



Meet- en Regeltechniek

Les 10: Speciale regelstructuren

Prof. dr. ir. Toon van Waterschoot

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

ESAT – Departement Elektrotechniek

KU Leuven, Belgium



Meet- en Regeltechniek: Vakinhoud

- **Deel 1: Systeemtheorie**

- Les 1: Inleiding en modelvorming
- Les 2: Systemen van eerste orde
- Les 3: Systemen van tweede & hogere orde en met dode tijd

- **Deel 2: Analoge regeltechniek**

- Les 4: De regelkring
- Les 5: Het wortellijnendiagram
- Les 6: Oefeningen wortellijnendiagram
- Les 7: De klassieke regelaars
- Les 8: Regelaarontwerp + oefeningen
- Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling
- Les 10: Speciale regelstructuren
- Les 11: Niet-lineaire regeltechniek & aan-uit regelaars

- **Deel 3: Digitale regeltechniek**

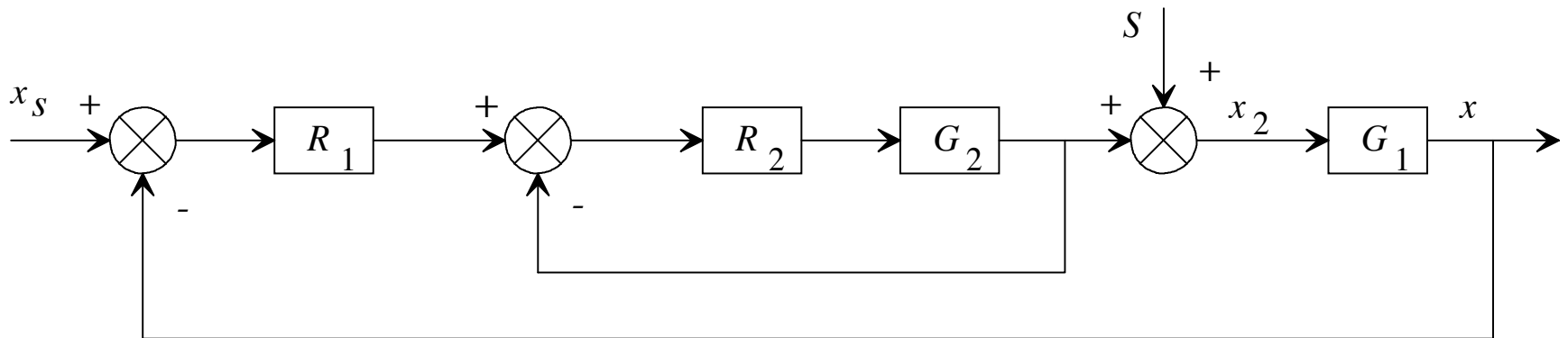
- Les 12: Het discreet systeemgedrag & het discreet equivalent
- Les 13: De discrete regelkring & de toestandsregelaar

Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderegeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

Cascaderegeling (1)

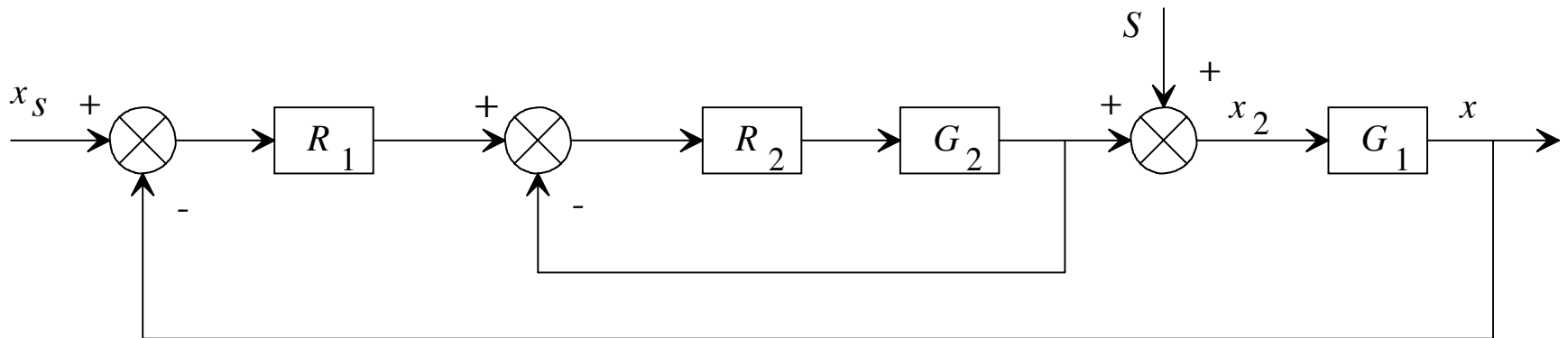
- **Cascaderegeling = “master-slave”-regeling**
 - geneste combinatie van twee regelkringen
 - toepasbaar wanneer systeem toelaat om **intern signaal** te meten en terug te koppelen
 - “master”-regelaar = buitenste regelaar regelt op uitgang
 - “slave”-regelaar = binnenste regelaar regelt op intern signaal



Cascaderegeling (2)

