($y$) kan bepaald worden door de bijdragen hierin voor de verschillende bronnen ($x_1$,$x_2$) *afzonderlijk* te bepalen.



# Superpositie II

Toegepast op systemen met tegenkoppeling:




Bronnen: $e_s$ bronsignaal
$e_c$ signaal actief deel

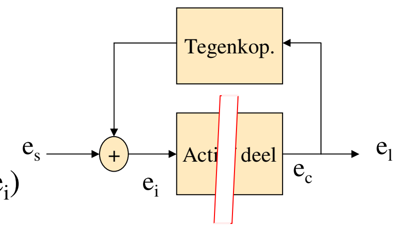
$$e_l = H(e_s, e_c) = H_1 e_s + H_2 e_c$$

Uitgangssignaal wordt bepaald door bronsignaal en door signaal afkomstig van actief deel

# Superpositie III

Expliciet maken van tegenkoppeling:

1. Breek de tegenkoppellus ($e_i$)
2. Gebruik superpositie
3. Sluit de tegenkoppellus ($e_c = Ae_i$)




breken lus



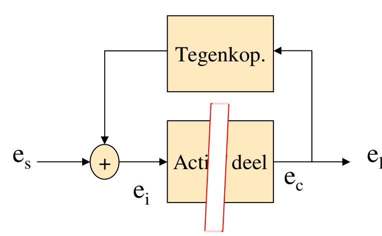
# Superpositie IV

Superpositie $e_l$

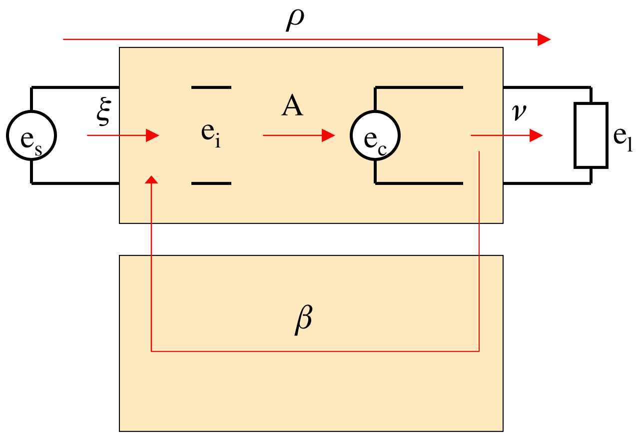
$$e_l = \rho e_s + \nu e_c$$
$$e_i = \xi e_s + \beta e_c$$
$$e_c = Ae_i$$

Superpositie $e_i$

sluiten lus



# Superpositie V






# Superpositie VI

$$A_t = \frac{e_l}{e_s} = \rho + \frac{\nu\xi A}{1-\underbrace{A\beta}}$$

overdracht

directe overdracht (zonder actief deel)

lusversterking

# Stap naar synthese

**Synthese volgorde**:
-tegenkoppelnetwerk (in- en uitgangsgrootheden, overdracht)
waarbij het actieve deel een nullor is!
-nullorinvulling (ruis, distorsie, bandbreedte)



# Asymptotic-gain model I

**Synthese volgorde**:
-tegenkoppelnetwerk (in- en uitgangsgrootheden, overdracht)
-nullorinvulling (ruis,distorsie,bandbreedte)

$$A_{t\infty} = \lim_{A\beta \to \infty} A_t = \rho - \frac{\nu\xi}{\beta}$$

Actief deel is een nullor

tegenkoppelnetwerk

# Asymptotic-gain model II

$$A_t = \frac{e_l}{e_s} = A_{t\infty}\frac{-A\beta}{1-A\beta} + \underbrace{\rho\frac{1}{1-A\beta}}$$

Vaak verwaarloosbaar
$\rho$ ook wel $A_{t0}$

- $A_{t\infty}$ versterking als actief deel nullor
- $A_{t0}$ versterking zonder actief deel



# Tegenkoppeling als ontwerpgereedschap

$$A_t = \boxed{A_{t\infty}}\boxed{\frac{-A\beta}{1-A\beta}}$$

tegenkoppelnetwerk nullorinvulling

Stap 1: ontwerp de gewenste overdracht ($A_{t\infty}$) met $A\beta = \infty$

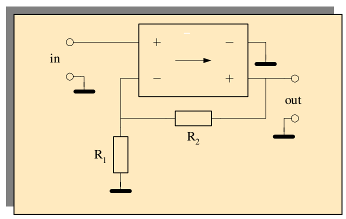
Stap 2: ontwerp nullor z.d.d. nauwkeurigheid $A_t$ goed genoeg is ($A\beta$ groot genoeg)