- **Cascaderegeling 1**

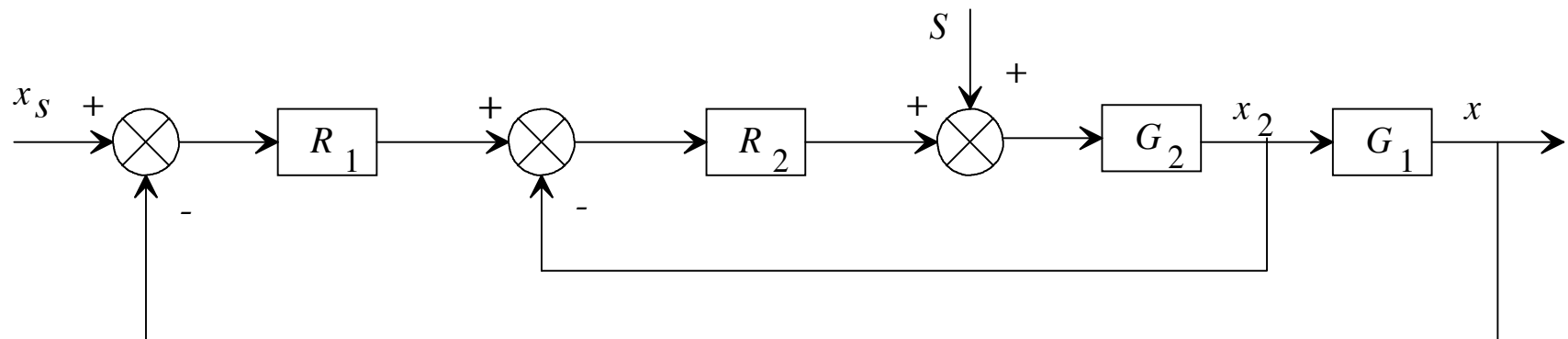
- setwaarde slave-regelaar = uitgang master-regelaar
- intern signaal is vrij van storing
- belangrijkste voordeel:
 - secundaire lus kan tijdsconstante systeem G_2 verkleinen
 - daardoor kan hoofdlus hogere responsnelheid hebben



Cascaderegeling (3)

- **Cascaderegeling 2**

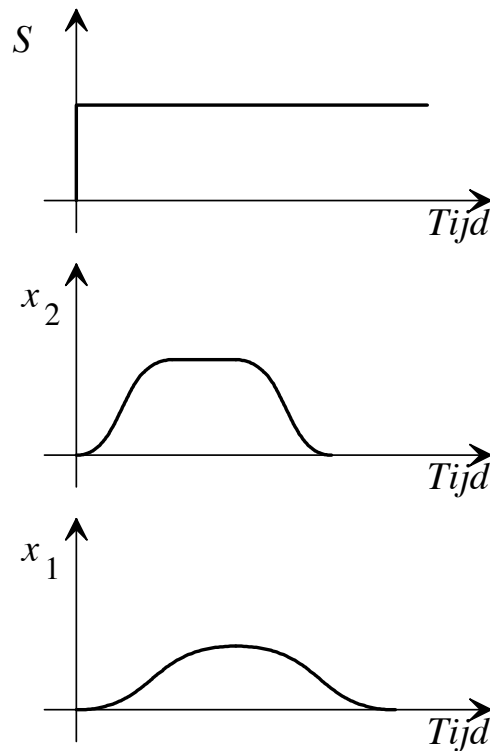
- setwaarde slave-regelaar = uitgang master-regelaar
- intern signaal bevat stoorsignaal
- belangrijkste voordeel:
 - invloed stoorsignaal is sneller “meetbaar” in intern signaal
 - slave-regelaar kan stoorsignaal dus sneller compenseren
 - daardoor wordt invloed stoorsignaal op hoofdlus verminderd



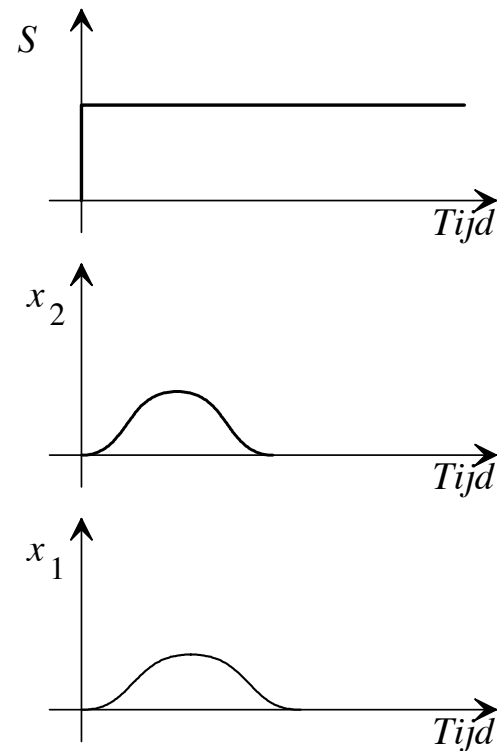
Cascaderegeling (4)

- **Cascaderegeling 2**

- illustratie van verschil in gevoeligheid aan storingen



a) Zonder secundaire lus



b) Met secundaire lus

Cascaderegeling (4)

- **Regelaarsinstelling**

- cascaderegeling wordt ingesteld in twee stappen:
 1. instelling slave-regelaar
 2. instelling master-regelaar
- volgorde van deze twee stappen moet gerespecteerd worden

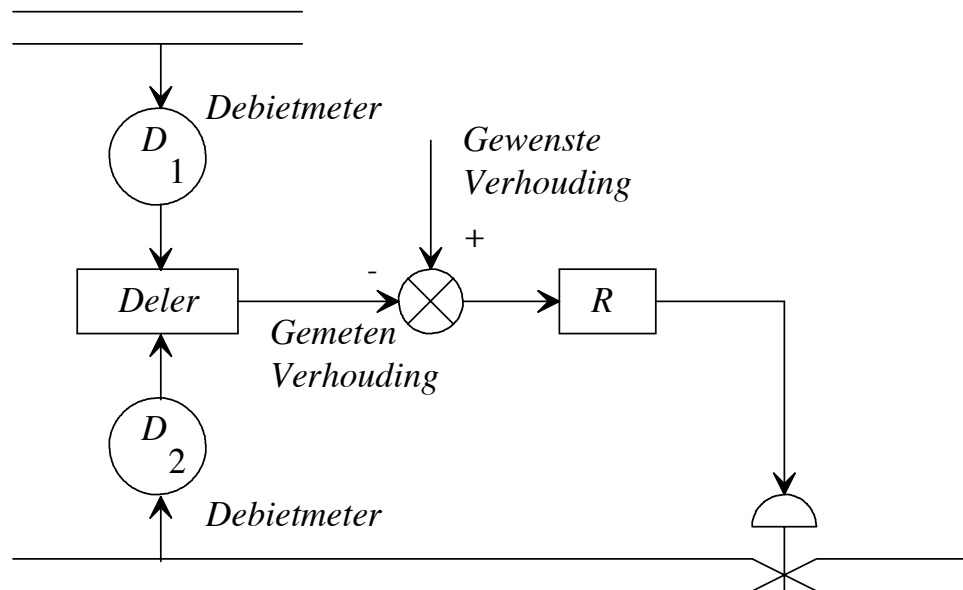
Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderегeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

Verhoudingsregeling

- **Verhoudingsregeling**

- regelschema om **verhouding** van twee uitgangssignalen te regelen
- speciale vorm van voorwaartse regeling (zie later)
- toepassing: regeling van twee debietstromen



Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderегeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

Split-range-regeling (1)