# Bepaling asymptotic gain

Asymptotic gain : stel $A\beta = \infty$

⇨ Actieve deel is een nullor

⇨ Gebruik nullor voorwaarden





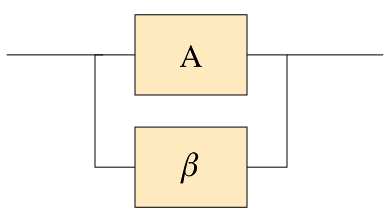

# Bepaling lusversterking I

**Via definitie (A en $\beta$):**

$$e_l = \rho e_s + \nu e_c$$
$$e_i = \xi e_s + \beta e_c$$
$$e_c = A e_i$$

⇨

$$A = \frac{e_c}{e_i}$$
$$\beta = \left.\frac{e_i}{e_c}\right|_{e_s=0}$$



# Bepaling lusversterking II

**Direct in z'n geheel:**

Van belang voor ontwerp:
•Asymptotic gain
•Lusversterking (en niet A en $\beta$ afzonderlijk)

$$A_t = A_{t\infty}\frac{-L}{1-L}$$

($L$ is de lusversterking)

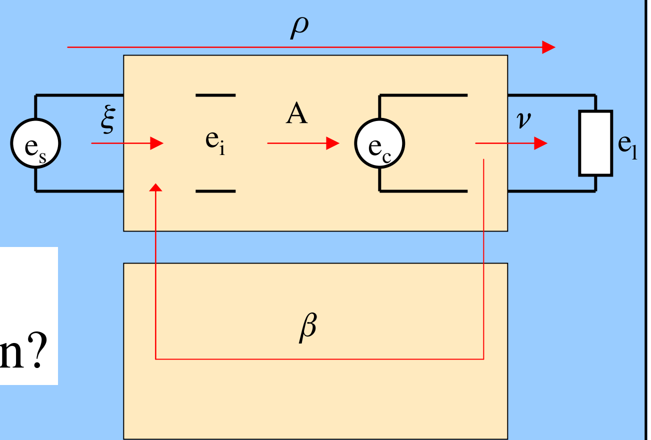
1. Kies startpunt,
2. Bereken de overdracht via de lus terug naar startpunt : $L$

Deze methode dichtst tegen het ontwerp aan.

Berekening lusversterking vergt breken van de lus

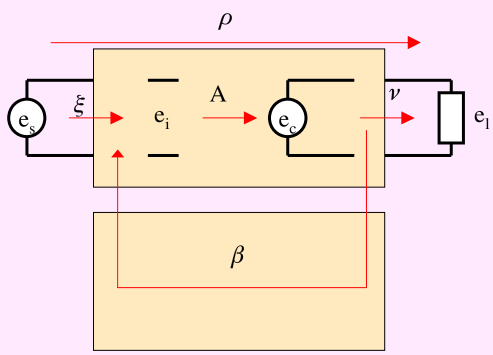


# Breken van de lus




Hoe ?
Waar opletten?

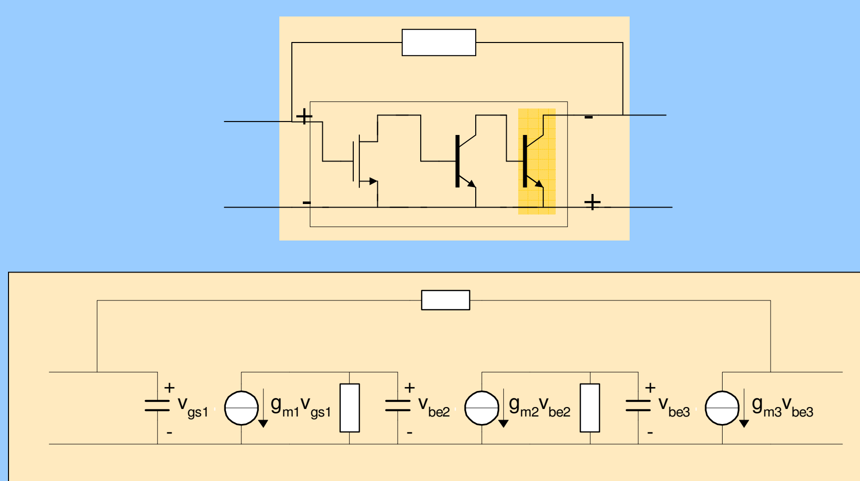
Bij breken van de lus mag de topologie niet wijzigen.