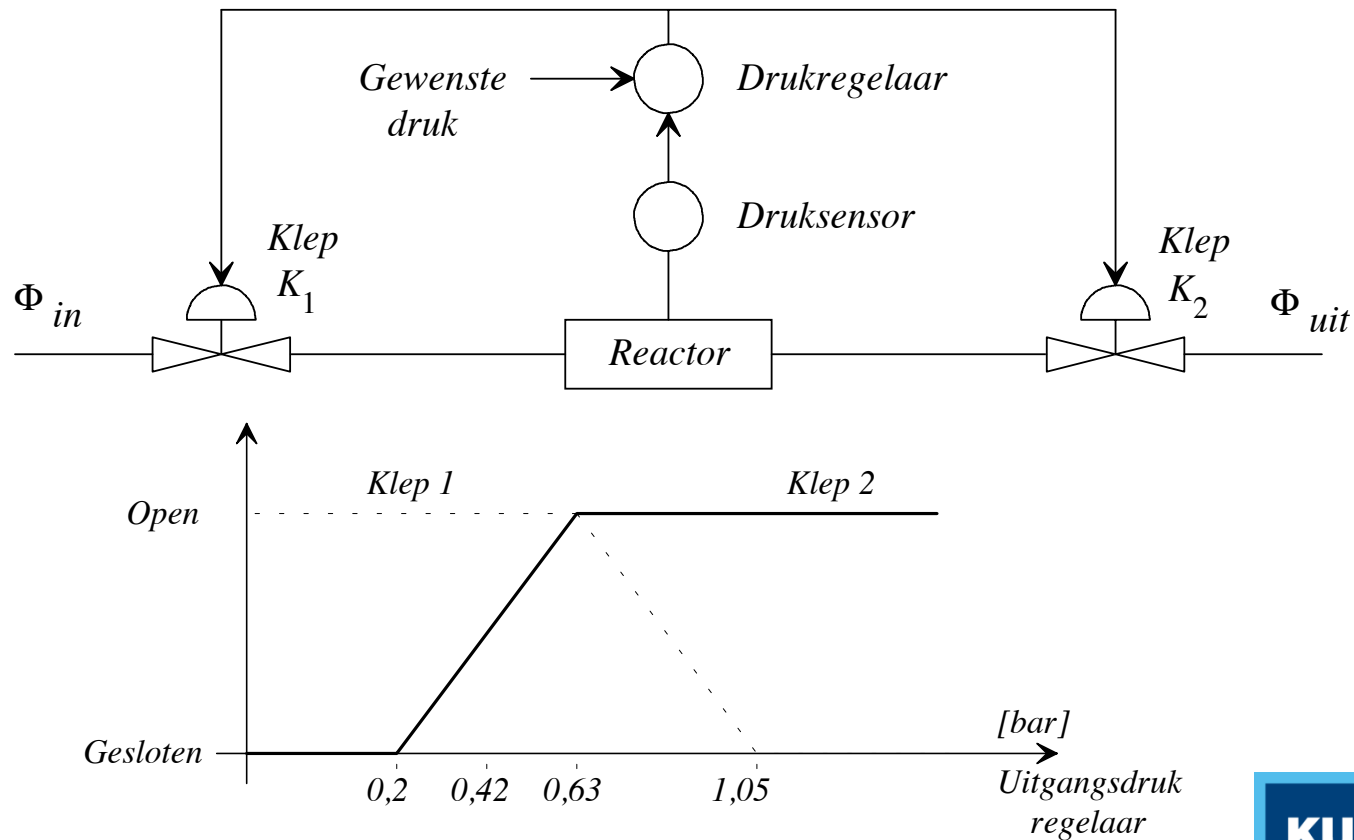
- **Split-range-regeling**

- regeling met 1 geregelde grootheid (uitgangssignaal) en meerdere regelende grootheden (ingangssignalen)
- regelsignaal wordt gesplitst en naar meerdere regelorganen gestuurd

Split-range-regeling (2)

- **Voorbeeld**

- drukregeling reactorvat m.b.v. toevoer- & afvoerkleppen



Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderегeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

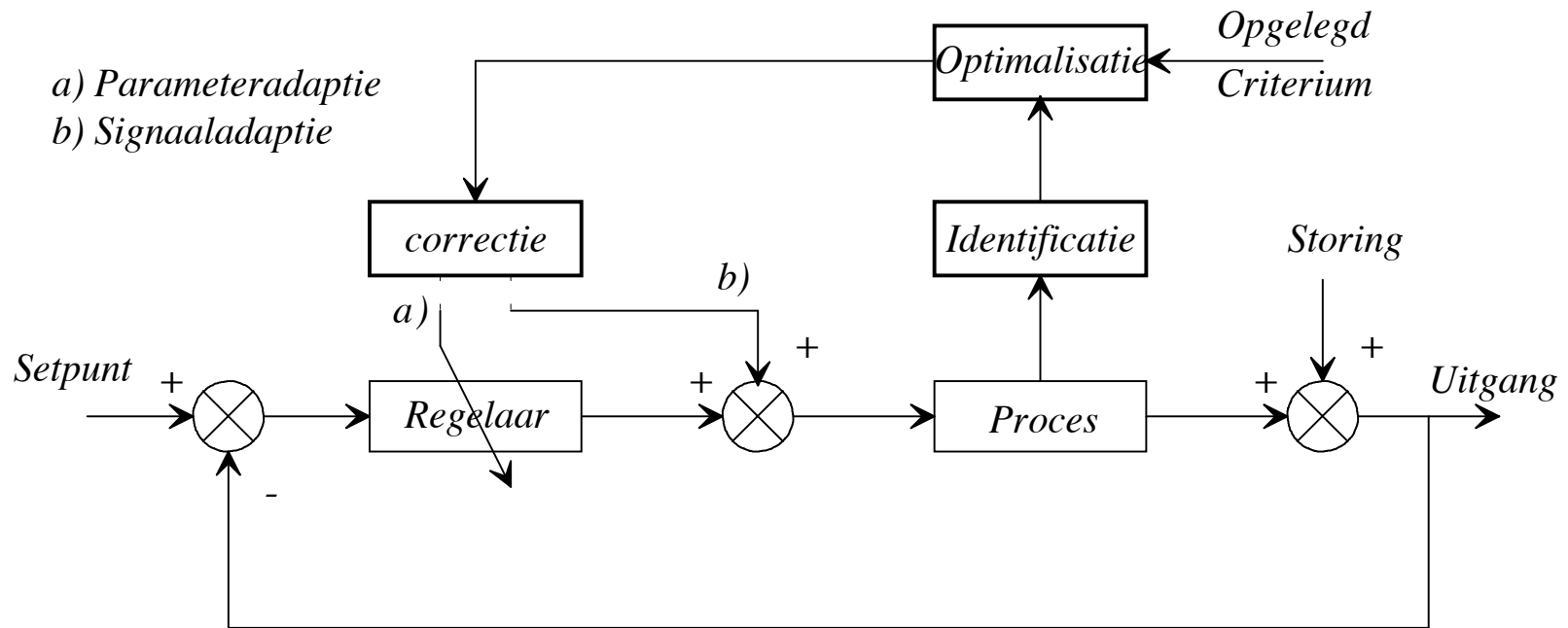
Adaptieve regeling (1)

- **Adaptieve regeling**
 - regeling die zich aanpast aan omstandigheden
 - regelparameters of stuursignalen worden adaptief bijgesteld
- **Toepassingen**
 - niet-lineaire processen met veranderend werkingspunt
 - tijdsvariante systemen
- **Werkingsprincipe**
 - identificatie van proces-/systeeminformatie
 - optimalisatie van kostencriterium dat verschil tussen geïdentificeerd en opgelegd systeemgedrag minimaliseert
 - optimale correctie d.m.v. parameter- of signaaladaptatie

Adaptieve regeling (2)

- **Werkingsprincipe**

- algemeen schema adaptieve regeling



- “primaire lus” = normale regellus: snel maar niet flexibel
- “secundaire lus” = adaptatie: flexibel maar traag

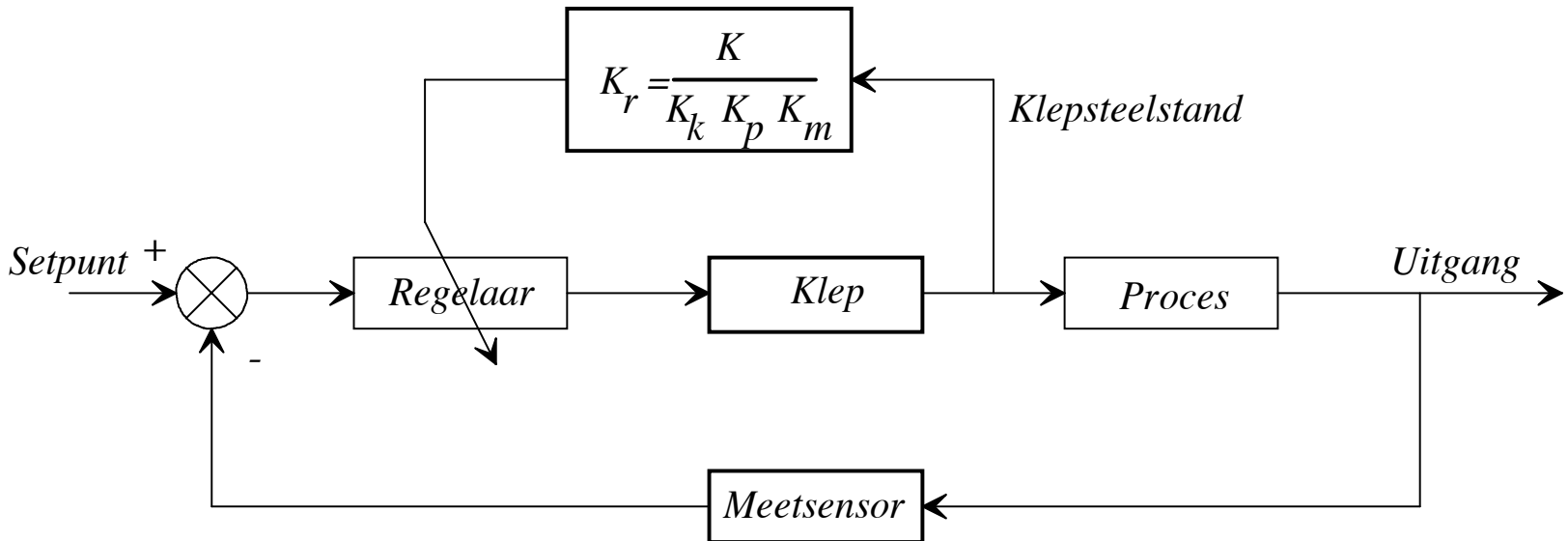
Adaptieve regeling (3)

- **Twee types adaptieve regeling**

- **Gain Scheduling System**: totale openlusversterking wordt constant gehouden door statische versterking van proces te identificeren en P-actie regelaar aan te passen (enkel parameteradaptatie)
- **Model Reference Adaptive System (MRAS)**: setwaarde wordt parallel aangelegd aan echt systeem en aan referentiemodel, fout op procesuitgang stuurt aanpassing regelparameters (parameteradaptatie) of toevoeging extra stuursignaal (signaaladaptatie)

Adaptieve regeling (4)

- **Voorbeeld (Gain Scheduling System):**
 - niet-lineariteiten van klepkarakteristiek zorgen voor veranderende statische versterkingsfactor van klep
 - indien K_k gekend is voor elke klepstand, kan constante openlusversterking K bekomen worden voor volledig regelbereik, door versterking regelaar K_r te kiezen als volgt:



Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderегeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

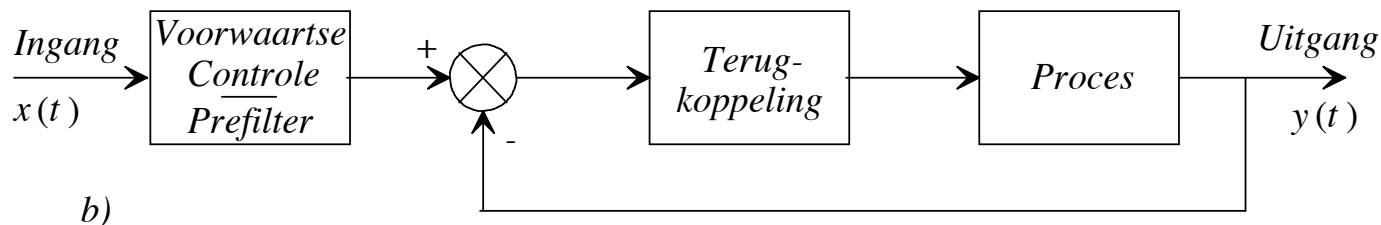
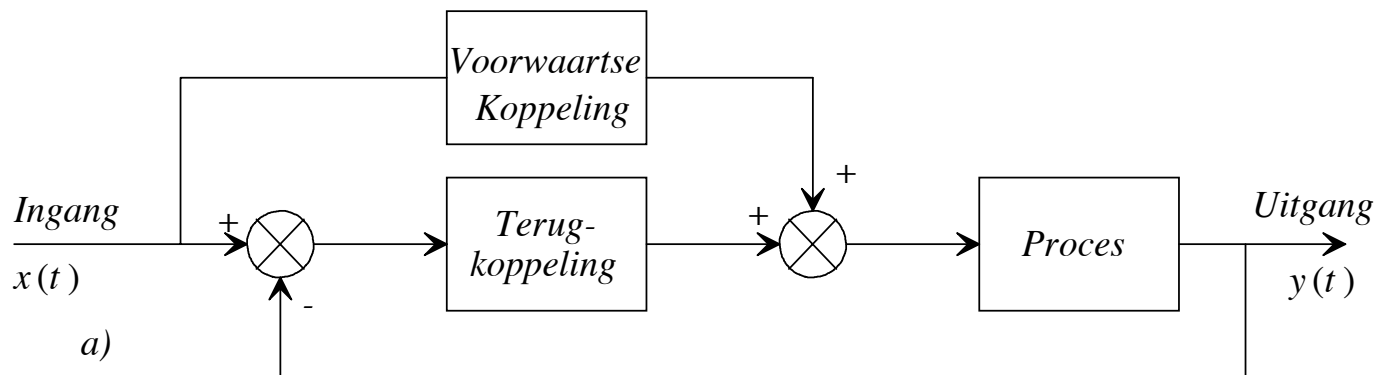
Regeling met voorwaartse koppeling (1)