$e_c$ is een gestuurde bron ⇨ veronderstel bron onafhankelijk

⇨ Lus gebroken zonder dat topologie gewijzigd is!

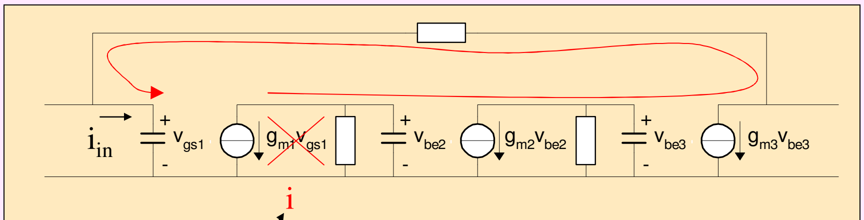





Waar kan de lus correct doorgeknipt worden?

Uitgangspunt: voor L=∞ moet $A_{t\infty}$ volgen!

⇨ Nullorvoorwaarden moeten ontstaan aan de ingang




Lus gebroken

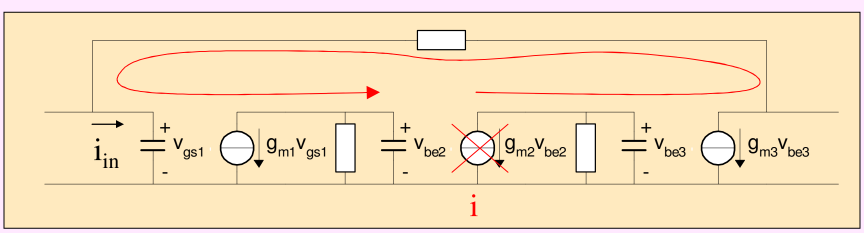
$$H_1 = \frac{v_{gs}}{i}$$

Lusversterking: $L=H_1 g_{m1}$

⇨ Voor $g_{m1}= \infty$ geldt $L= \infty$

⇨ Voor eindige $g_{m1}v_{gs1}$ geldt $v_{gs1}$=0 en $i_{in}$=0: de nullorvoorwaarden






Lus gebroken

$$H_2 = \frac{v_{be2}}{i}$$

Lusversterking: $L=H_2 g_{m2}$

⇨ Voor $g_{m2}= \infty$ geldt $L= \infty$

⇨ Voor eindige $g_{m2}v_{gs2}$ geldt $v_{gs2}$=0 en dus geldt $v_{gs1}$=0, $i_{in}$=0 : de nullorvoorwaarden

Zo ook voor de derde transistor!

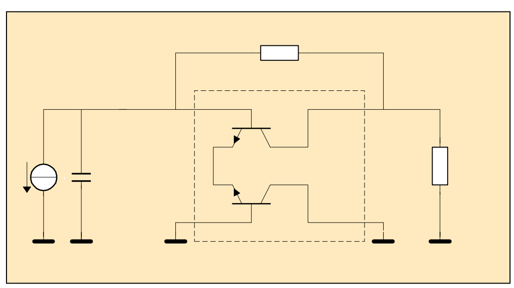
Criterium in ander woorden:

Voor het breken van de lus mogen die gestuurde bronnen gebruikt worden waarvoor geldt dat als de *constitutieve coëfficiënt* ∞ wordt, de nullorvoorwaarden aan ingang van de nullorinvulling ontstaan.