- **Voorwaartse koppeling = “feed forward”**
- **Doel:**
 - reductie of eliminatie van **volgfouten** op basis van
 - gekende systeemdynamica of
 - gewenst uitgangsverloop
 - nadelen van regeling met terugkoppeling vermijden:
 - onvolledige verwijdering van volgfouten
 - wijziging systeemdynamica (met mogelijk instabiliteit)

Regeling met voorwaartse koppeling (2)

- **Twee implementaties**

- toevoegen van extra stuursignaal (voorwaarts gekoppeld ingangssignaal)
- prefiltering van ingangssignaal



Regeling met voorwaartse koppeling (3)

- **Ontwerpmethode 1: invers dynamisch model**

- prefilter = invers dynamisch model van gesloten regellus

$$G_{ff} = 1/G_{gl} \Rightarrow G_{ff}G_{gl} = 1$$

- niet altijd mogelijk aangezien niet-minimum-fase nulpunten in G_{gl} (nulpunten in rechterhalfvlak) leiden tot onstabiele polen in G_{ff} (polen in rechterhalfvlak)

- **Voorbeeld:**

- servomotor met tacho-terugkoppeling en P-regelaar K_p
- geslotenlus TF (massa m , wrijving b , terugkoppeling K_t):

$$G_{gl} = \frac{K_p}{mp^2 + (b + K_t)p + K_p}$$

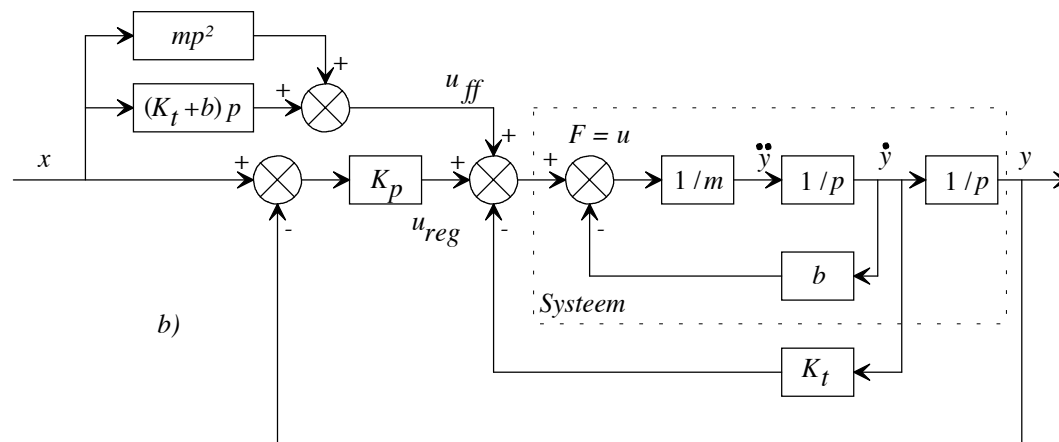
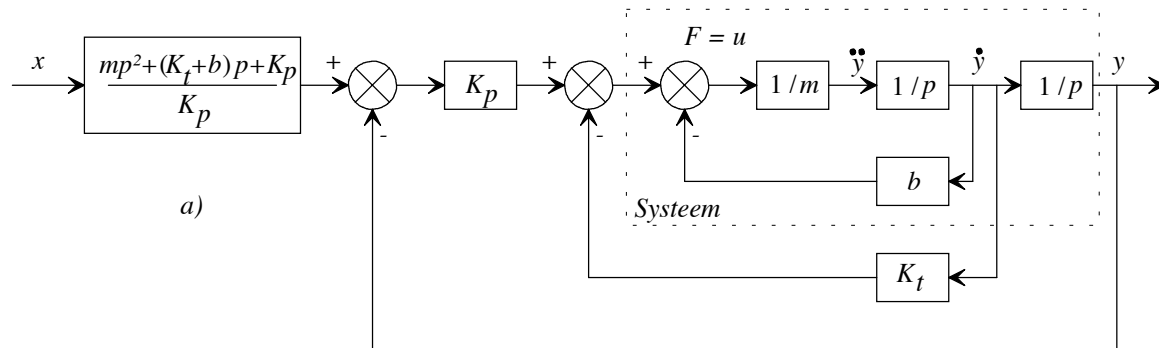
- prefilter TF: $G_{ff} = \frac{mp^2 + (b + K_t)p + K_p}{K_p}$