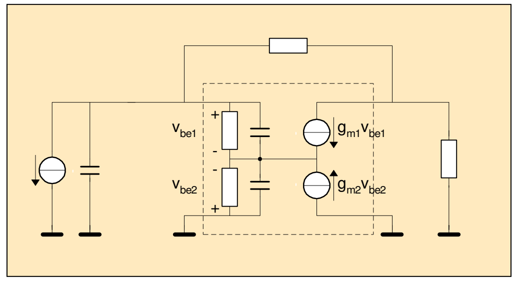


# Onjuist breken van de lus

**Signaalschema:**



## Klein-signaalschema:



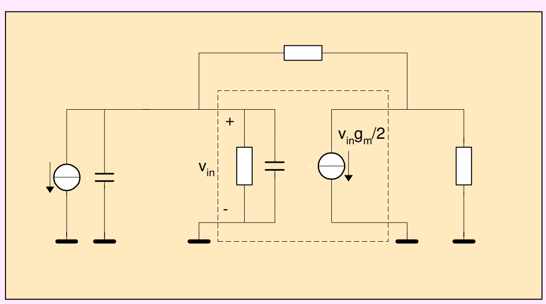

Als $g_{m1} = \infty$ dan $v_{be1}=0$ voor eindige uitgangsstroom

⇨ $v_{be2} \neq 0$ want $g_{m2} \neq \infty$

⇨ geen nullorvoorwaarden aan de ingang

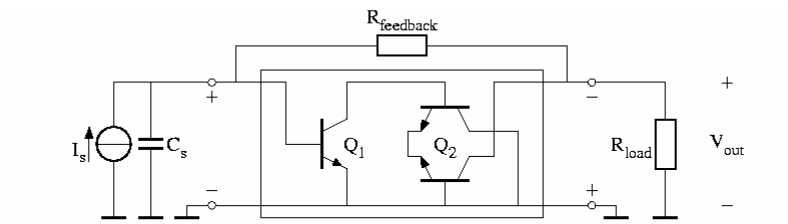
Hoe dan de lusversterking berekenen?






$g_m = \infty$ geeft nullorvoorwaarden aan de ingang

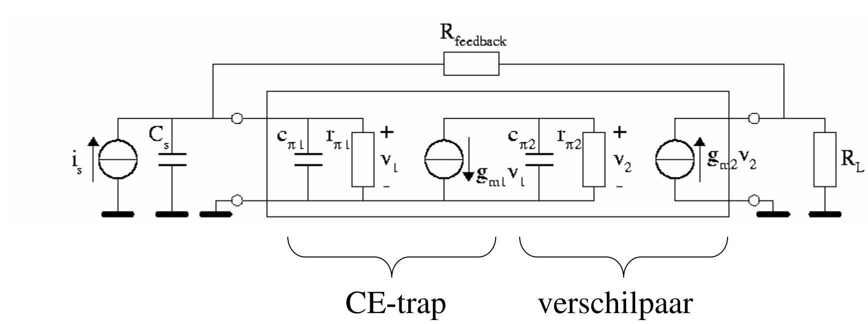
# Voorbeeld

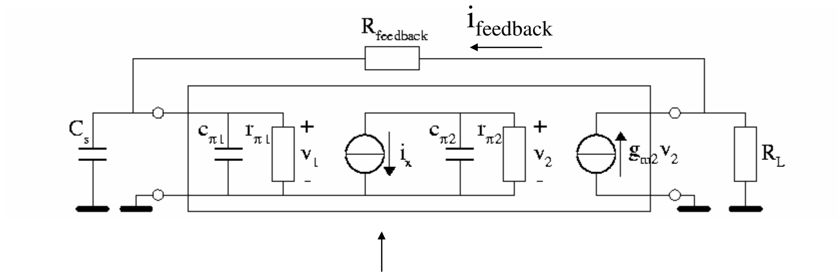



Bepaal van deze versterker de lusversterking als functie van f.



**Bijbehorende klein-signaalschema:**






Onafhankelijk verondersteld voor het breken van de lus

Lusversterking: $L = \dfrac{v_1}{i_x} g_{m1}$

$\boxed{\text{Kan vaak via inspectie m.b.v. stroomdelingen:}}$



$$v_2 = -i_x \frac{r_{\pi 2}}{1 + s r_{\pi 2} C_{\pi 2}}$$

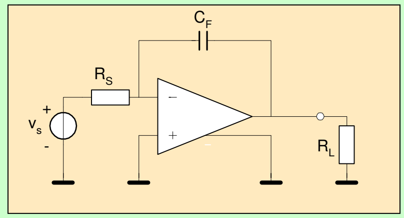
$$i_{feedback} = g_{m2} v_2 \frac{R_L}{R_L + R_{feedback} + \dfrac{r_{\pi 1}}{1 + s r_{\pi 1}(C_s + C_{\pi 1})}}$$

$$v_1 = i_{feedback} \frac{r_{\pi 1}}{1 + s r_{\pi 1}(C_s + C_{\pi 1})}$$

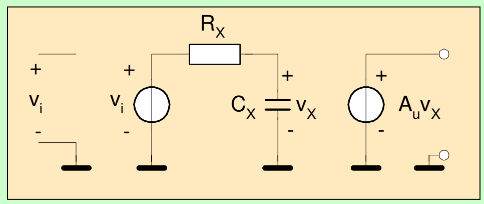
$$L(s) = \underbrace{\frac{-\beta_1 \beta_2 R_L}{r_{\pi 1} + R_L + R_{feedback}}}_{\text{DC lusversterking}} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + s r_{\pi 2} C_{\pi 2}}}_{\text{pool}} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + s \dfrac{r_{\pi 1}(R_L + R_{feedback})}{r_{\pi 1} + R_L + R_{feedback}} \cdot (C_s + C_{\pi 1})}}_{\text{pool}}$$