Regeling met voorwaartse koppeling (4)

- **Voorbeeld:**

- a) implementatie met prefilter

- b) implementatie via expliciete voorwaartse stuursignalen



Regeling met voorwaartse koppeling (5)

- **Ontwerpmethode 2: statische foutenanalyse**
 - alternatief indien Ontwerpmethode 1 onstabiel prefilter geeft
 - berekening van extra stuursignaal dat volg- of versnellingsfouten compenseert

- **Voorbeeld (servomotor):**

- berekening **volgfout** a.h.v. ingang = rampfunctie helling V

$$\text{volgfout} = \frac{K_t + b}{K_p} V$$

- compensatie met voorwaarts stuursignaal $u_{ff} = (K_t + b)p$

- berekening **versnellingsfout** a.h.v. ingang = parabool

$$\text{versnellingsfout} = \frac{m}{K_p} a$$

- compensatie met voorwaarts stuursignaal $u_{ff} = mp^2$

Les 10: Speciale regelstructuren

- **Speciale regelstructuren** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 7]
 - Cascaderegeling
 - Verhoudingsregeling
 - “Split range”-regeling
 - Adaptieve regeling
 - Regeling met voorwaartse koppeling (“feed forward”)
 - De corrector van Smith: Regeling van processen met een aanzienlijke dode tijd

Corrector van Smith (1)

- **Probleemstelling:**

- PID-regelaar faalt bij proces waarbij tijdsconstante \approx dode tijd
- PID-regelaar vertoont opslinging hoewel systeem zelfregelend is
- voorbeeld: eerste-orde systeem met openlus TF

$$TF_{open} = \frac{K_r e^{-pt_0}}{1 + p\tau}$$

t_0/τ [sec/sec]	K_r	ω_{180° [rad/sec]
0,01 / 0,5	79,20	158,30
0,1 / 0,5	8,50	16,90
1 / 0,5	1,52	2,30



versterking waarop systeem instabiel wordt

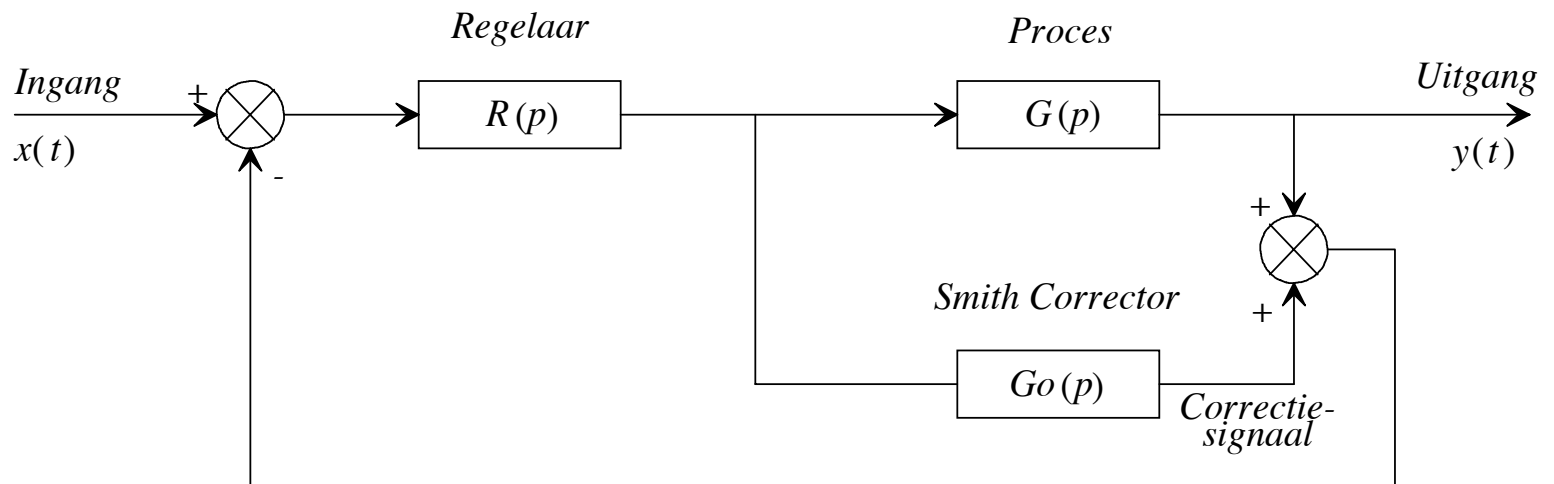


bandbreedte

Corrector van Smith (2)

- **Principe:**

- regelsignaal wordt voorwaarts gekoppeld en vormt correctie op teruggekoppeld uitgangssignaal
- correctie moet dode tijd van proces compenseren
- kennis van TF systeem is vereist!