# Oefening

Gegeven: $R_S$=1 kΩ
$C_F$=159 nF
$R_L$=10 kΩ




$R_X$= 1 kΩ
$C_X$= 8 $\mu$F
$A_U$= $-10^5$




Klein-signaal model opamp



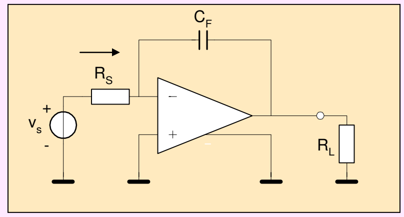
Gevraagd:

1. $A_{t\infty}$
2. L(s) (ofwel A$\beta$(s))

Met behulp van 1 en 2

3. de positie van de integrator pool
4. de bandbreedte

$A_{t\infty}$ : Stel opamp is een nullor




$$\Rightarrow \quad i_{R_S} = v_S / R_s$$

$$\Rightarrow \quad i_{C_F} = i_{R_S}$$

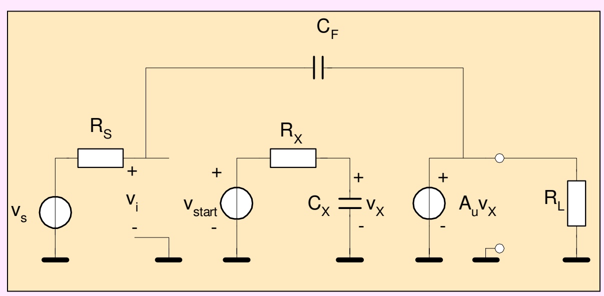
$$\Rightarrow \quad v_{R_L} = \frac{-i_{R_S}}{sC_F}$$

$$\Rightarrow \quad A_{t\infty} = \frac{v_{R_L}}{v_s} = -\frac{1}{sR_S C_F}$$



**Klein-signaal schema:**

(voor berekening L)




$$\Rightarrow \quad v_x = \frac{1}{1 + sR_X C_X} v_{start}$$

Onafhankelijk verondersteld

$$\Rightarrow \quad v_i = \frac{sR_S C_F}{1 + sR_s C_F} A_U v_x$$

$$\Rightarrow \quad L(s) = A_U \cdot \frac{1}{1 + sR_X C_X} \cdot \frac{sR_S C_F}{1 + sR_s C_F}$$

Hoe groot is de DC lusversterking?

$$A_t = A_{t\infty} \frac{-L(s)}{1-L(s)}$$

$\tau_1 = R_S C_F$
$\tau_2 = R_X C_X$

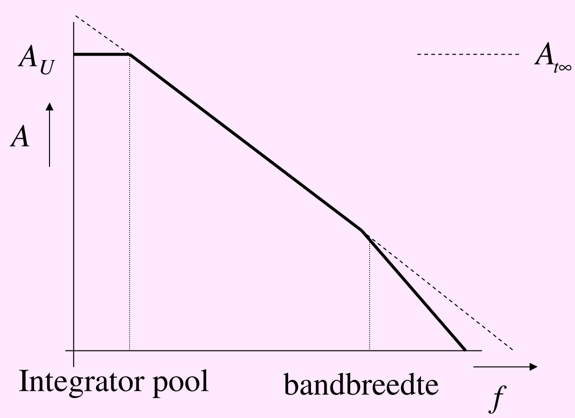
Invullen geeft:

$$A_t = \frac{-1}{s\tau_1} \cdot \frac{-s\tau_1 A_U}{s^2\tau_1\tau_2 + s(\tau_1 + \tau_2 - \tau_1 A_U) + 1}$$

Herschrijven geeft:

$$A_t \approx \frac{A_U}{s\tau_1(1-A_U)+1} \cdot \frac{1}{\frac{s\tau_2}{1-A_U}+1}$$






$$A_t \approx \frac{A_U}{s\tau_1(1-A_U)+1} \cdot \frac{1}{\frac{s\tau_2}{1-A_U}+1}$$

Integratorpool ligt op :

$$p_{\text{int}} \approx \frac{-1}{2\pi R_S C_F (1 - A_U)} \approx -10 \text{ mHz}$$

Bandbreedte :

$$B \approx \frac{1 - A_U}{2\pi R_X C_X} \approx 2 \text{ MHz}$$

(Bandbreedte is ongeveer bandbreedte opamp maal z'n DC versterking)