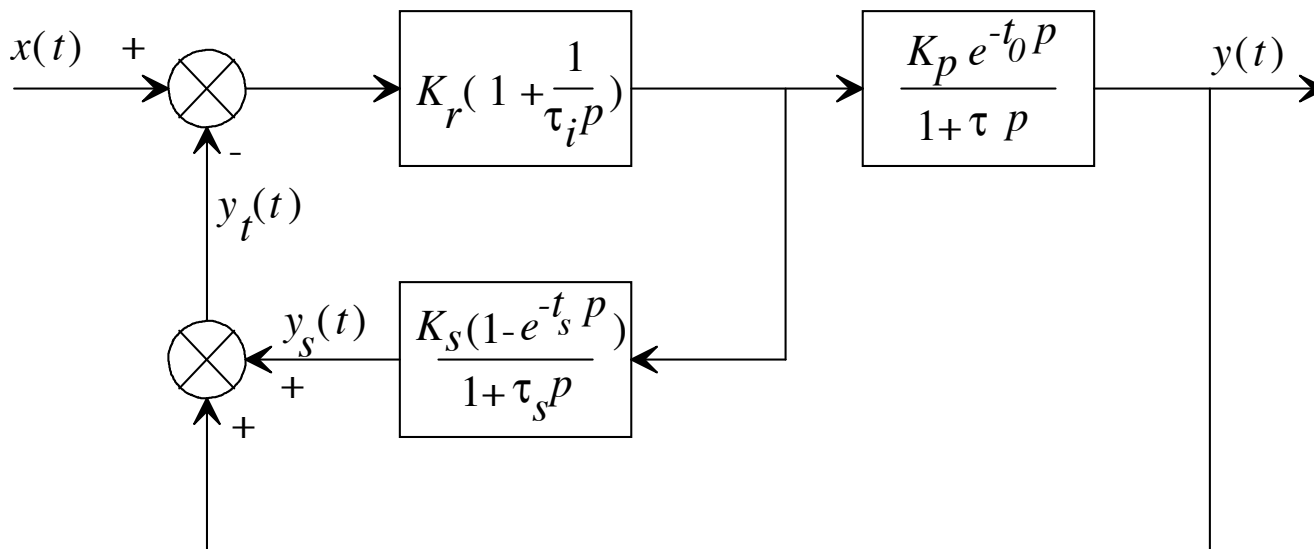


Corrector van Smith (3)

- **Voorbeeld:**

- eerste-orde systeem met PI-regelaar en corrector:

$$TF_{open} = \underbrace{K_r \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right)}_{\text{PI-regelaar}} \underbrace{\left(\frac{K_p e^{-t_0 p}}{1 + \tau p} \right)}_{\text{systeem}} \underbrace{\left(\frac{K_s (1 - e^{-t_s p})}{1 + \tau_s p} \right)}_{\text{corrector}}$$



Corrector van Smith (4)

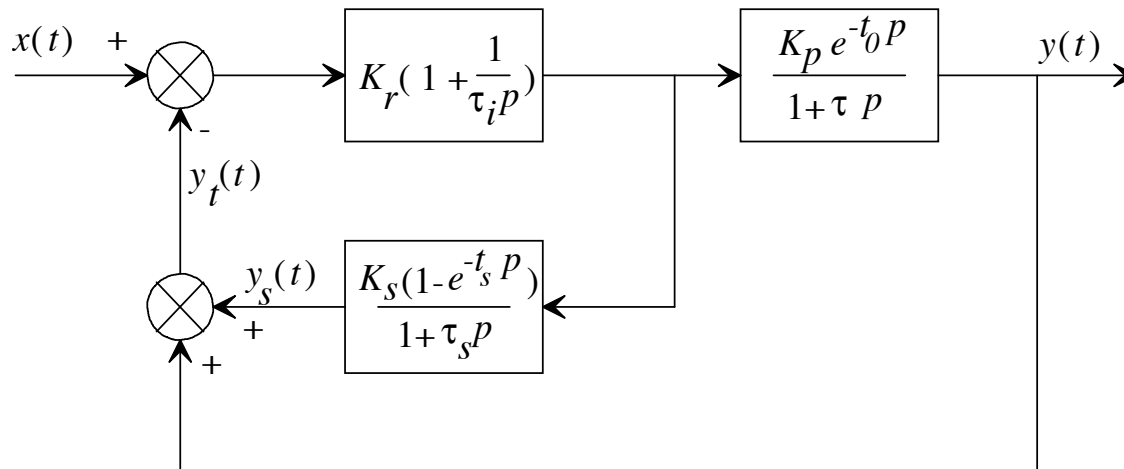
- **Voorbeeld:**

- ontwerp corrector: $K_s = K_p, \tau_s = \tau, t_s = t_0$

$$\Rightarrow TF_{open} = K_r \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \left(\frac{K_p}{1 + \tau p} \right)$$

- dode tijd is geëlimineerd!

- ontwerp PI-regelaar: $\tau_i = \tau, K = K_p K_r \Rightarrow T_{gl} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{K} p}$



Corrector van Smith (5)

- **Voorbeeld:**
 - staprespons met en zonder corrector:

