FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
EN ARCHITECTUUR

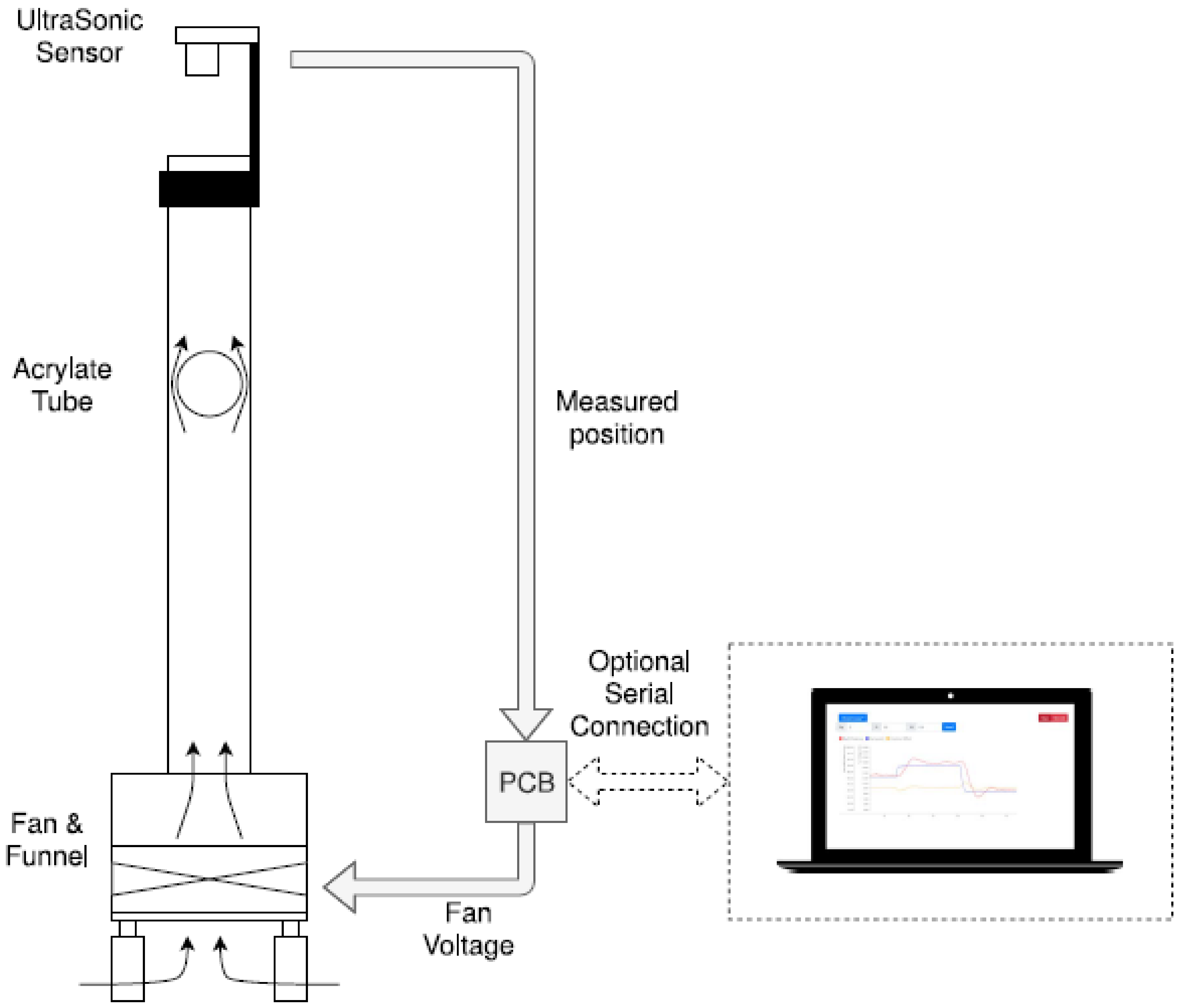
VAKGROEP ELEKTROMECHANICA, SYSTEEM- EN METAALENGINEERING
ONDERZOEKSGROEP DYNAMICAL SYSTEMS AND CONTROL

# CONTROL@SYMO

Kevin Dekemele    Jasper Juchem    Mia Loccufier

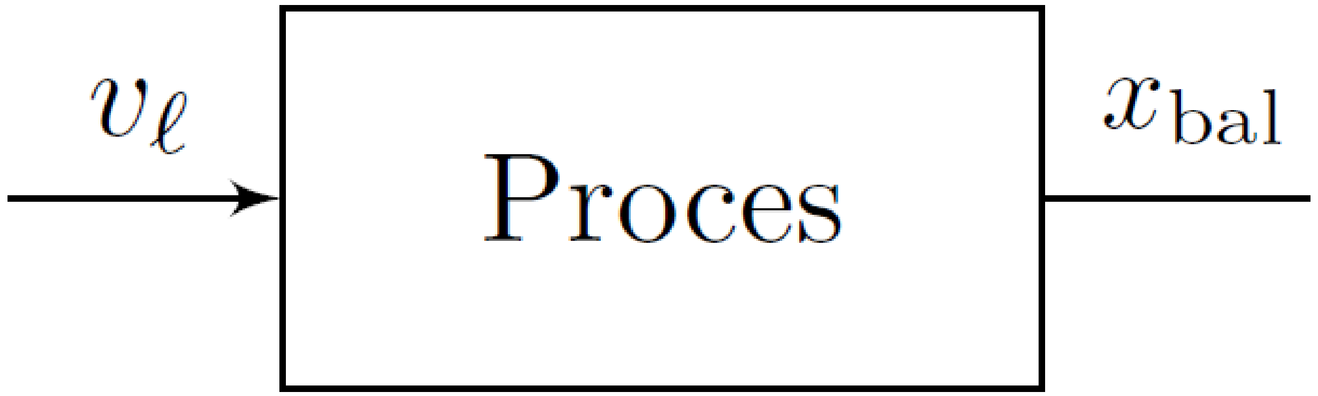
UNIVERSITEIT
GENT

# LEVITATIE VAN EEN BAL



# IDEALE IN/UITGANG

= uitgang volledig door aanpasbare ingang



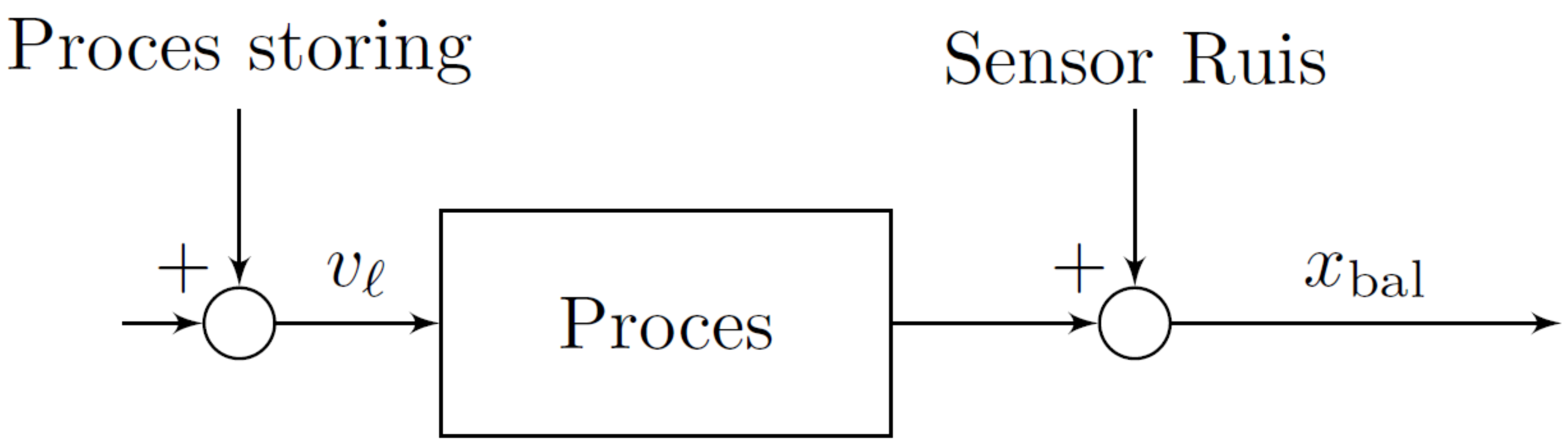

$$\text{Proces model:}\quad m\ddot{x} = -mg + c(v_\ell - \dot{x})^2$$

$$\text{Evenwicht:}\quad mg = cv_\ell^2$$

Moeilijk manueel $x_{\text{bal}}$ in te stellen omdat sturing de versnelling aanpast

(2x) Integrerend proces

# MEETRUIS
# PROCESS STORING

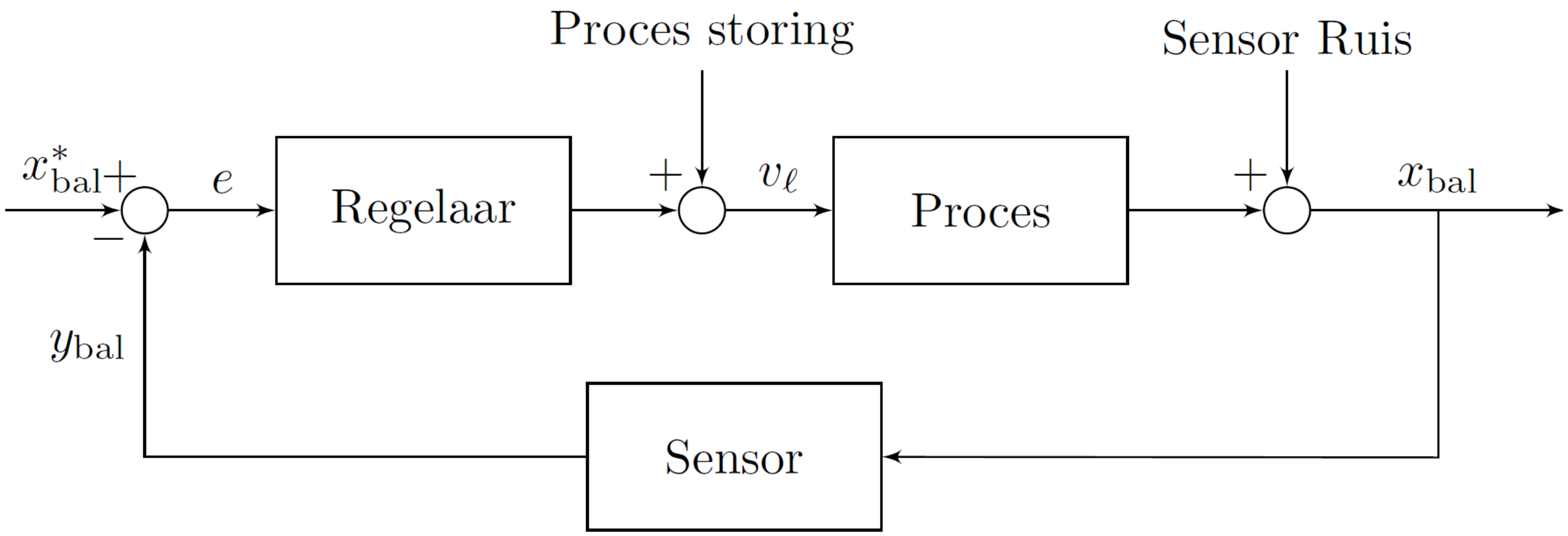



Proces storing: Extra ingang, mogelijks niet of indirect in de hand.

Sensor Ruis: Sensor nooit exact

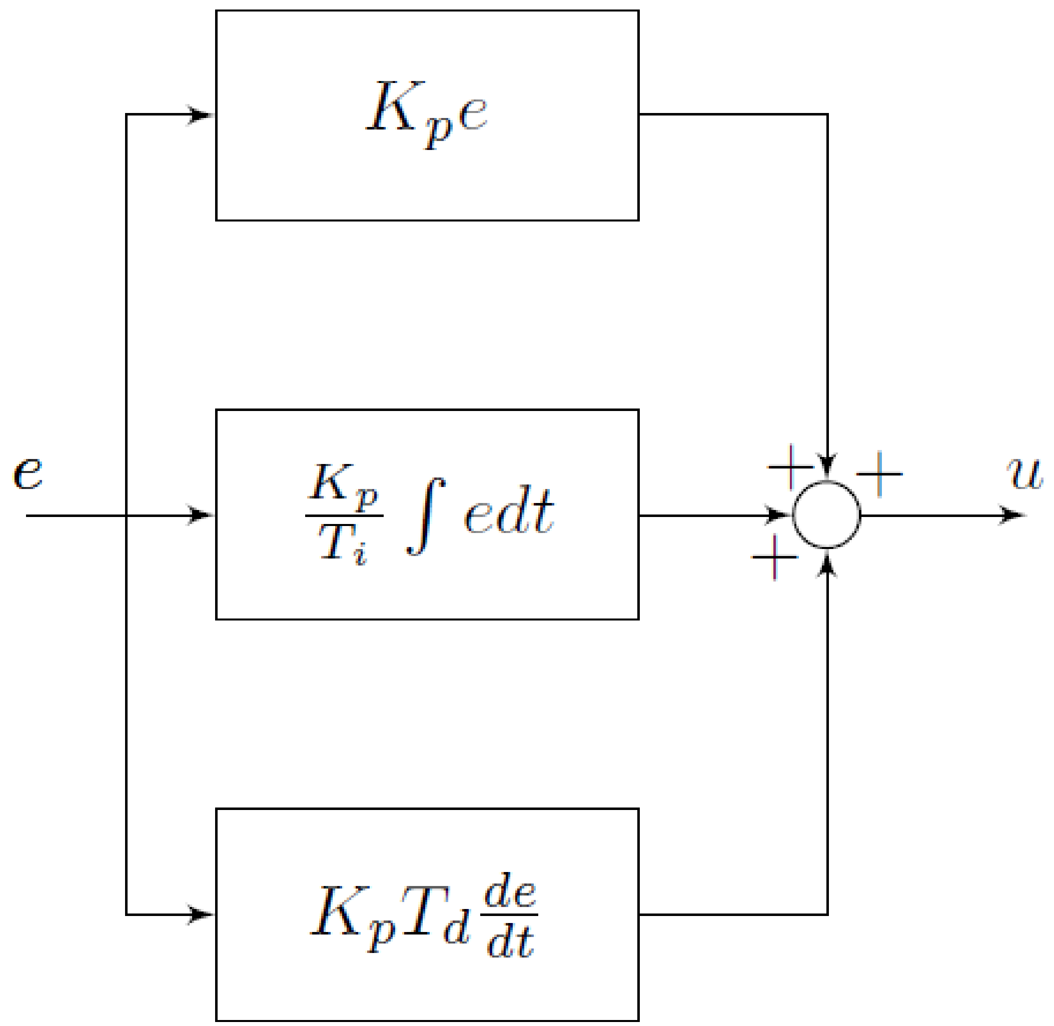
UNIVERSITEIT GENT

# TERUGKOPPELING EN REGELALGORITME




- Dynamica sensor: Meestal te verwaarlozen (veel sneller dan process)
- Regelalgoritme: Regel op basis verschil gewenste waarde (setpoint) en gemeten waarde (= error)
- Typisch (niet-optimale) regeling: aan/uit met dode band (centrale verwarming)

# TERUGKOPPELING EN REGELALGORITME




$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau+) + T_d\frac{de(t)}{dt}\right)$$

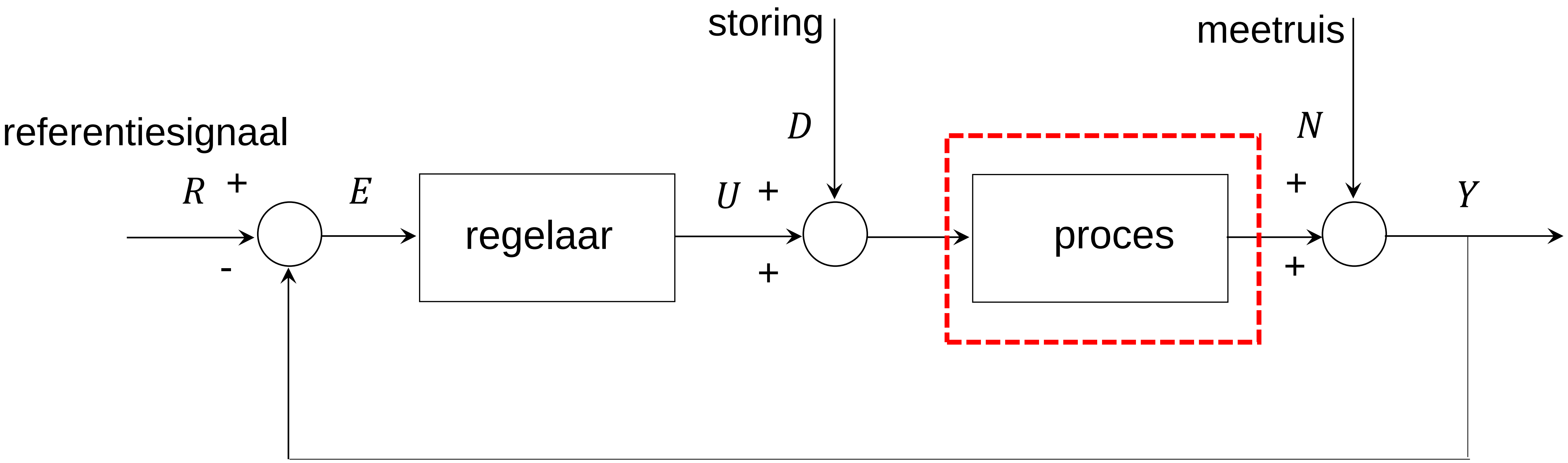
$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i}\sum_{i=0}^{n} e(i)t_s + T_d\frac{e(t)-e(t-t_s)}{ts}$$

- P: $K_p e(t)$ stuur zolang fout niet 0 is
- I: $\frac{K_p}{T_i}\sum_{i=0}^{n} e(i)t_s$ stuur zolang som fout niet 0 is
- D: $K_p T_d\frac{e(t)-e(t-t_s)}{ts}$ stuur zolang afgeleide fout niet 0 is

UNIVERSITEIT GENT

# KARAKTERISEREN VAN PROCESSEN

- Proces bepaalt te kiezen regelaar
- Wat is INGANG (gemanipuleerde variable), wat is UITGANG (gecontroleerde variabele)?
- Generieke types van processen

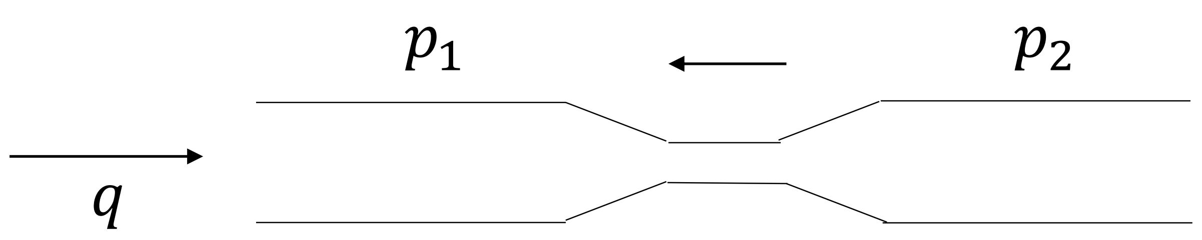


# MONOTOON PROCES ANTWOORD: EERSTE-ORDE-PROCES

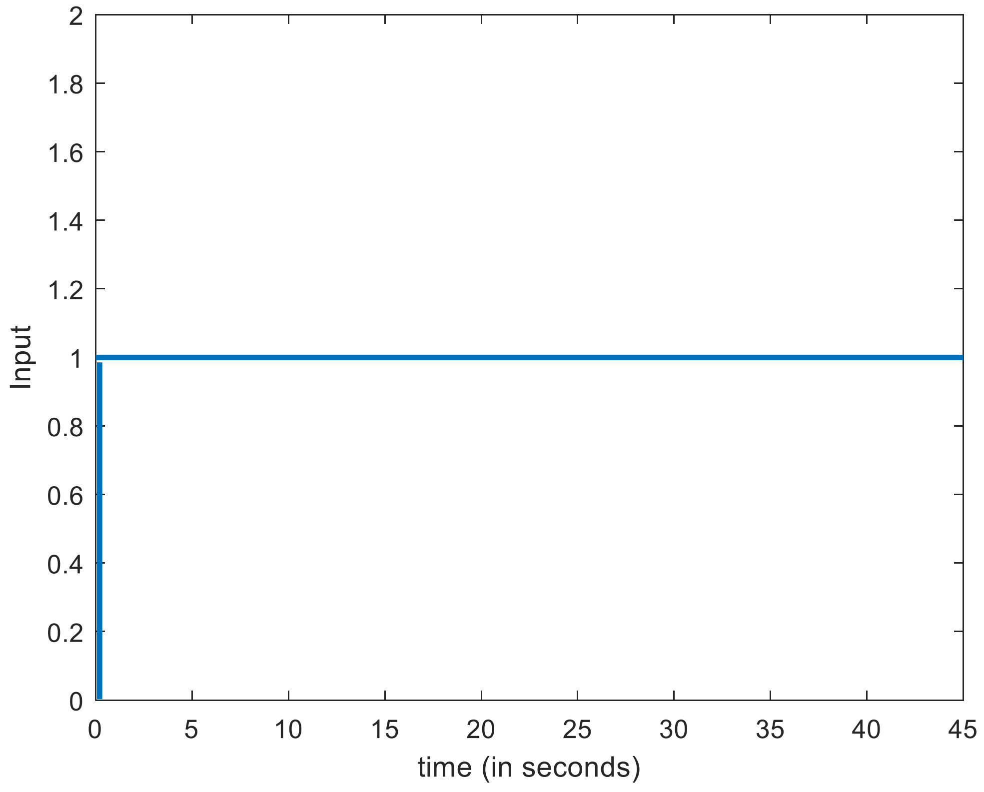
Balans: $$\frac{d}{dt}(Ah) = q_{in} - q_{uit} \overset{\text{linearisatie}}{\Longrightarrow} \frac{d}{dt}(Ah) = q_{in} - \frac{h}{R}$$

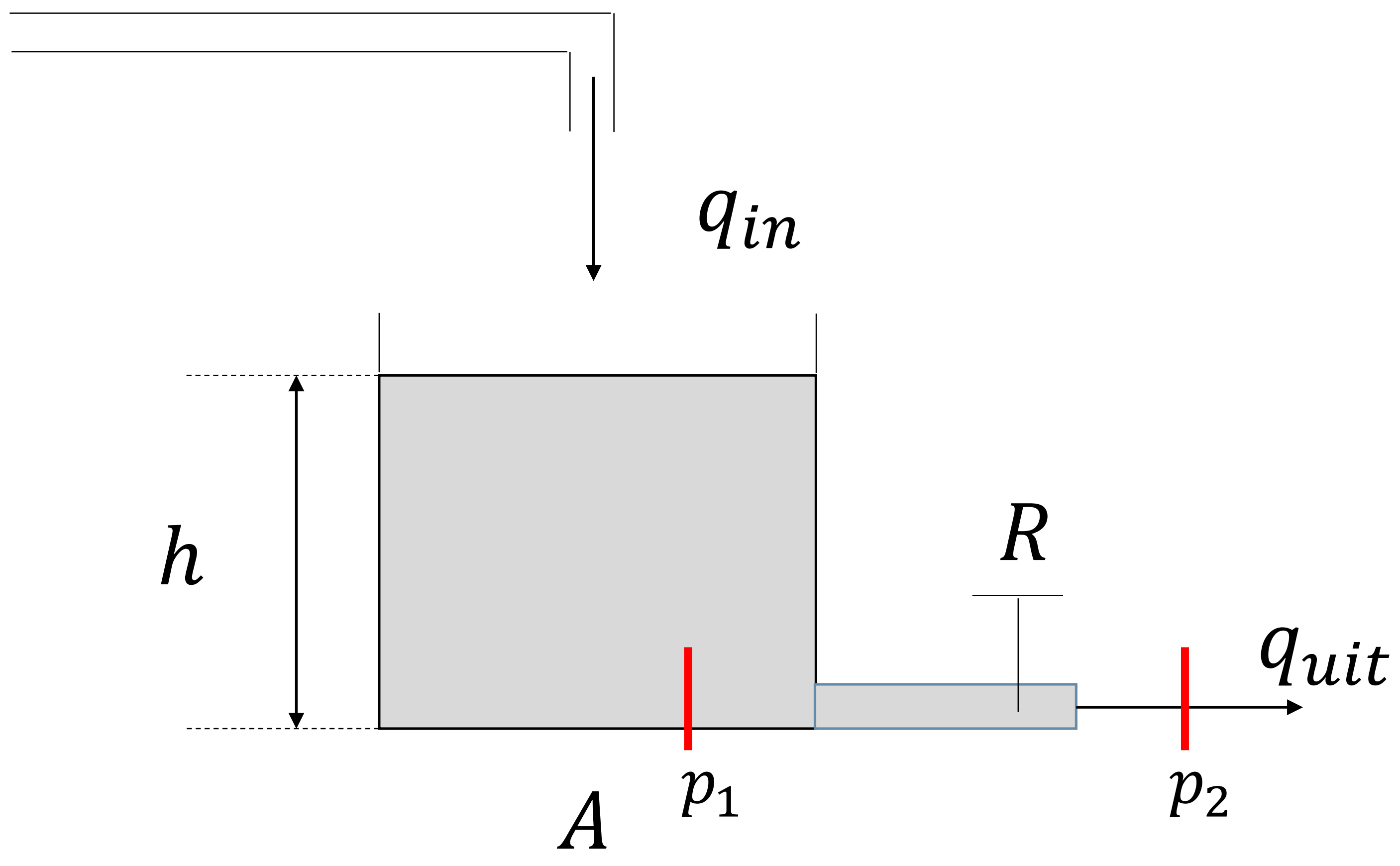
Linearisatie rond een werkpunt

Kleine afwijkingen




$$q = k\sqrt{p_1 - p_2}$$



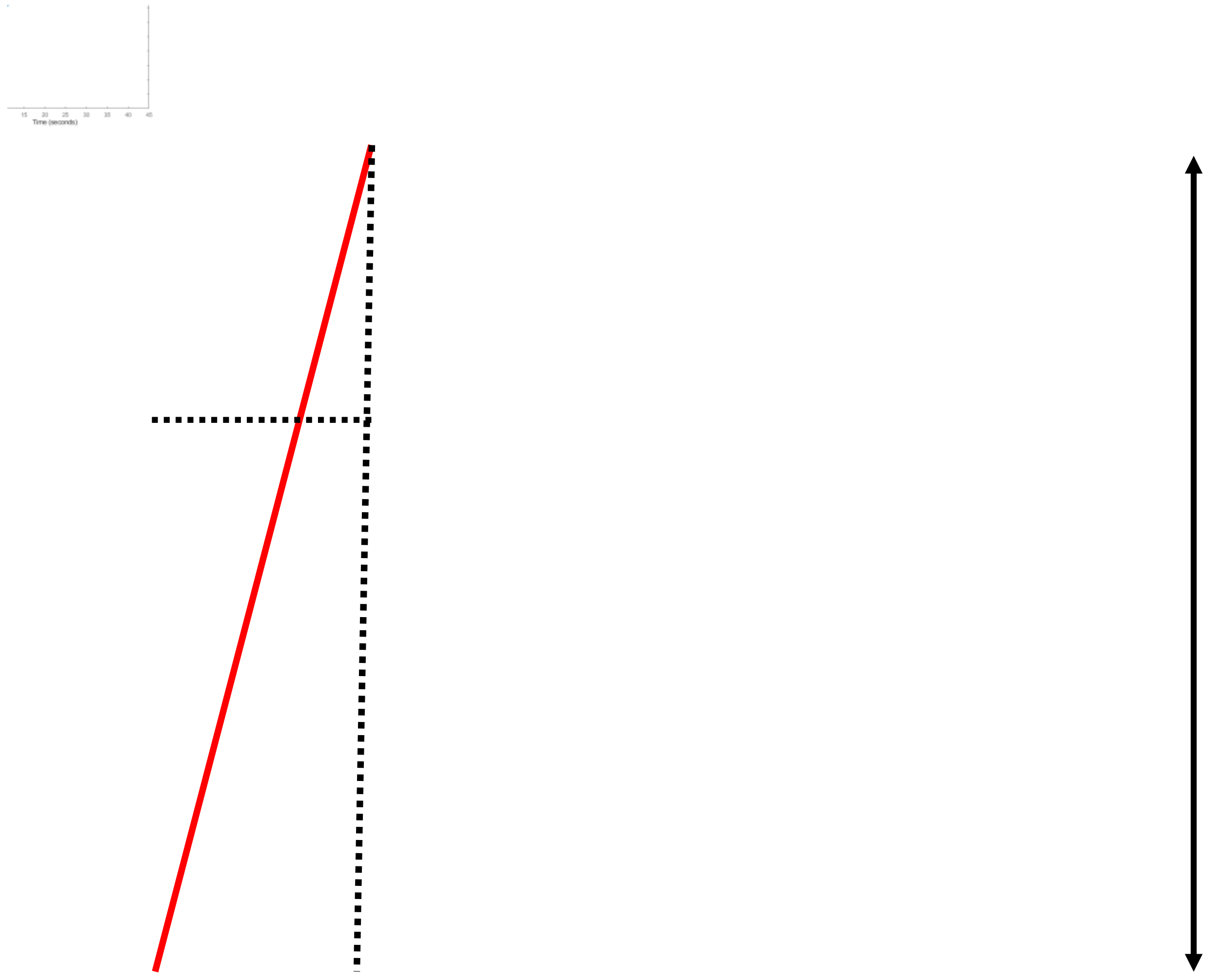
# MONOTOON PROCES ANTWOORD: EERSTE-ORDE-PROCES

Indien $q_{in} = 0$ dan $\frac{dh}{dt} = -\frac{h}{RA}$

$RA = \tau$ tijdsconstante

De wijziging van de grootheid is evenredig met zichzelf: overgangsgedrag volgens één exponentiele functie

0.63 $K$



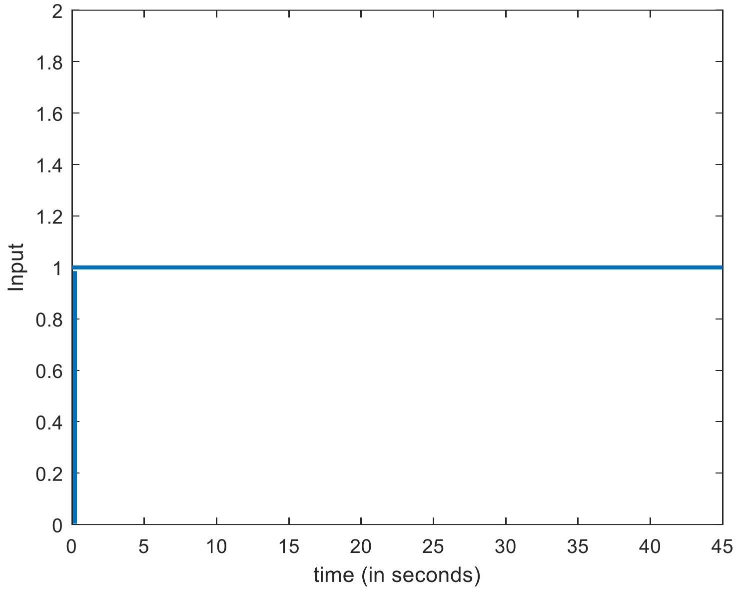
$\tau$

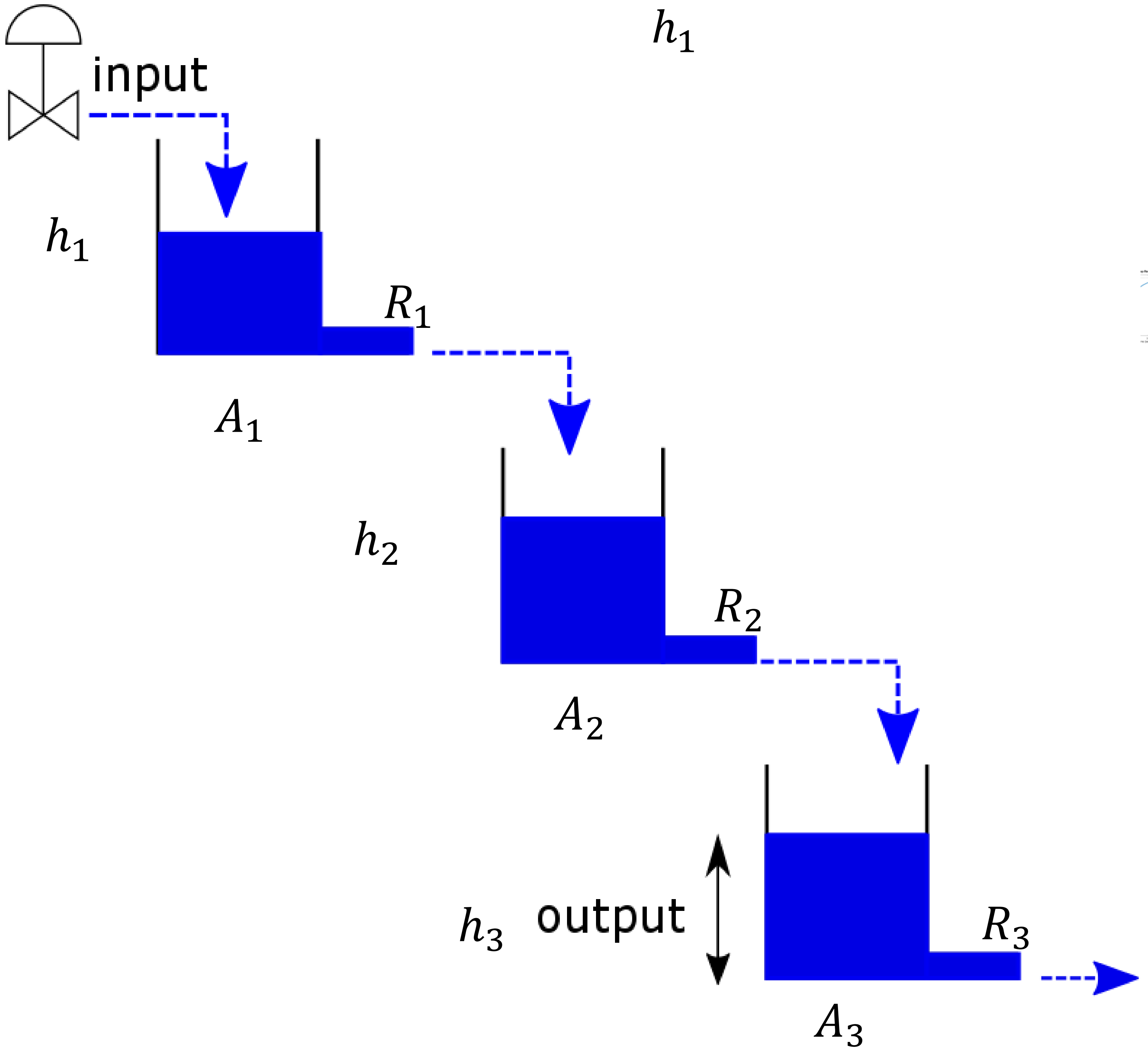
$e^{-\frac{t}{\tau}}$ exponentiele functie met tijdsconstante $\tau$

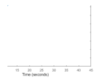
Het proces is zelfregelend

UNIVERSITEIT GENT

# MONOTOON PROCES ANTWOORD : >=TWEEDE-ORDE-PROCES

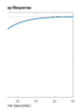


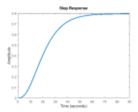
$h_1$

$$\boxed{e^{-\frac{t}{\tau_1}}}$$



$h_2$

$$\boxed{e^{-\frac{t}{\tau_2}}}$$

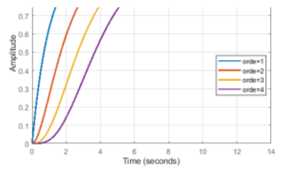


$h_3$

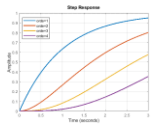
$$\boxed{e^{-\frac{t}{\tau_3}}}$$

# MONOTOON PROCES ANTWOORD : >=TWEEDE-ORDE-PROCES

Typische S-vorm door cascade van verschillende opeenvolgende dynamica ’s

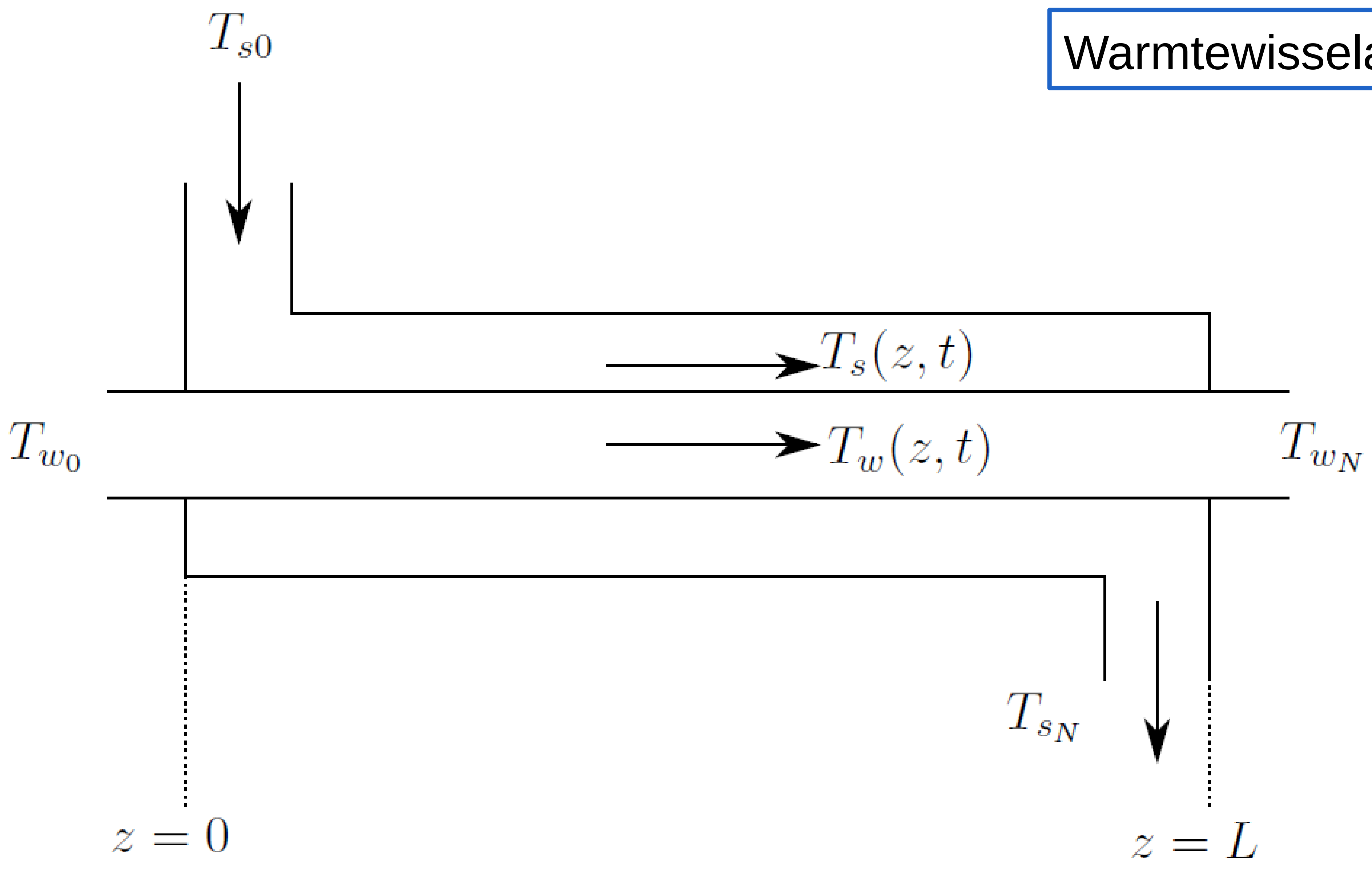


Het proces is zelfregelend



# GECONCENTREERDE VERSUS VERDEELDE PARAMETERS

Warmtewisselaar: twee concentrische buizen




$T_s$ stoomtemperatuur

$T_w$ watertemperatuur

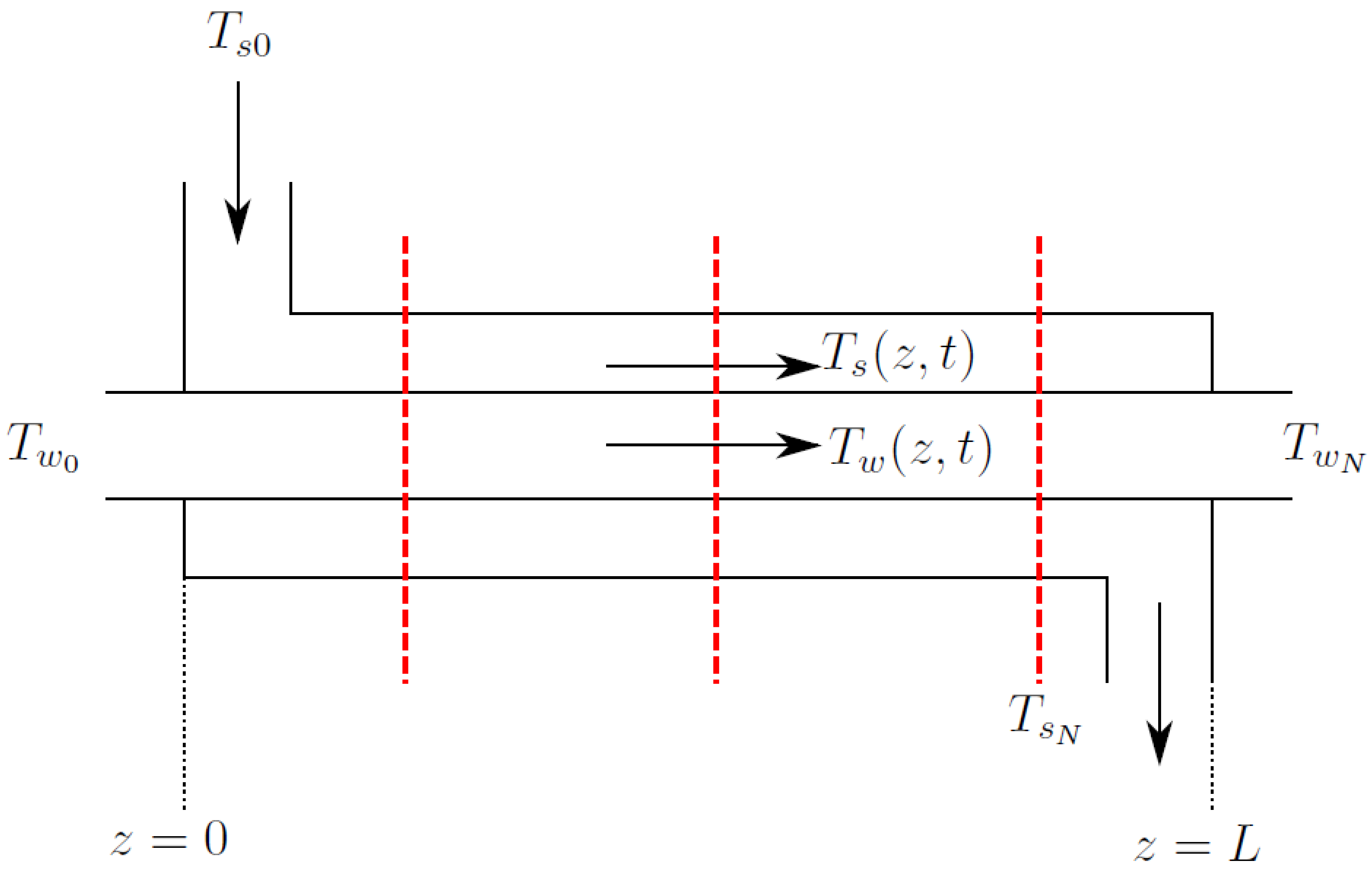
Partiele differentiaalvergelijking

$$\frac{dT_{w_i}}{dt} = -v_w \frac{T_{w_i} - T_{w_{i-1}}}{\Delta z} + a_w \left(T_{s_i} - T_{w_i}\right) \quad i = 1,2,3$$

$$\frac{dT_{s_i}}{dt} = -v_s \frac{T_{s_i} - T_{s_{i-1}}}{\Delta z} + a_s \left(T_{w_i} - T_{s_i}\right) \quad i = 1,2,3$$

UNIVERSITEIT GENT

# GECONCENTREERDE VERSUS VERDEELDE PARAMETERS



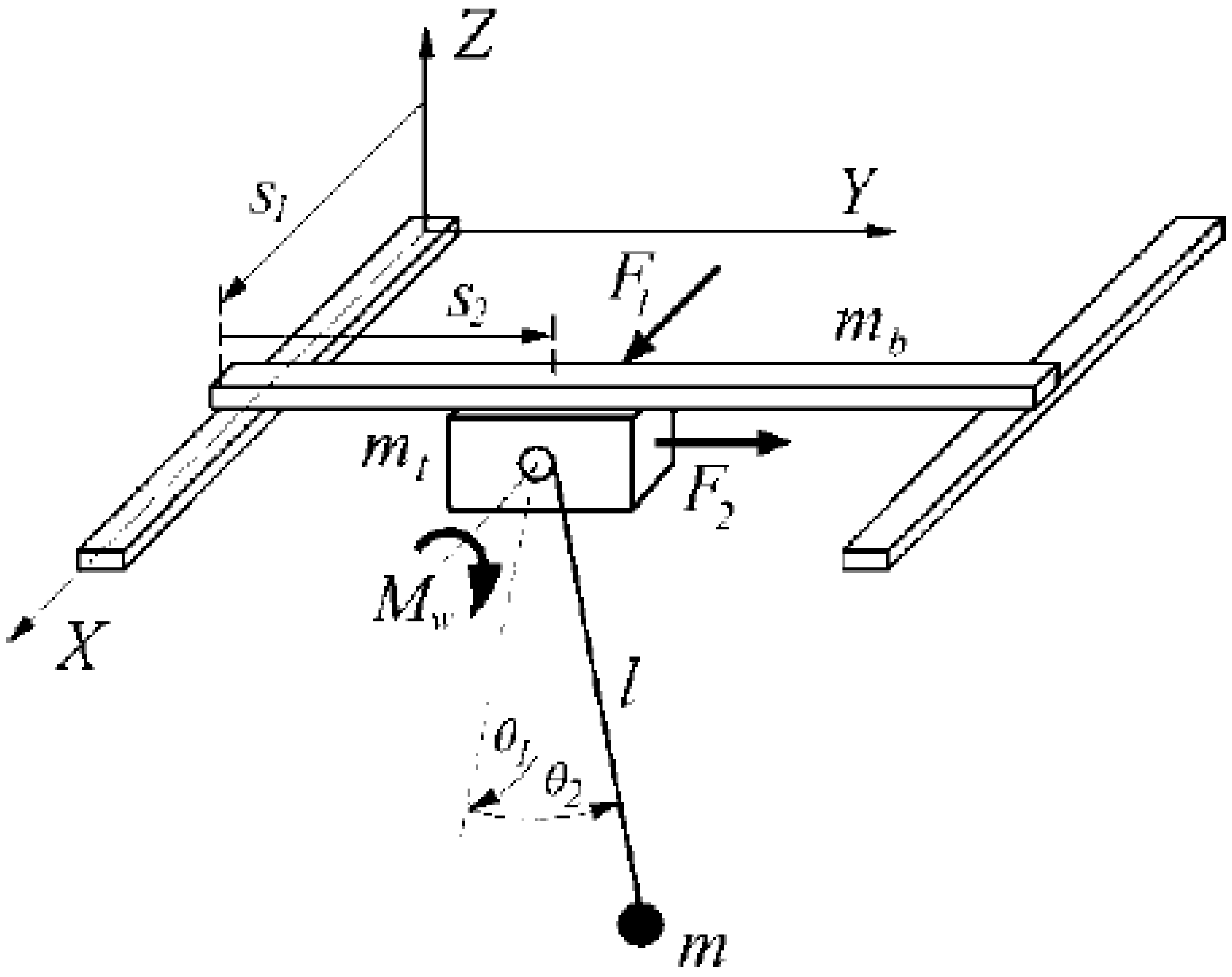

Discretisatie

Blokken met lengte $\Delta z$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{w_i}}{dt} &= -v_w \frac{T_{w_i} - T_{w_{i-1}}}{\Delta z} + a_w \left(T_{s_i} - T_{w_i}\right) \quad i = 1,2,3 \\ \frac{dT_{s_i}}{dt} &= -v_s \frac{T_{s_i} - T_{s_{i-1}}}{\Delta z} + a_s \left(T_{w_i} - T_{s_i}\right) \quad i = 1,2,3 \end{aligned}$$

UNIVERSITEIT GENT

# OSCILLEREND PROCESANTWOORD: LOOPKAT




Slingerbeweging $\theta$ regelen via translatie wagen

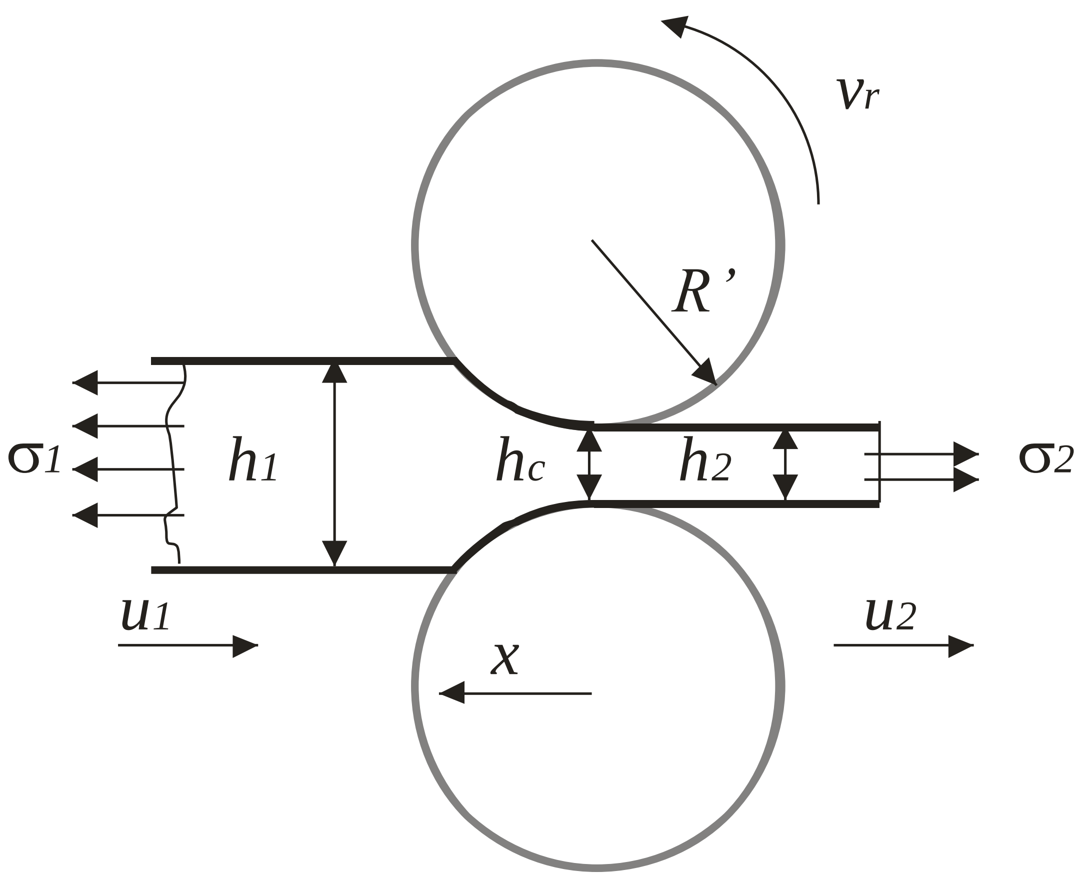
Kraanbestuurder: vorm van voorwaartse regeling

UNIVERSITEIT GENT

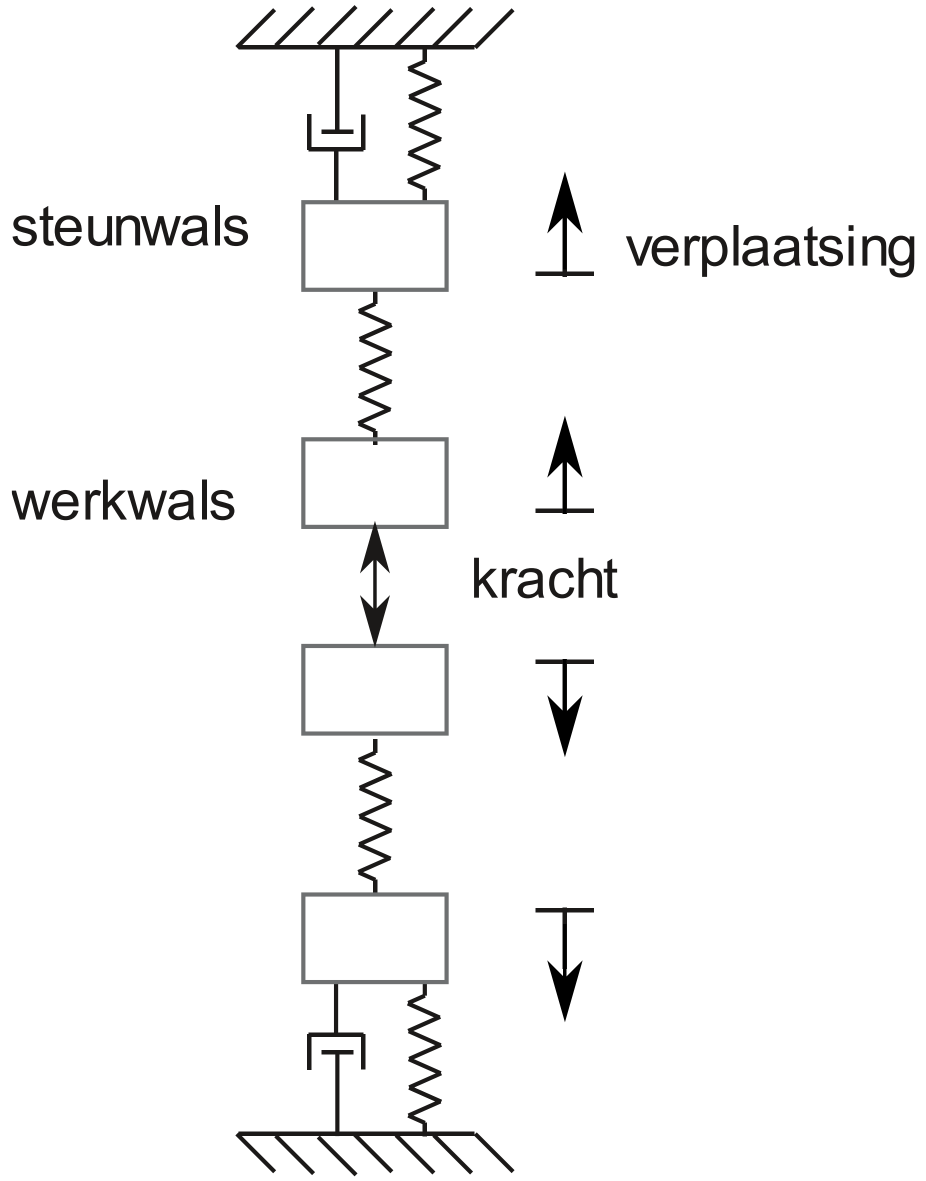
# OSCILLEREND PROCESANTWOORD: WALSEN

tandemwalsen dat zorgt voor de juiste dikte en de macroscopische ruwheid

Het rolproces is de interactie tussen de smering, de plaat en de walsen




Uni-axiaal model voor derde octaaf trillingen: 120 tot 250 Hz




Automatische snelheidsregeling van het proces indien een ongewenste dikte variatie wordt gedetecteerd

UNIVERSITEIT GENT

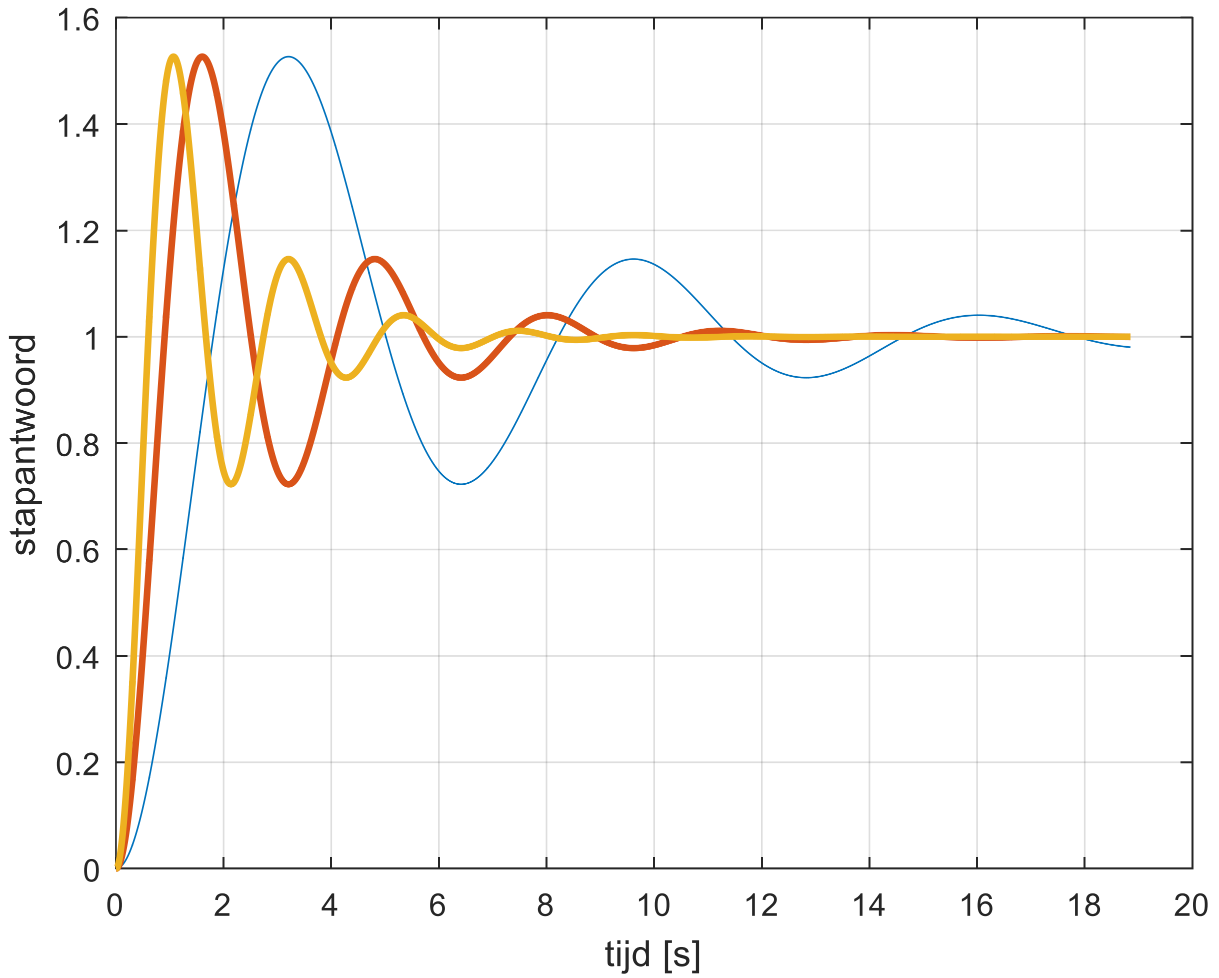
# OSCILLEREND PROCESANTWOORD: GENERIEK MODEL

Generiek model

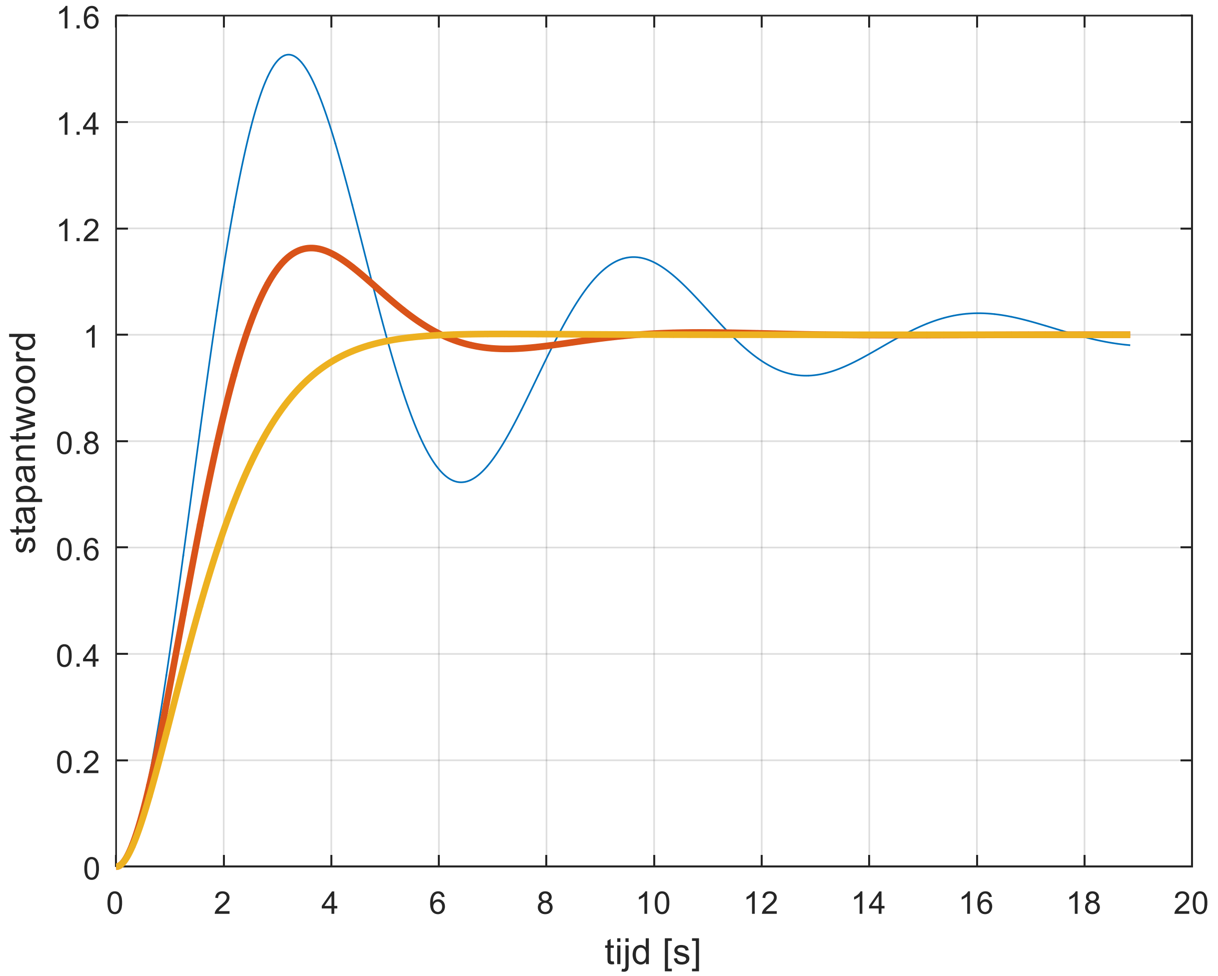
$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n\frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = K\omega_n^2 u$$

Demping factor: $\zeta$

Natuurlijke frequentie: $\omega_n$

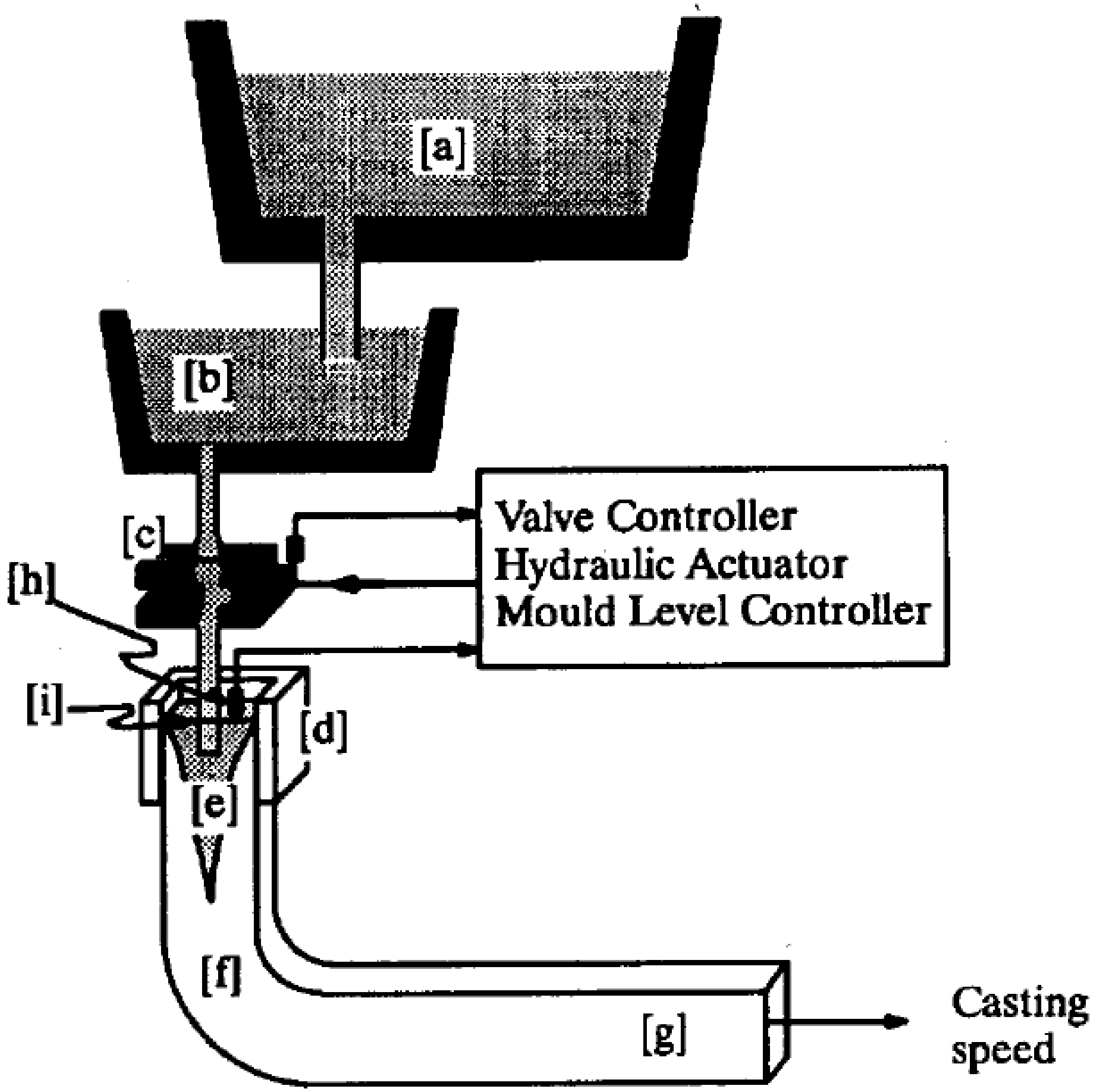



$\omega_n = [1\ \ 2\ \ 3], \left(\left[\frac{rad}{s}\right]\right) \qquad \zeta = [0.2\,]$




$\omega_n = [1], \left(\left[\frac{rad}{s}\right]\right) \quad \zeta = [0.2\ \ 0.5\ \ 0.9]$

# INTEGREREND PROCESANTWOORD: CONTINUGIETEN




Vloeibaar staal wordt in een verdeler gegoten. De verdeler is een voldoende groot reservoir zodat een continu gieten in gietvorm verzekerd is.

Een regel probleem is voorzien in een constant niveau in de gietvorm.

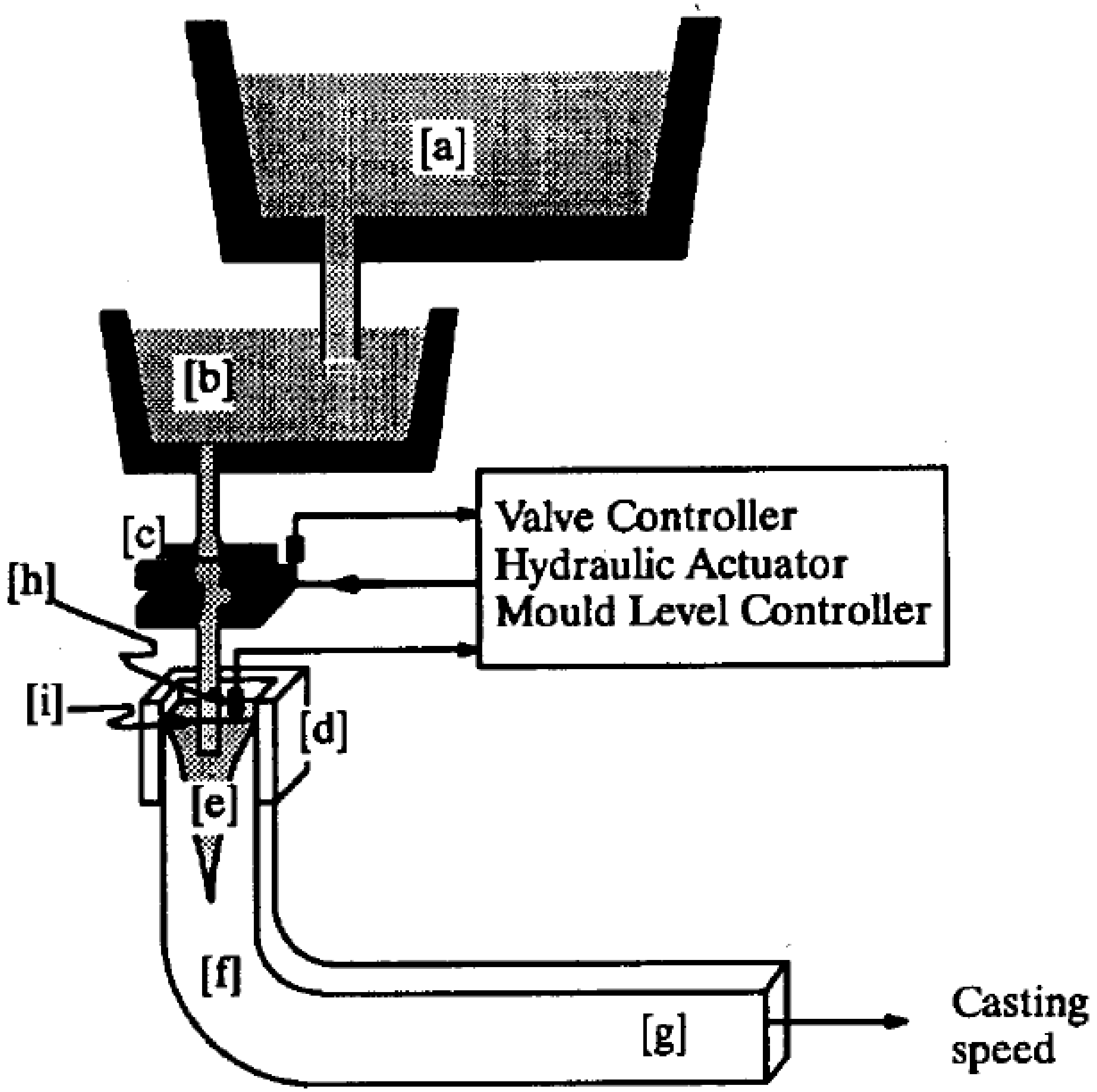
$$\boxed{\frac{dx_g}{dt} = \frac{x_{in} - x_{uit}}{A_g} \Longrightarrow x_g = \int \frac{x_{in} - x_{uit}}{A_g} dt}$$

| | |
|---|---|
| $x_g$ | Niveau in de gietvorm |
| $x_{in}$ | Toevoerstroom naar de gietvorm, functie van de klepopening |
| $x_{uit}$ | Uitstroom uit de gietvorm, afhankelijk van de treksnelheid |

**Het proces is niet zelfregelend**

UNIVERSITEIT GENT

# NIET-LINEAIRE PROCESSEN: CONTINUGIETEN




$$\boxed{\frac{dx_g}{dt} = \frac{x_{in} - x_{uit}}{A_g} \Longrightarrow x_g = \int \frac{x_{in} - x_{uit}}{A_g} dt}$$

$x_{in}$ Toevoerstroom naar de gietvorm, functie van de klepopening

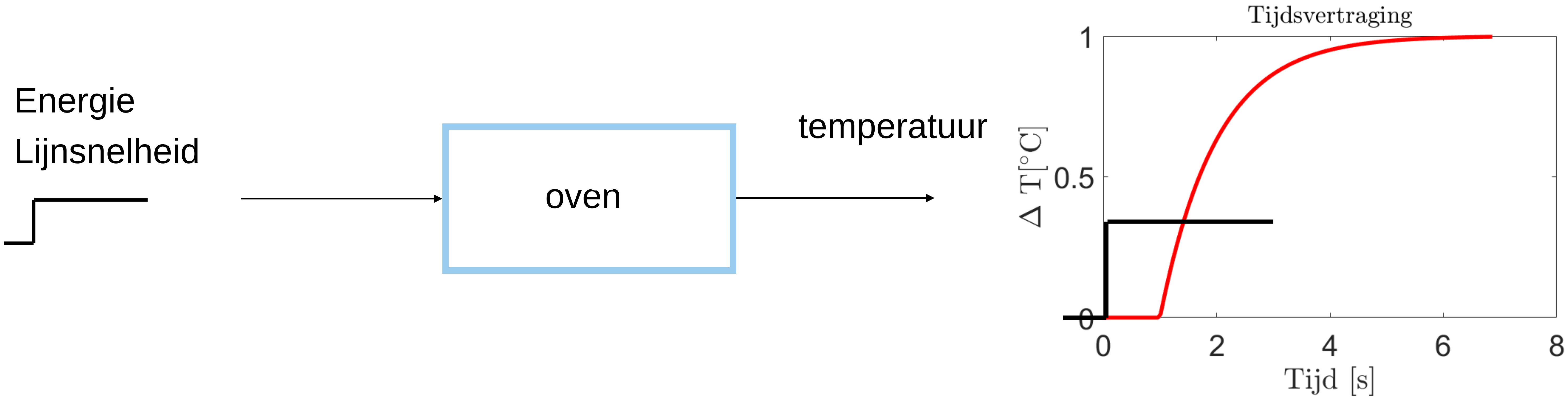
$A_k$ Doorstroom oppervlakte: niet-lineaire afhankelijkheid van de hydraulische actuator positie. Niet-lineariteit ten gevolge van de geometrie

Hydraulische actuator: gevoelig aan stickslip als gevolg van niet-lineaire demping

Linearisatie kan indien variatie ten opzichte van het werkpunt beperkt is

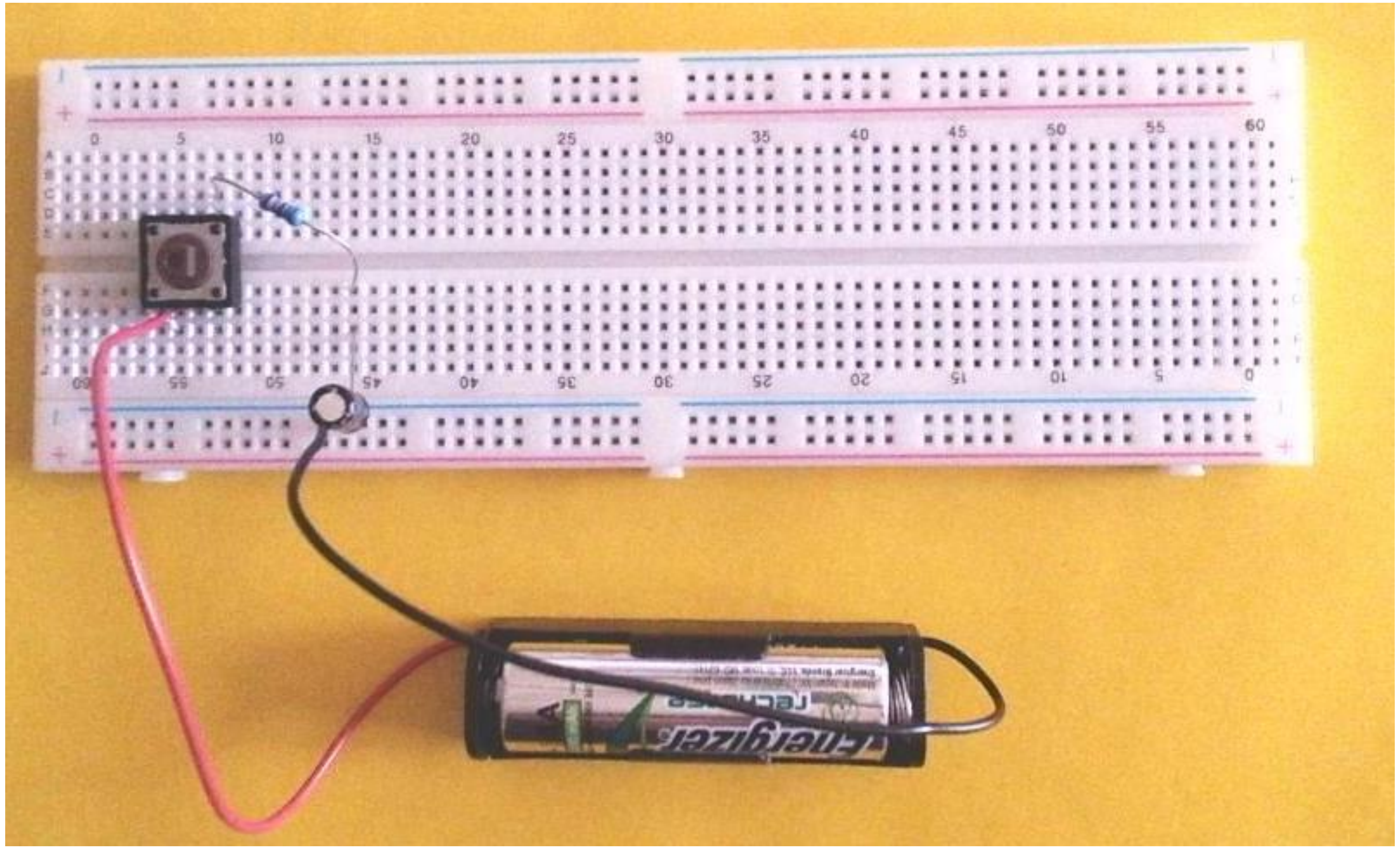
UNIVERSITEIT GENT

# PROCESSEN MET TIJDSVERTRAGINGEN: GLOEIEN VAN STAAL

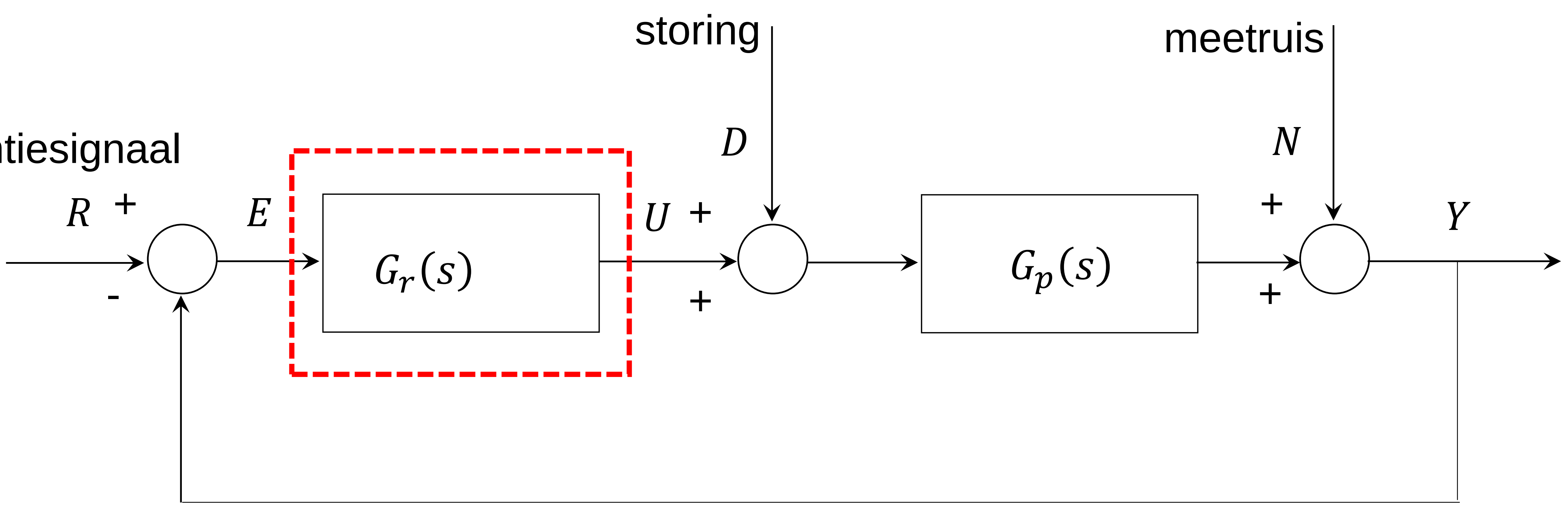


Pauze

# DEMO: GENERIEKE DYNAMICA’S



# REGELEN VAN PROCESSEN: OVERDRACHTSFUNCTIE




Laplace transformatie

$$\frac{d}{dt} \longrightarrow s \qquad \int \longrightarrow \frac{1}{s}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = K\omega_n^2 u \quad \rightarrow \quad Y(s) = \underbrace{\frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}}_{G(s)} U(s)$$

UNIVERSITEIT GENT

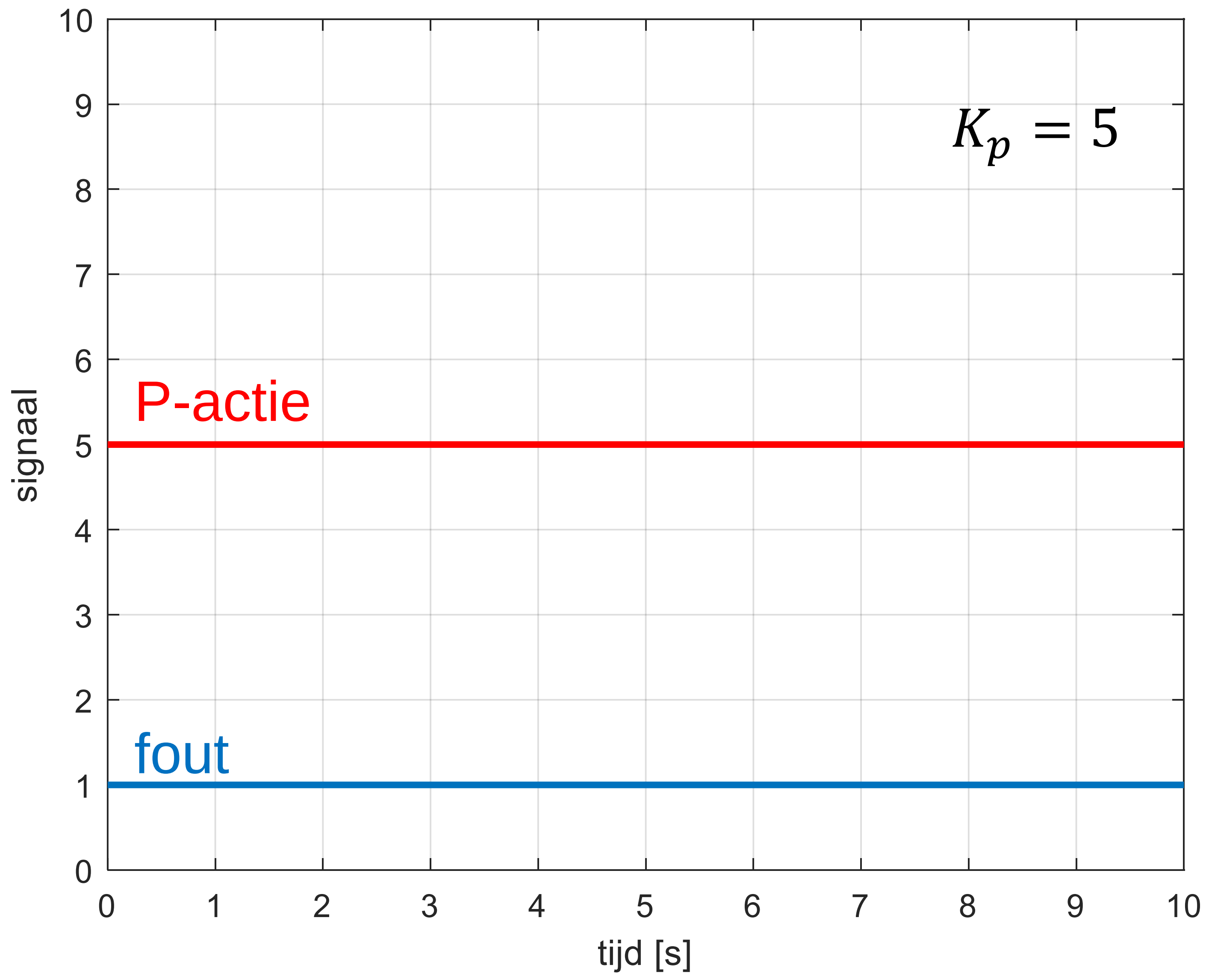
# REGELWET: HOE OMGAAN MET DE FOUT?

## Proportioneel regelen

$$u = K_p e$$

$$U(s) = K_p E(s) = G_r(s)E(s)$$

P-actie: Versnelt het antwoord



# REGELWET: HOE OMGAAN MET DE FOUT?

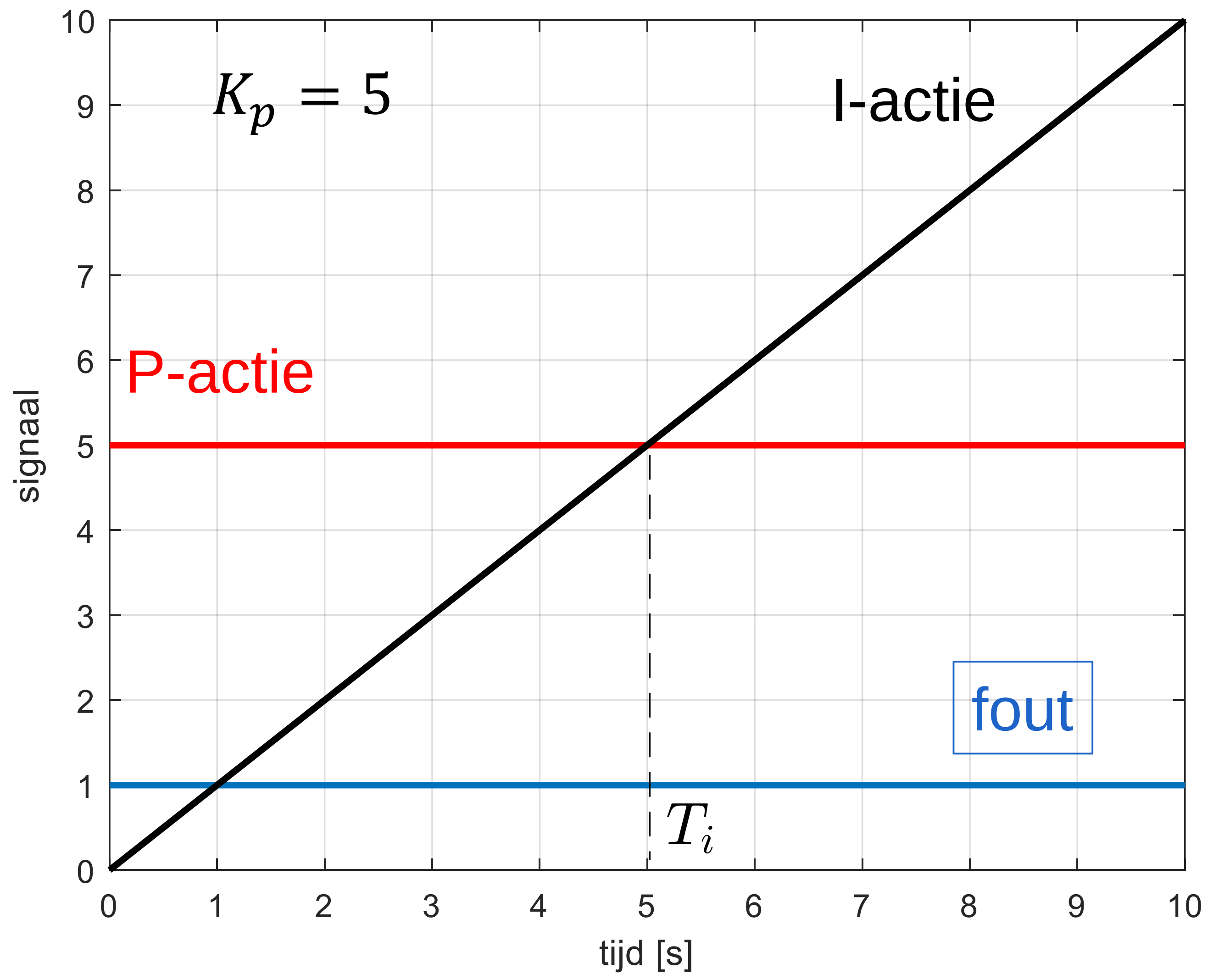
## Integrerend regelen

$$\frac{du}{dt} = \frac{K_p}{T_i} e$$

$$u = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\theta) d\theta$$

$$U(s) = \frac{K_p}{sT_i} E(s) = G_r(s) E(s)$$

I-actie: Wil de fout wegwerken

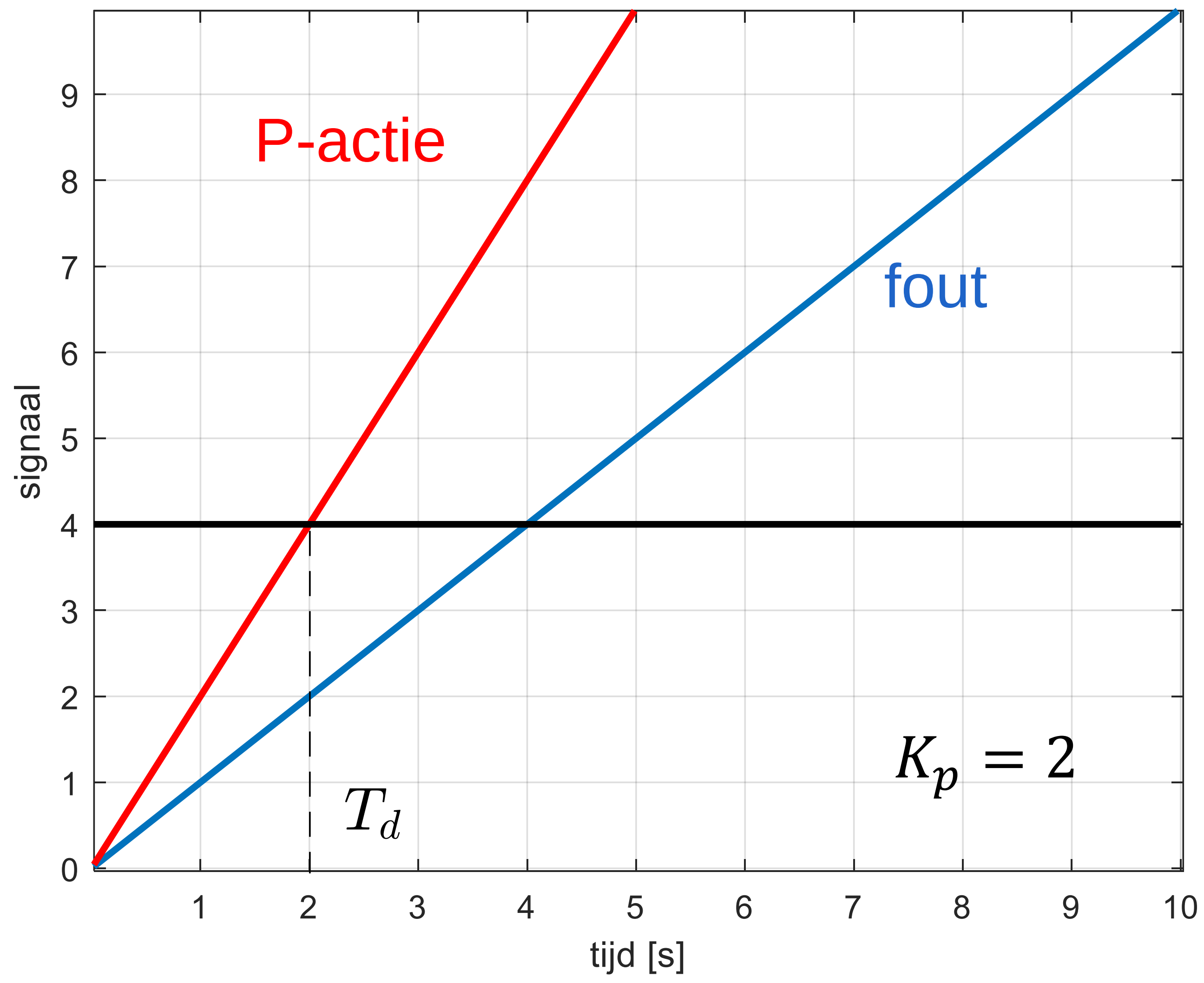


# REGELWET: HOE OMGAAN MET DE FOUT?

## Differentiërend regelen

$$u = K_p T_d \frac{de}{dt}$$

$$U(s) = K_p T_d s E(s) = G_r(s) E(s)$$




### D-actie: anticipeert

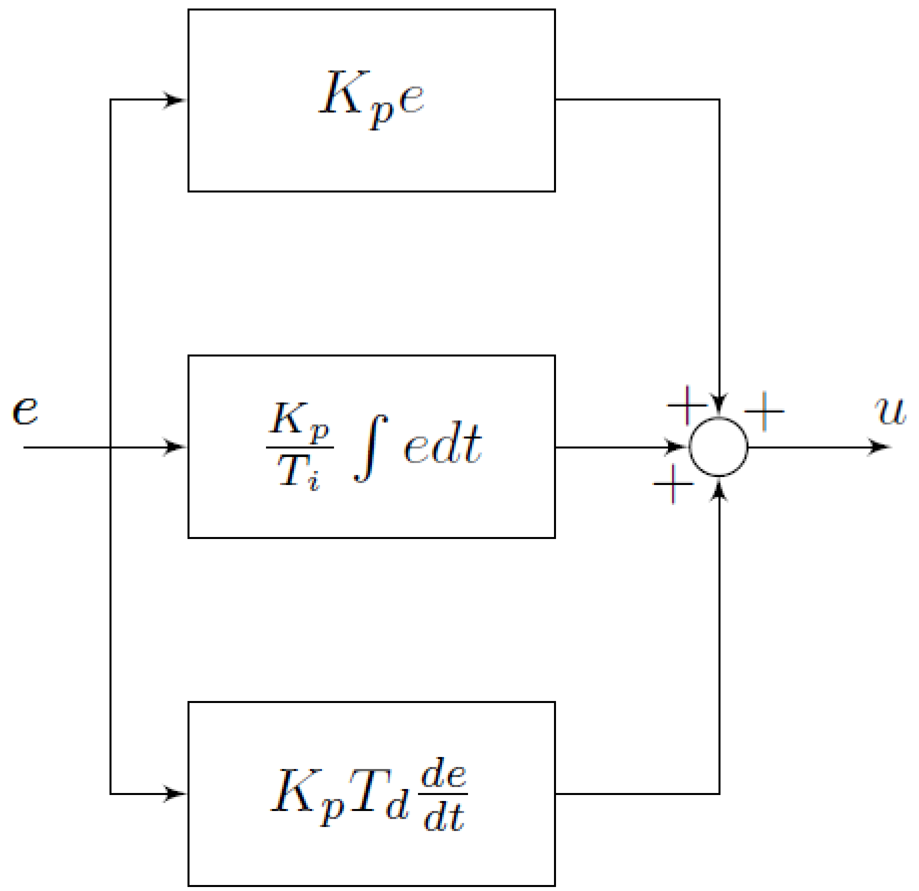
$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de}{dt}$$

UNIVERSITEIT GENT

# REGELWET: PID-REGELAAR

Parallelle regelaar (ISA-regelaar, Instrument Society of Automation)

$$G_r(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right)$$




$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau+) + T_d\frac{de(t)}{dt}\right)$$

Digitale implementatie

$$u(t) = Kp(e(t) + \frac{1}{T_i}\sum_{i=0}^{n} e(i)t_s + T_d\frac{e(t)-e(t-t_s)}{ts}$$

# REGELWET: PID-REGELAAR: ANDERE UITVOERINGSVORMEN

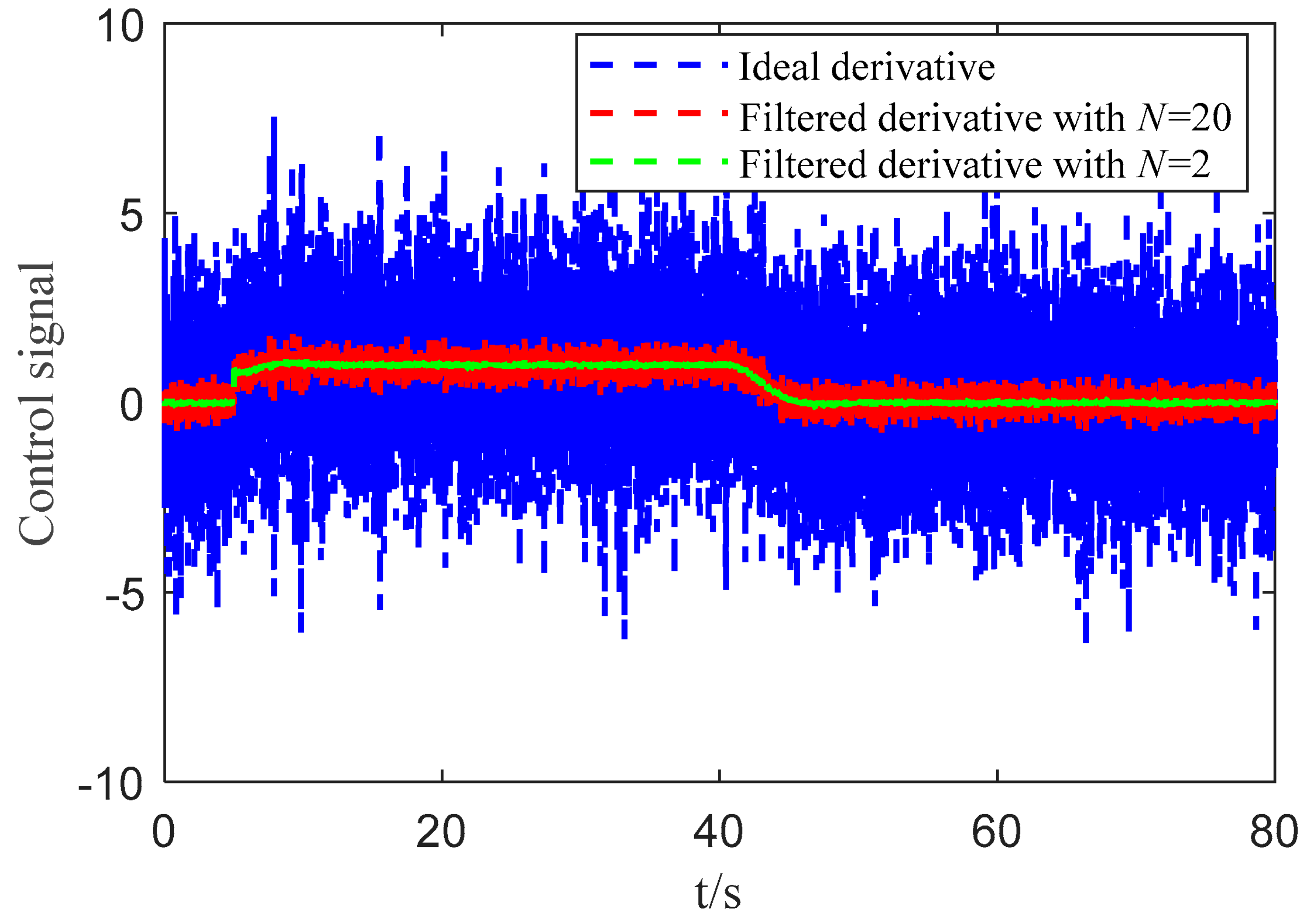
Tamme D-actie

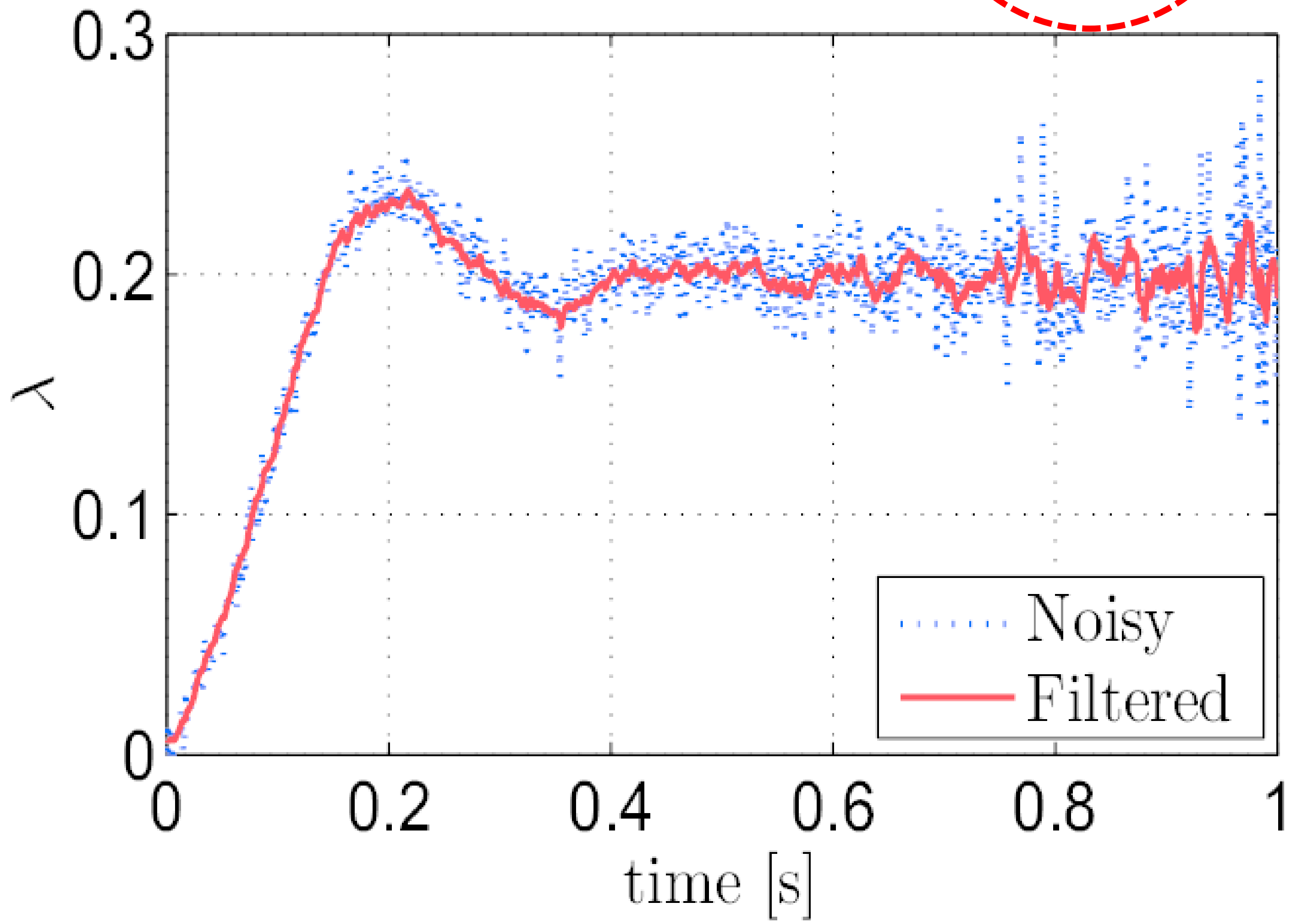
Hoogfrequente ruis => grote afgeleide => grote D-actie

$$A \cdot sin(\omega_d \cdot t) \qquad \omega_d \cdot A \cdot cos(\omega_d \cdot t)$$

$$G_r(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)\left(\frac{1 + sT_d}{1 + s\frac{Td}{N}}\right) \qquad N > 1$$

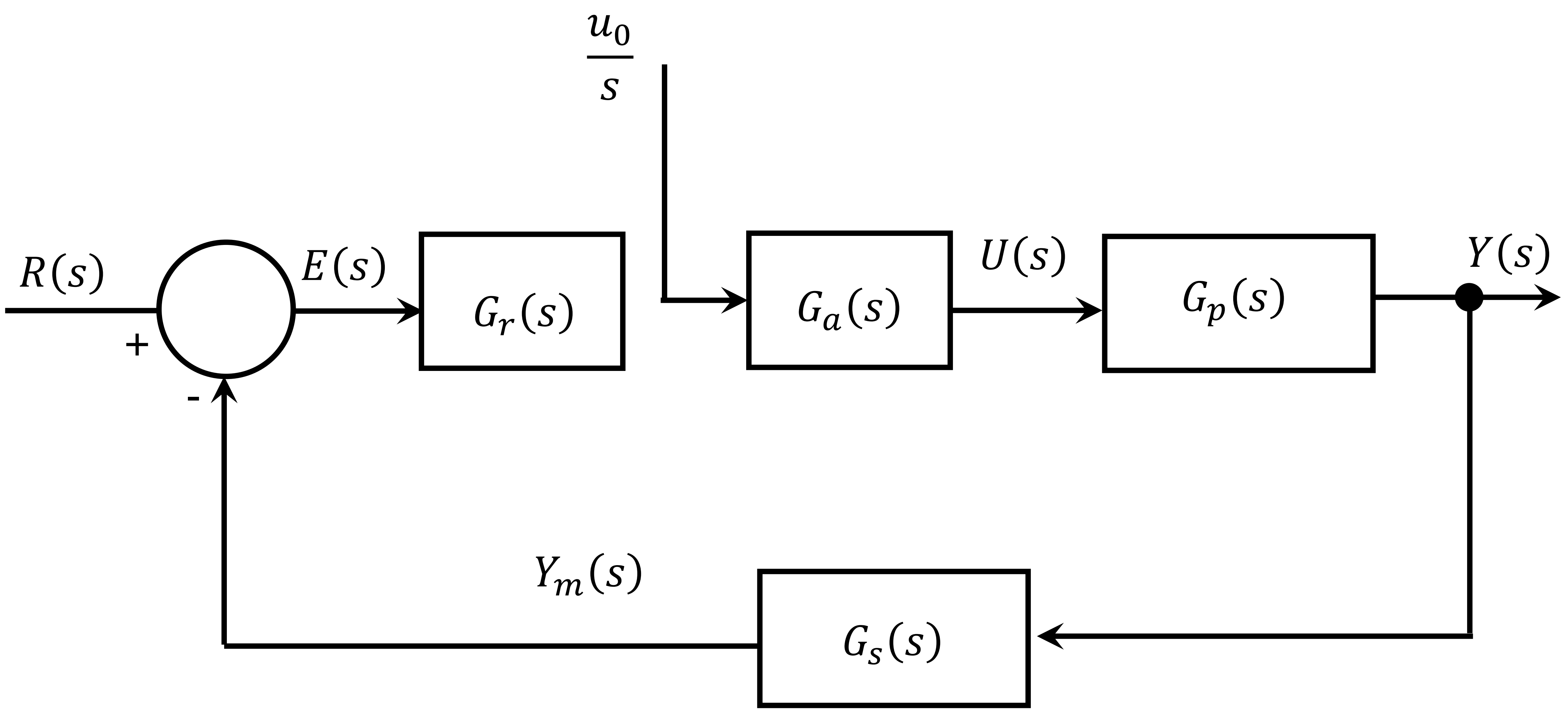
Alternatieve configuratie: gefilterde/Tamme D-acties



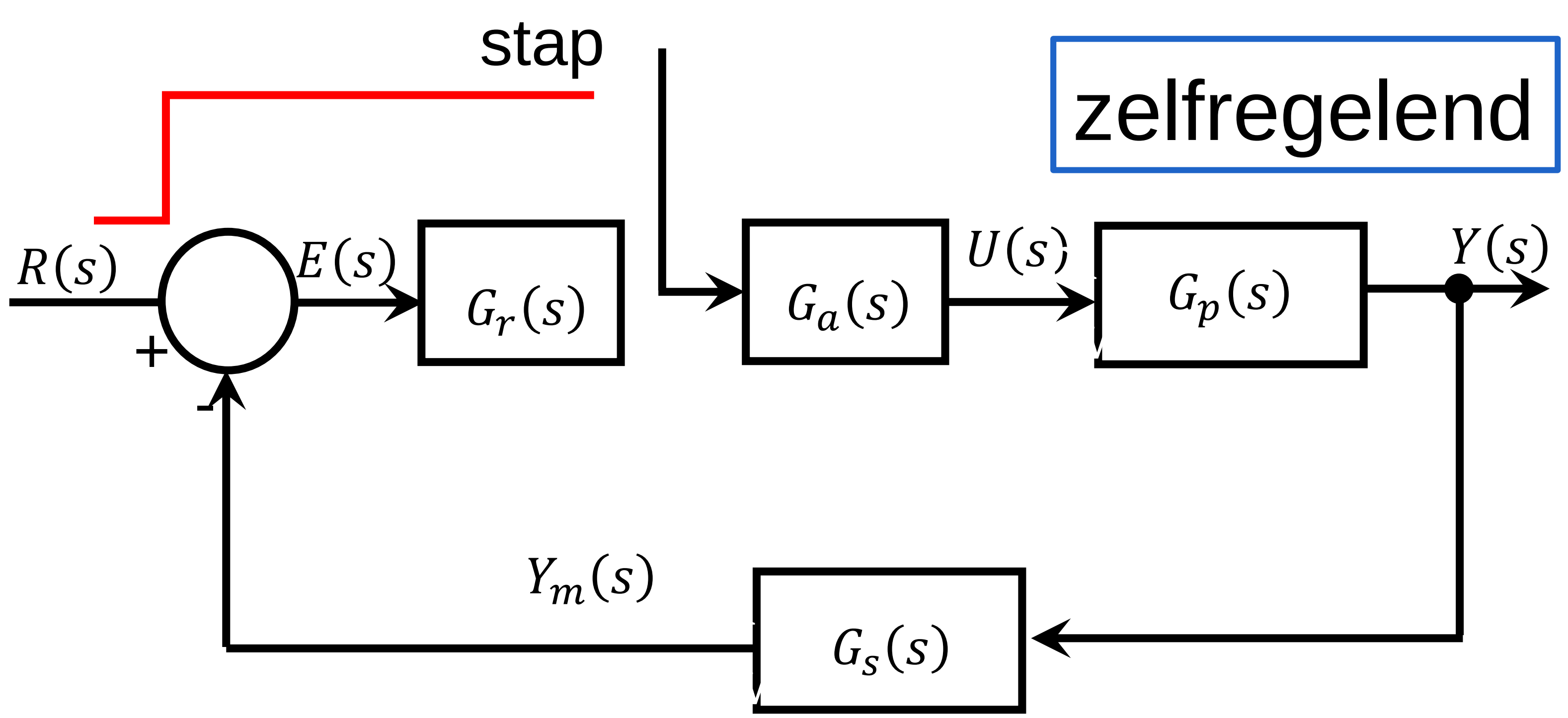



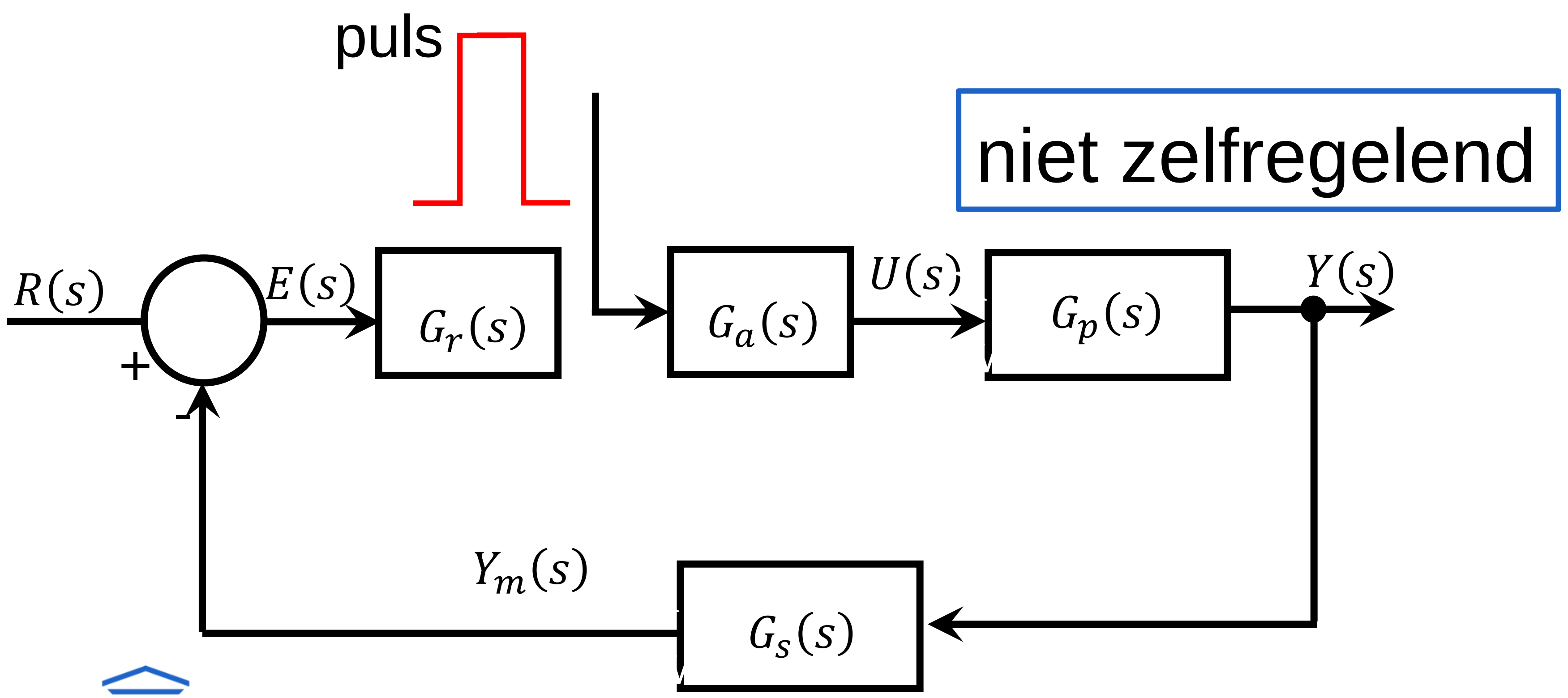

UNIVERSITEIT GENT

# AFSTELLEN: EXPERIMENT: PROCESREACTIE CURVE

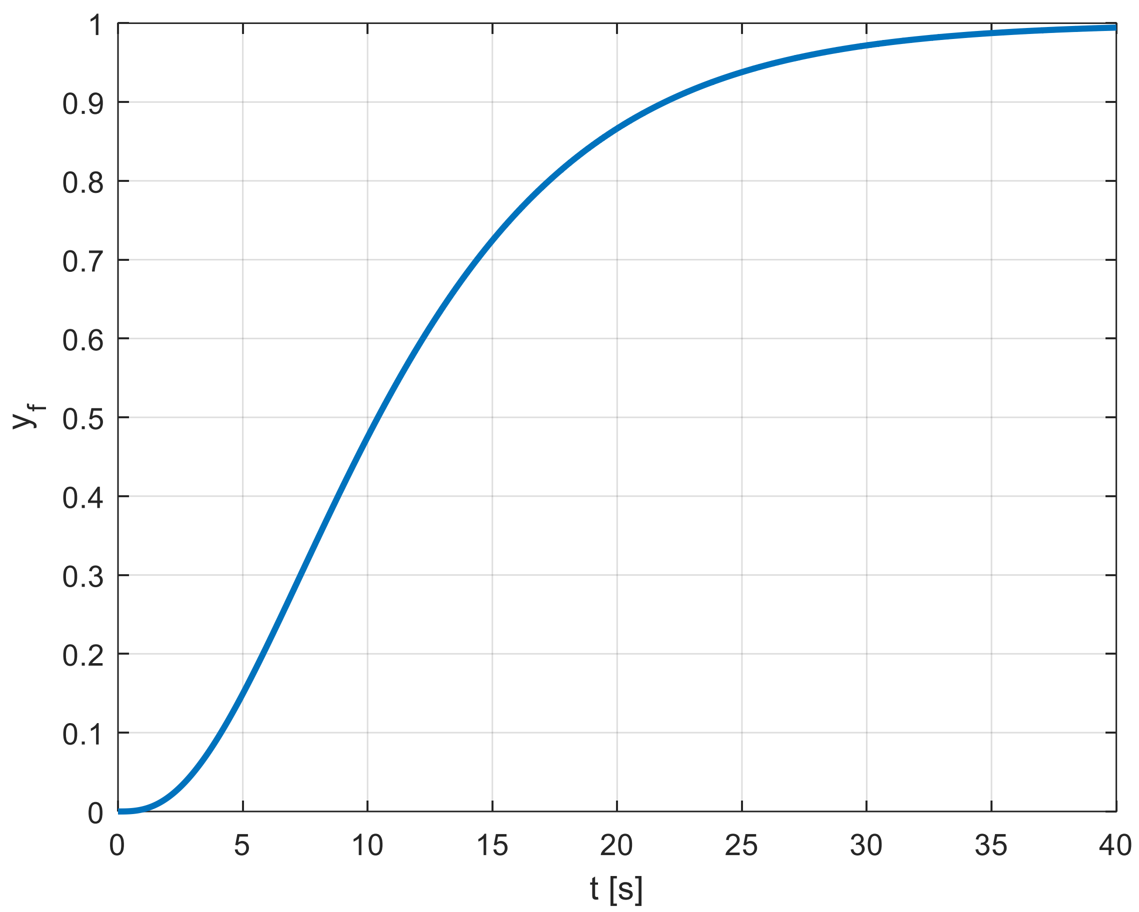


# AFSTELLEN: EXPERIMENT: BENADERING

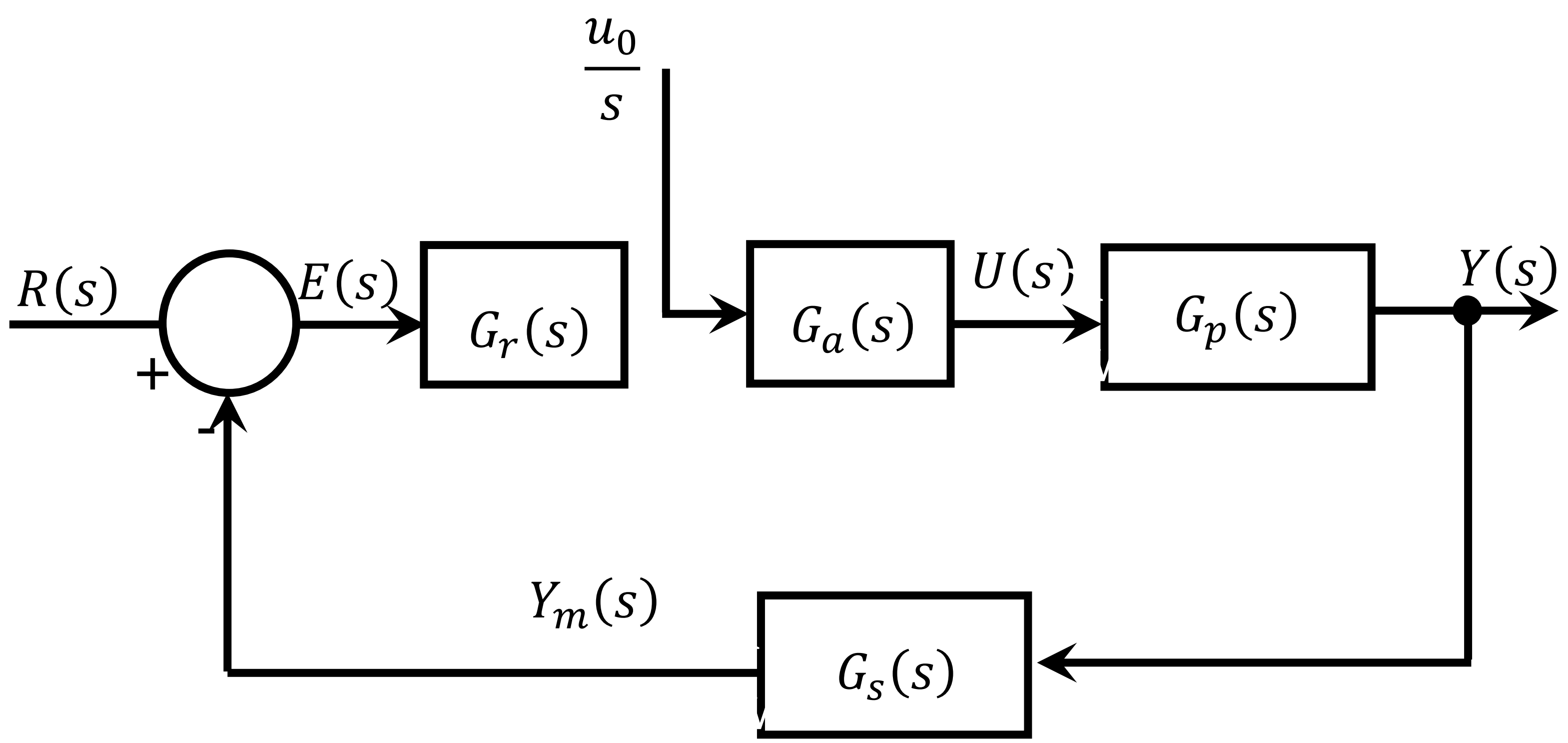


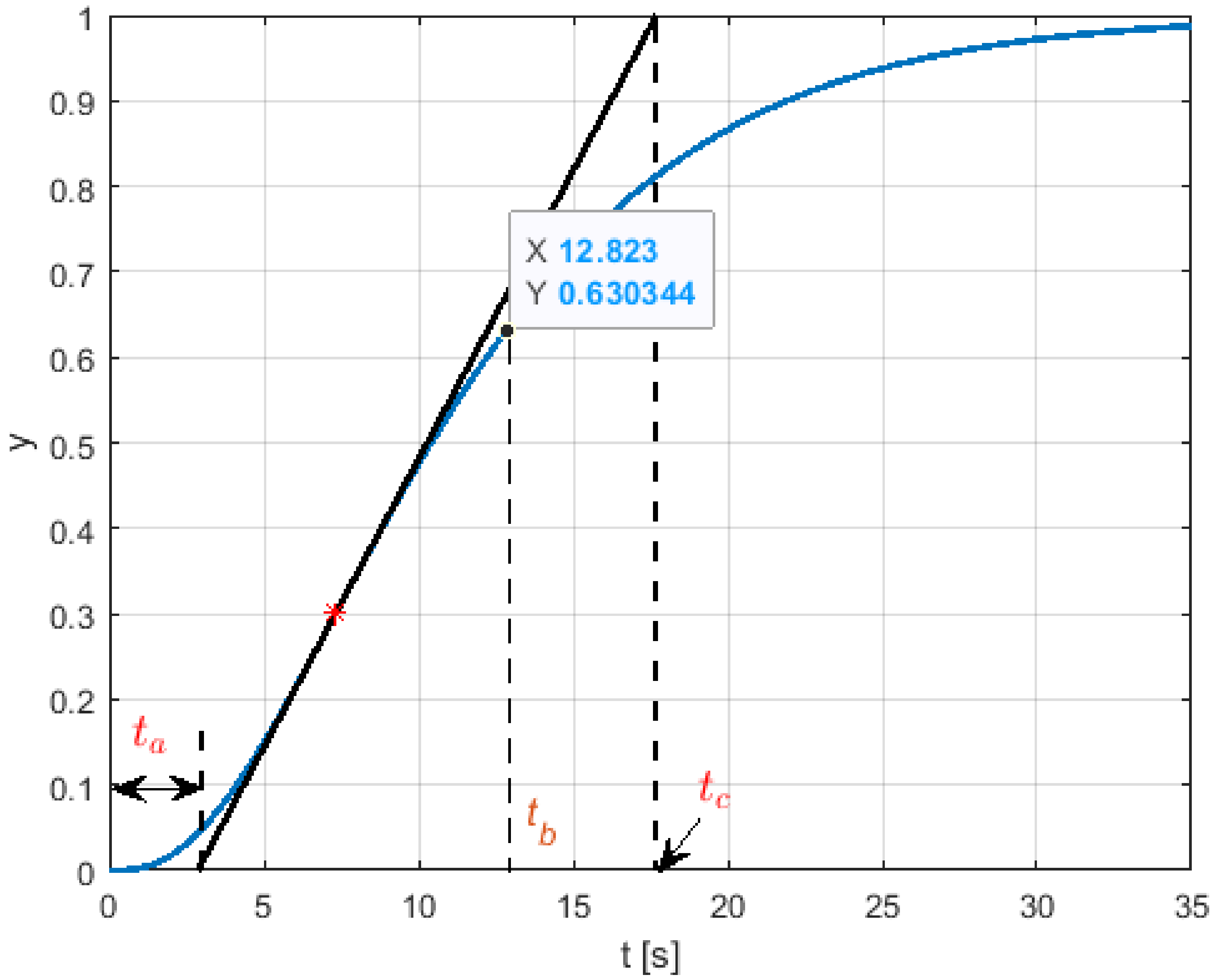




Procesreactie curve



# AFSTELLEN: EXPERIMENT: PROCESREACTIE CURVE

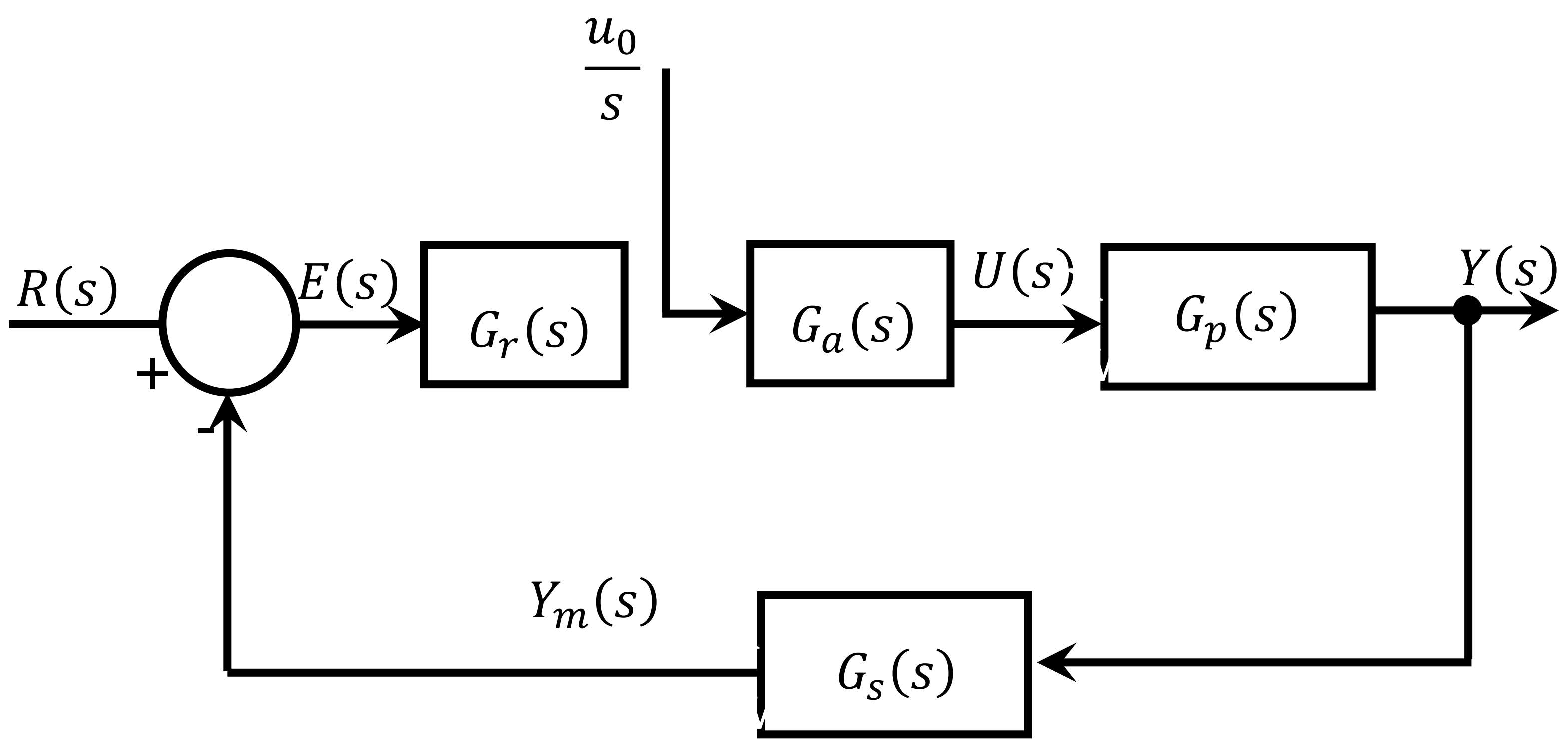


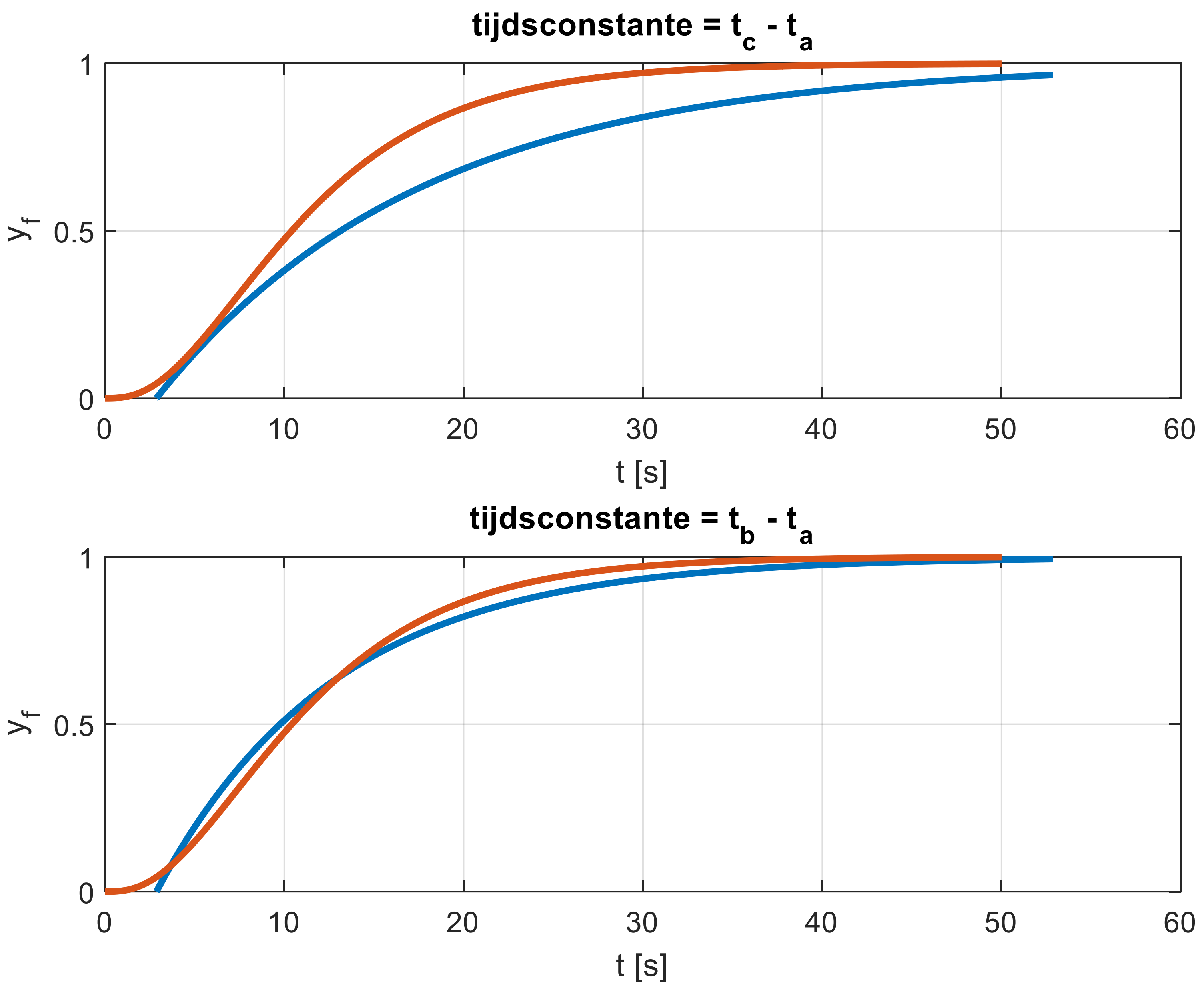




Benadering

$$G_a(s)G_p(s)G_s(s) = \frac{K\exp(-st_d)}{s\tau + 1}$$

# AFSTELLEN: EXPERIMENT: PROCESREACTIE CURVE




| $\tau = t_c - t_a$ | $\tau = t_b - t_a$ |
|---|---|
| $\tau = 14.83s$ | $\tau = 9.95s$ |
| $t_d = 2.87s$ | $t_d = 2.87$ |
| $K = 1$ | $K = 1$ |

Raaklijn: richtingscoëfficiënt $R$

$$R = \frac{K}{t_c - t_a}$$

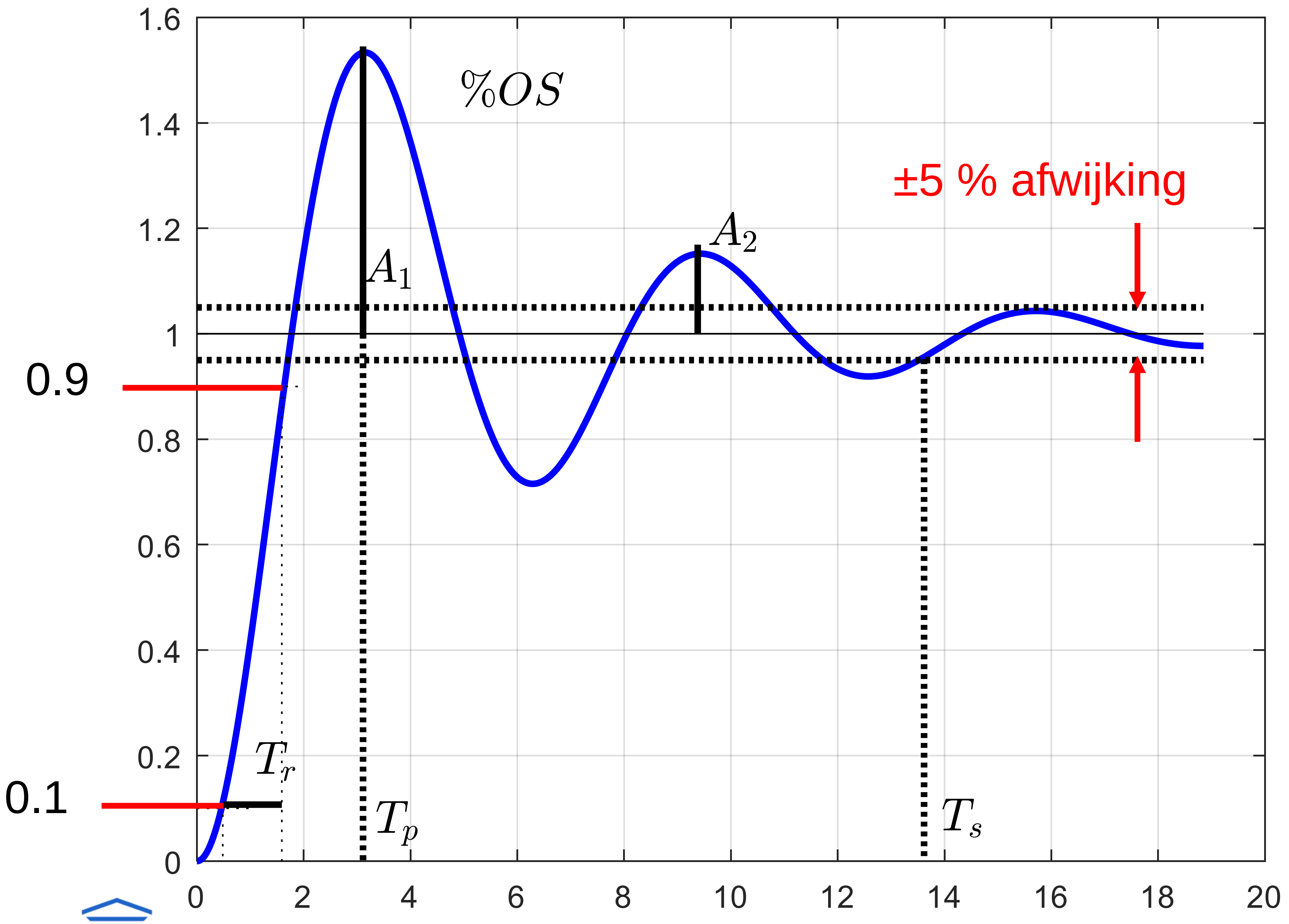
# REGELEN VAN PROCESSEN: KWALITEIT VAN DE REGELING

Overgangsgedrag

Regime gedrag

Wenswaarde=1

Blijvende fout




Eerste-orde proces + P-regelaar

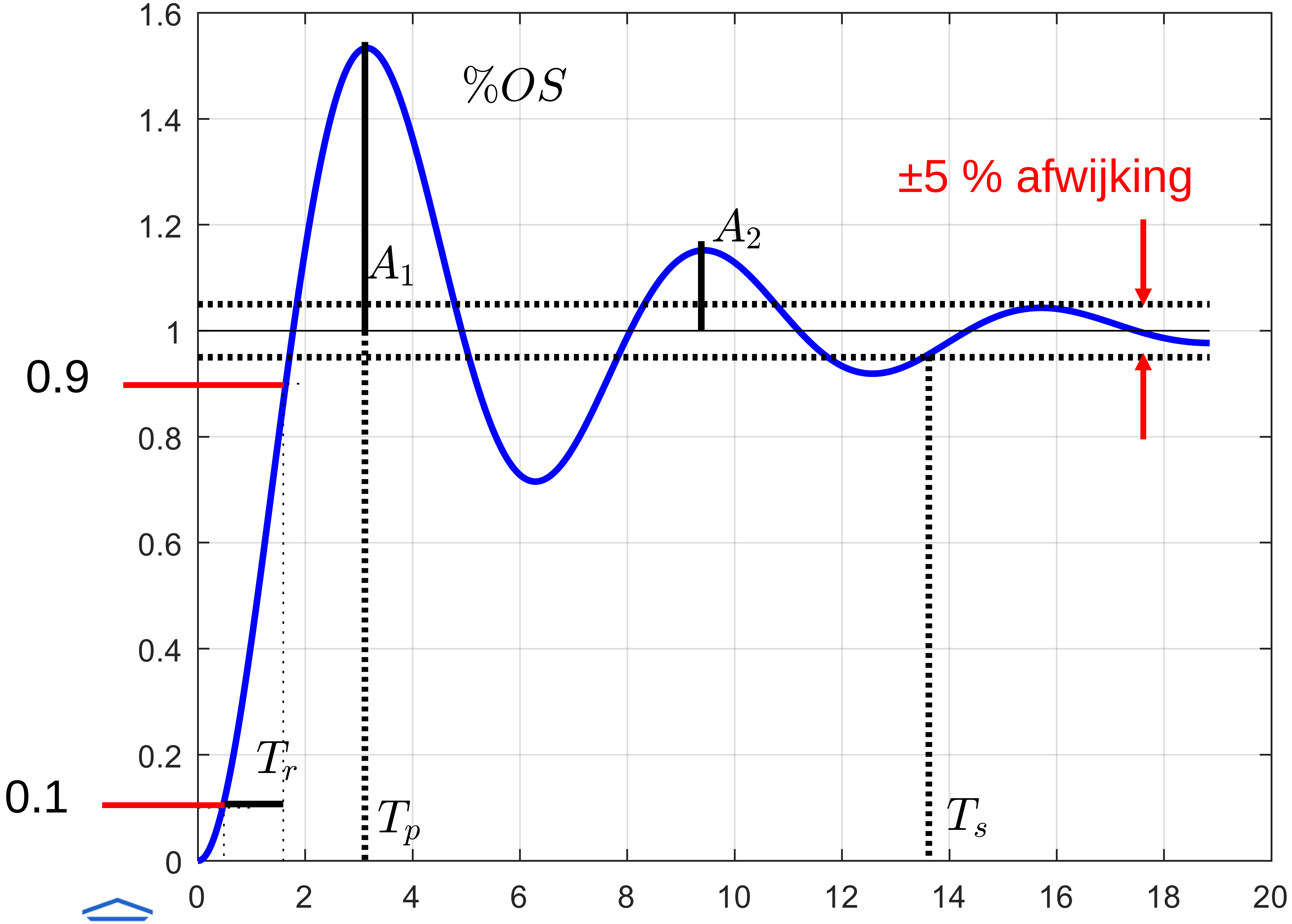
# REGELEN VAN PROCESSEN: KWALITEIT VAN DE REGELING

Overgangsgedrag

Regime gedrag

Wenswaarde=1

Geen blijvende fout




Eerste-orde proces + PI-regelaar

# REGELEN VAN PROCESSEN: AFSTELREGELS

Ziegler-Nichols afstelregels procesreactie curve

| regelaar | $K_c$ | $T_i$ | $T_d$ |
|---|---|---|---|
| P | $K_c = \frac{1}{RL}$ | | |
| PI | $K_c = \frac{0.9}{RL}$ | $T_i = \frac{L}{0.3}$ | |
| PID | $K_c = \frac{1.2}{RL}$ | $T_i = 2L$ | $T_d = 0.5L$ |

Raaklijn: richtingscoëfficiënt $R$ Lag: dode tijd $L = t_d$

$$R = \frac{K}{t_c - t_a}$$

Oorsprong: storingsonderdrukking, na 1 periode daling tot 25% van maximum
Volgt uit simulatie van veel verschillende processen

# REGELEN VAN PROCESSEN: AFSTELREGELS

Afstelregels: vaak focus op monotone stapantwoorden

$$G_m(s) = \frac{K_m e^{-s\tau_m}}{1 + sT_m}$$

| Rule | $K_c$ | $T_i$ | Comment |
|---|---|---|---|
| Hazebroek and Van der Waerden (1950) – continued. | $\frac{T_m}{K_m\tau_m}\left(0.5\frac{\tau_m}{T_m}+1\right)$ | $\frac{\tau_m^{\ 2}}{1.6\tau_m - 1.2T_m}$ | $\tau_m/T_m > 3.5$ |
| Oppelt (1951). *Model: Method 2* | $^3\ K_c$ | $1.66\tau_m$ | $\tau_m >> T_m$ |
| | | $3.32\tau_m$ | $\tau_m << T_m$ |
| Moros (1999). *Model: Method 1* | $0.8T_m/K_m\tau_m$ | $3\tau_m$ | Attributed to Oppelt. |
| | $0.91T_m/K_m\tau_m$ | $3.3\tau_m$ | Attributed to Rosenberg. |
| Chien *et al*. (1952). *Model: Method 2*; $0.1 < \tau_m/T_m < 1.0$ . | Regulator | | |
| | $0.6T_m/K_m\tau_m$ | $4\tau_m$ | 0% overshoot. |
| | $0.7T_m/K_m\tau_m$ | $2.33\tau_m$ | 20% overshoot. |
| | Servo | | |
| | $0.35T_m/K_m\tau_m$ | $1.17T_m$ | 0% overshoot. |
| | $0.6T_m/K_m\tau_m$ | $T_m$ | 20% overshoot. |

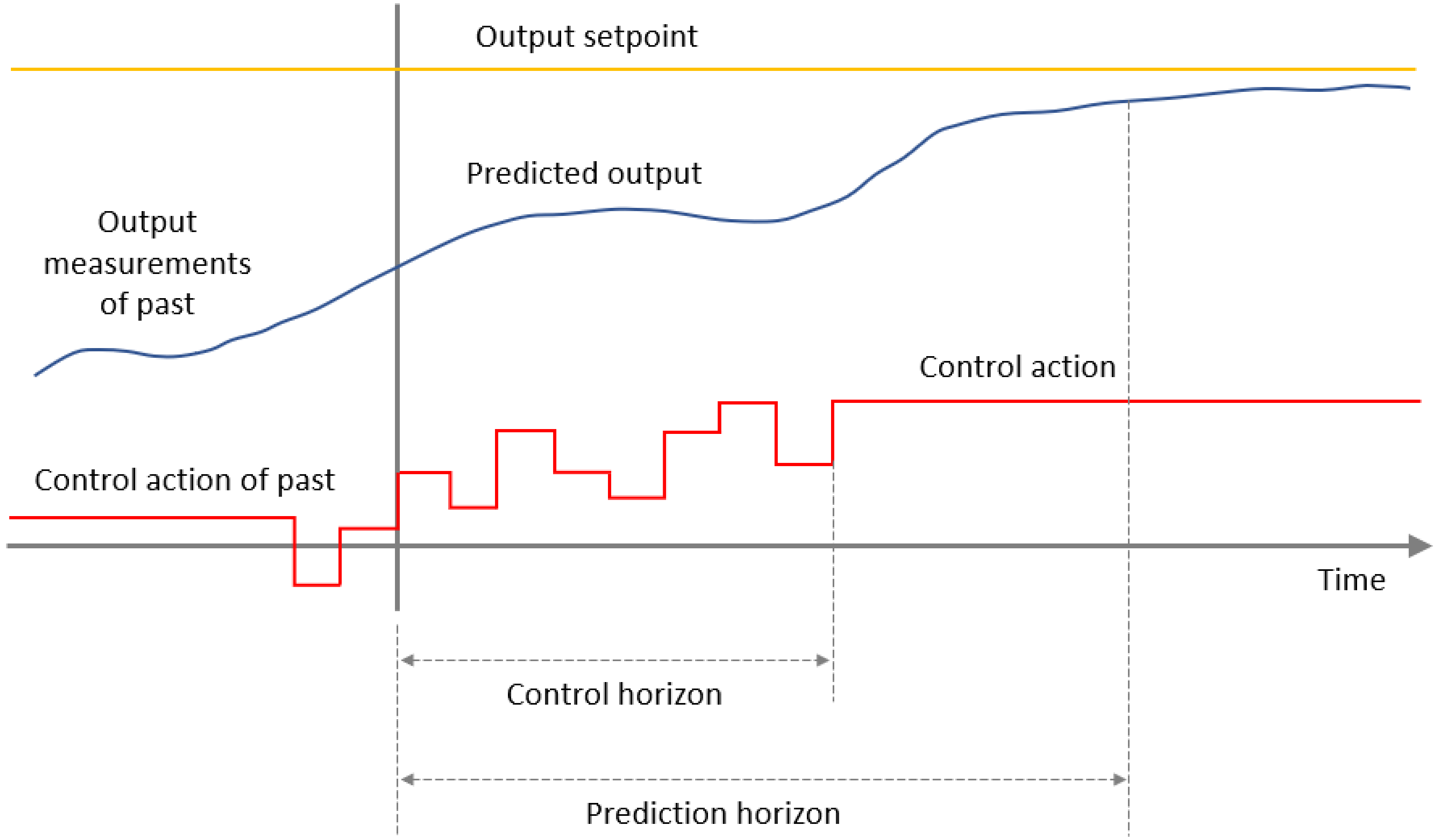
Handbook of PI and PID tuning rules, Aiden O’Dwyr, Dublin Institute of technology

Karl Johan Åstrom and Tore Hägglund, Lund Institute of Technology, Zweden

# REGELEN VAN PROCESSEN: MPC:

MPC : regelen met terugkoppeling
regelen van meerdere uitgangen met behulp van meerdere ingangen
optimalisatie in reële tijd
voorspelling van de toekomst om in het heden te beslissen

Het concept van voorspellen




Voorspelling van de procesuitgang
Optimalisatie van de stuuractie over een predictie horizon om de uitgang dichter bij de wenswaarde of gewenst traject te krijgen

# REGELEN VAN PROCESSEN: MPC:

Procesmodel (via identificatie)

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$x$ toestandsvector

$u$ stuurvector

begrenzingen

$U_{min} \leq u_i(k) \leq U_{max}$ Bvb: saturatie

$X_{min} \leq x_i(k) \leq X_{max}$ Bvb: niveau beperking

Kostfunctie: vaak kwadratisch

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{N} x^T(k)Qx(k) + \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{M-1} u^T(k)Ru(k)$$

Initialisatie $x(0)$

Optimalisatie een kort tijdsvenster

$$u_{opt} = \{u_{opt}(0), u_{opt}(1), \dots, u_{opt}(M)\}$$

$$x_{opt} = \{x_{opt}(0), x_{opt}(1), \dots, x_{opt}(N)\}$$

stuuractie

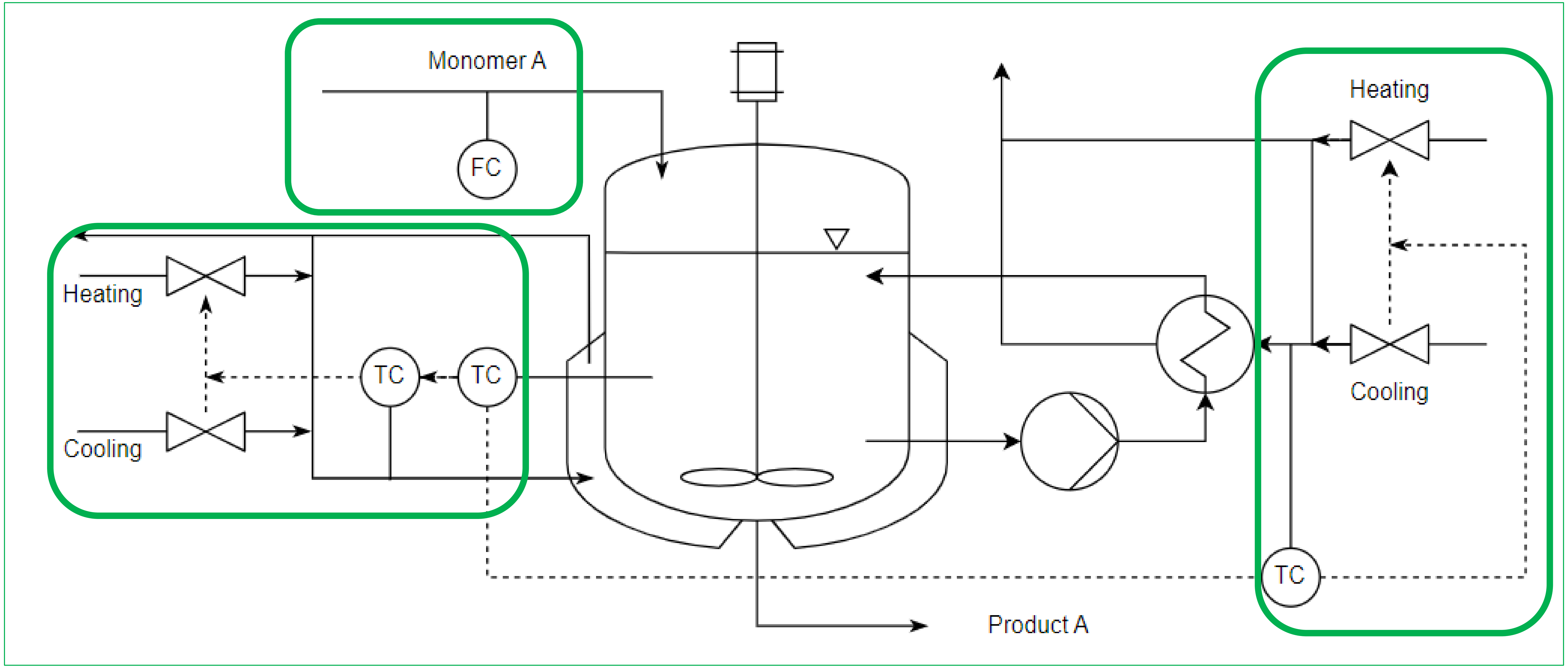
enkel $u_{opt}(0)$ wordt effectief gebruikt

$\Longrightarrow x(1)$

Alles opnieuw, venster verschuift met 1 tijdstap

# PROCESS: INDUSTRIAL POLYMERISATION REACTOR

**Input**




UNIVERSITEIT GENT

Ref: https://www.do-mpc.com/en/latest/example_gallery/industrial_poly.html

# MODEL THROUGH CONSERVATION

$$
\begin{aligned}
\dot{m}_{\mathrm{W}} &= \dot{m}_{\mathrm{F}}\,\omega_{\mathrm{W,F}} \\
\dot{m}_{\mathrm{A}} &= \dot{m}_{\mathrm{F}}\omega_{\mathrm{A,F}} - k_{\mathrm{R1}}\,m_{\mathrm{A,R}} - k_{\mathrm{R2}}\,m_{\mathrm{AWT}}\,m_{\mathrm{A}}/m_{\mathrm{ges}}, \\
\dot{m}_{\mathrm{P}} &= k_{\mathrm{R1}}\,m_{\mathrm{A,R}} + p_1\,k_{\mathrm{R2}}\,m_{\mathrm{AWT}}\,m_{\mathrm{A}}/m_{\mathrm{ges}}, \\
\dot{T}_{\mathrm{R}} &= 1/(c_{\mathrm{p,R}}m_{\mathrm{ges}})\,[\dot{m}_{\mathrm{F}}\,c_{\mathrm{p,F}}\,(T_{\mathrm{F}} - T_{\mathrm{R}}) + \Delta H_{\mathrm{R}} k_{\mathrm{R1}} m_{\mathrm{A,R}} - k_{\mathrm{K}} A\,(T_{\mathrm{R}} - T_{\mathrm{S}}) \\
&\quad - \dot{m}_{\mathrm{AWT}}\,c_{\mathrm{p,R}}\,(T_{\mathrm{R}} - T_{\mathrm{EK}})], \\
\dot{T}_S &= 1/(c_{\mathrm{p,S}}m_{\mathrm{S}})\,[k_{\mathrm{K}} A\,(T_{\mathrm{R}} - T_{\mathrm{S}}) - k_{\mathrm{K}} A\,(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{M}})], \\
\dot{T}_{\mathrm{M}} &= 1/(c_{\mathrm{p,W}}m_{\mathrm{M,KW}})\,[\dot{m}_{\mathrm{M,KW}}\,c_{\mathrm{p,W}}\,(T_{\mathrm{M}}^{\mathrm{IN}} - T_{\mathrm{M}}) \\
&\quad + k_{\mathrm{K}} A\,(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{M}})] + k_{\mathrm{K}} A\,(T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{M}})], \\
\dot{T}_{\mathrm{EK}} &= 1/(c_{\mathrm{p,R}}m_{\mathrm{AWT}})\,[\dot{m}_{\mathrm{AWT}}c_{\mathrm{p,W}}\,(T_{\mathrm{R}} - T_{\mathrm{EK}}) - \alpha\,(T_{\mathrm{EK}} - T_{\mathrm{AWT}}) \\
&\quad + k_{\mathrm{R2}}\,m_{\mathrm{A}}\,m_{\mathrm{AWT}}\Delta H_{\mathrm{R}}/m_{\mathrm{ges}}], \\
\dot{T}_{\mathrm{AWT}} &= [\dot{m}_{\mathrm{AWT,KW}}\,c_{\mathrm{p,W}}\,(T_{\mathrm{AWT}}^{\mathrm{IN}} - T_{\mathrm{AWT}}) - \alpha\,(T_{\mathrm{AWT}} - T_{\mathrm{EK}})]/(c_{\mathrm{p,W}}m_{\mathrm{AWT,KW}}),
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
U &= m_{\mathrm{P}}/(m_{\mathrm{A}} + m_{\mathrm{P}}), \\
m_{\mathrm{ges}} &= m_{\mathrm{W}} + m_{\mathrm{A}} + m_{\mathrm{P}}, \\
k_{\mathrm{R1}} &= k_0 e^{\frac{-E_a}{R(T_{\mathrm{R}}+273.15)}}\,(k_{\mathrm{U1}}\,(1 - U) + k_{\mathrm{U2}}U), \\
k_{\mathrm{R2}} &= k_0 e^{\frac{-E_a}{R(T_{\mathrm{EK}}+273.15)}}\,(k_{\mathrm{U1}}\,(1 - U) + k_{\mathrm{U2}}U), \\
k_{\mathrm{K}} &= (m_{\mathrm{W}}k_{\mathrm{WS}} + m_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{AS}} + m_{\mathrm{P}}k_{\mathrm{PS}})/m_{\mathrm{ges}}, \\
m_{\mathrm{A,R}} &= m_{\mathrm{A}} - m_{\mathrm{A}}m_{\mathrm{AWT}}/m_{\mathrm{ges}}.
\end{aligned}
$$

Parameter uncertainty

$$m_F^{acc} = \dot{m}_F$$

$$T_{adiab} = \frac{\Delta H_R}{c_{p,R}} \frac{m_A}{m_A + m_W + m_P} + T_R$$

UNIVERSITEIT GENT

# CONSTRAINTS

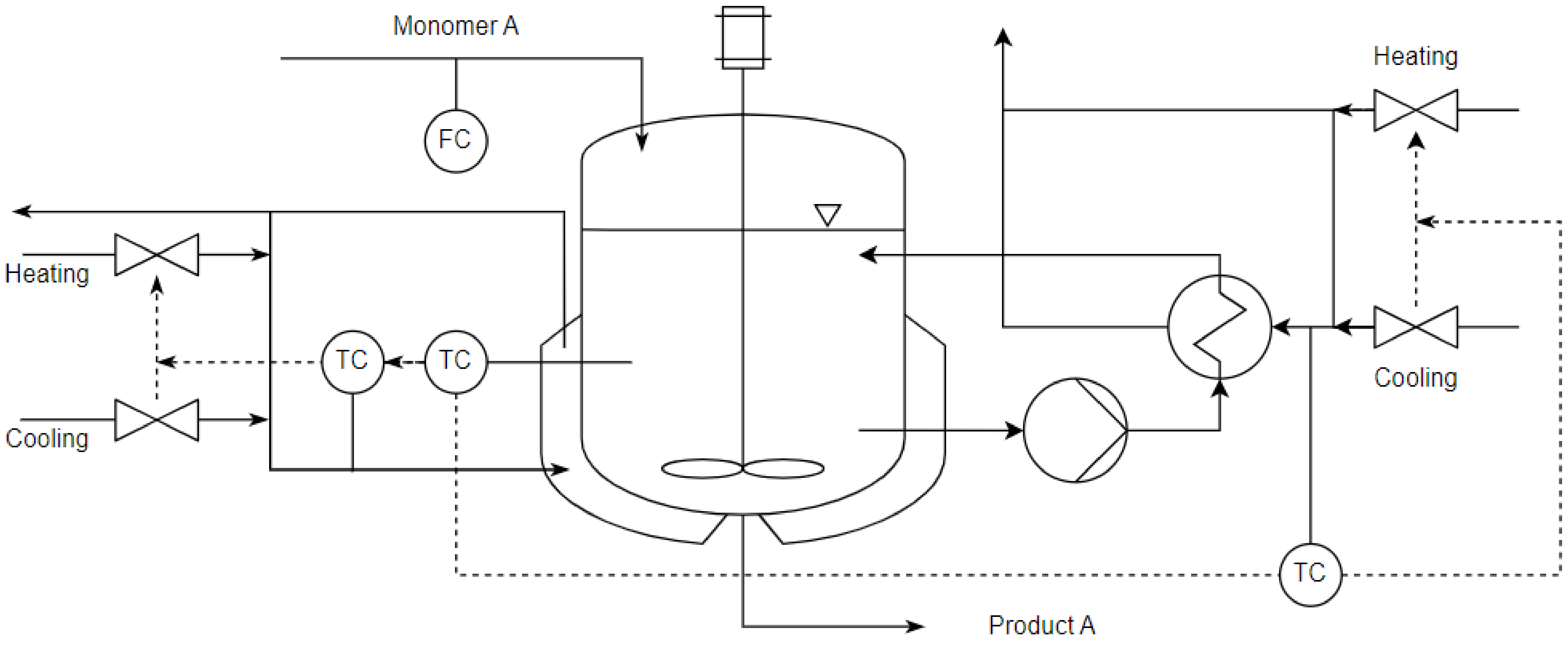
| Control | Min. | Max. | Unit |
|---|---|---|---|
| $\dot{m}_F$ | 0 | 30,000 | $\mathrm{kg\,h}^{=-1}$ |
| $T_M^{IN}$ | 60 | 100 | °C |
| $T_{AWT}^{IN}$ | 60 | 100 | °C |

| State | Init. cond. | Min. | Max. | Unit |
|---|---|---|---|---|
| $m_W$ | 10,000 | 0 | inf. | kg |
| $m_A$ | 853 | 0 | inf. | kg |
| $m_P$ | 26.5 | 0 | inf. | kg |
| $T_R$ | 90.0 | $T_{set} - 2.0$ | $T_{set} + 2.0$ | °C |
| $T_S$ | 90.0 | 0 | 100 | °C |
| $T_M$ | 90.0 | 0 | 100 | °C |
| $T_{EK}$ | 35.0 | 0 | 100 | °C |
| $T_{AWT}$ | 35.0 | 0 | 100 | °C |
| $T_{adiab}$ | 104.897 | 0 | 109 | °C |
| $m_F^{acc}$ | 0 | 0 | 30,000 | kg |

# OBJECTIVE

- Produce $m_P = 20680\ kg$ as fast as possible
- Smooth control performance: penalty on input changes

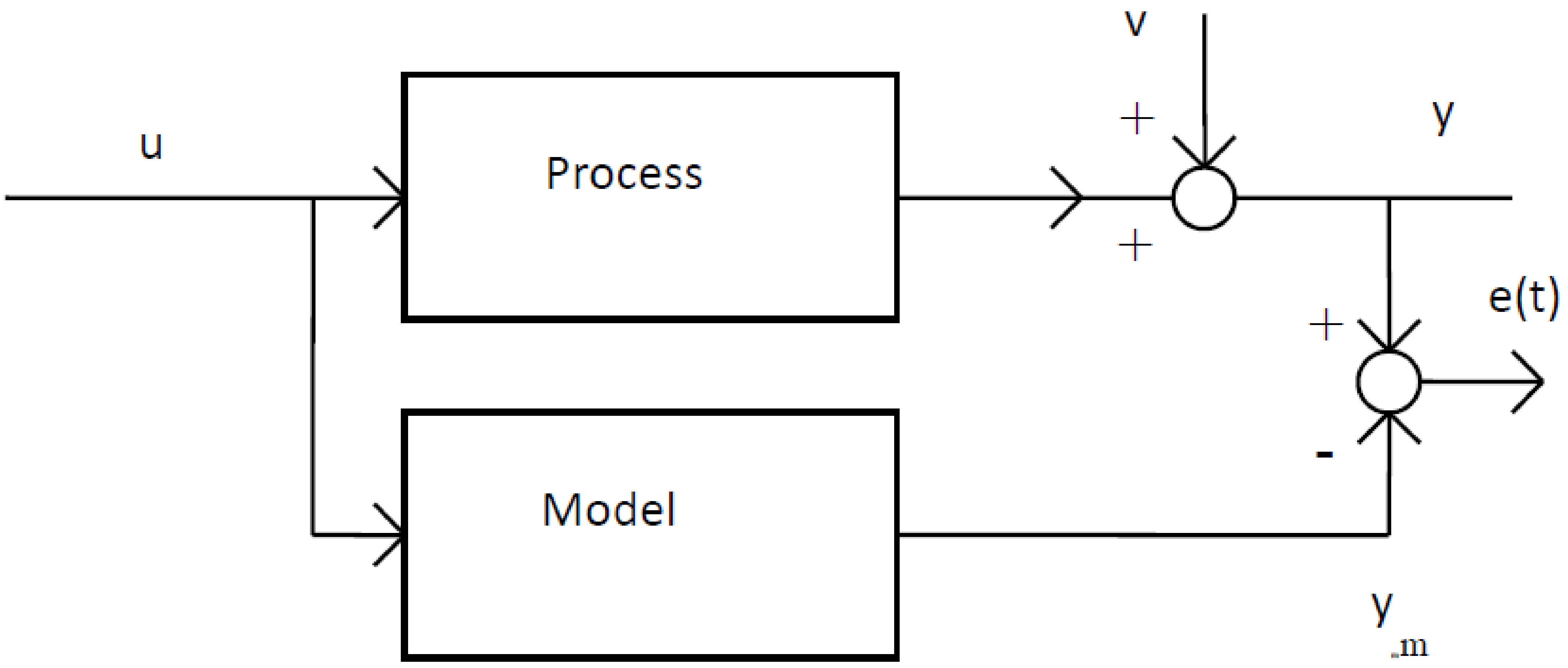
$$J(x,u,z) = \sum_{k=0}^{N} \left( \underbrace{l(x_k, z_k, u_k, p_k, p_{\text{tv},k})}_{\text{Lagrange term}} + \underbrace{\Delta u_k^T R \Delta u_k}_{\text{r-term}} \right) + \underbrace{m(x_{N+1})}_{\text{Mayer term}}$$




UNIVERSITEIT GENT

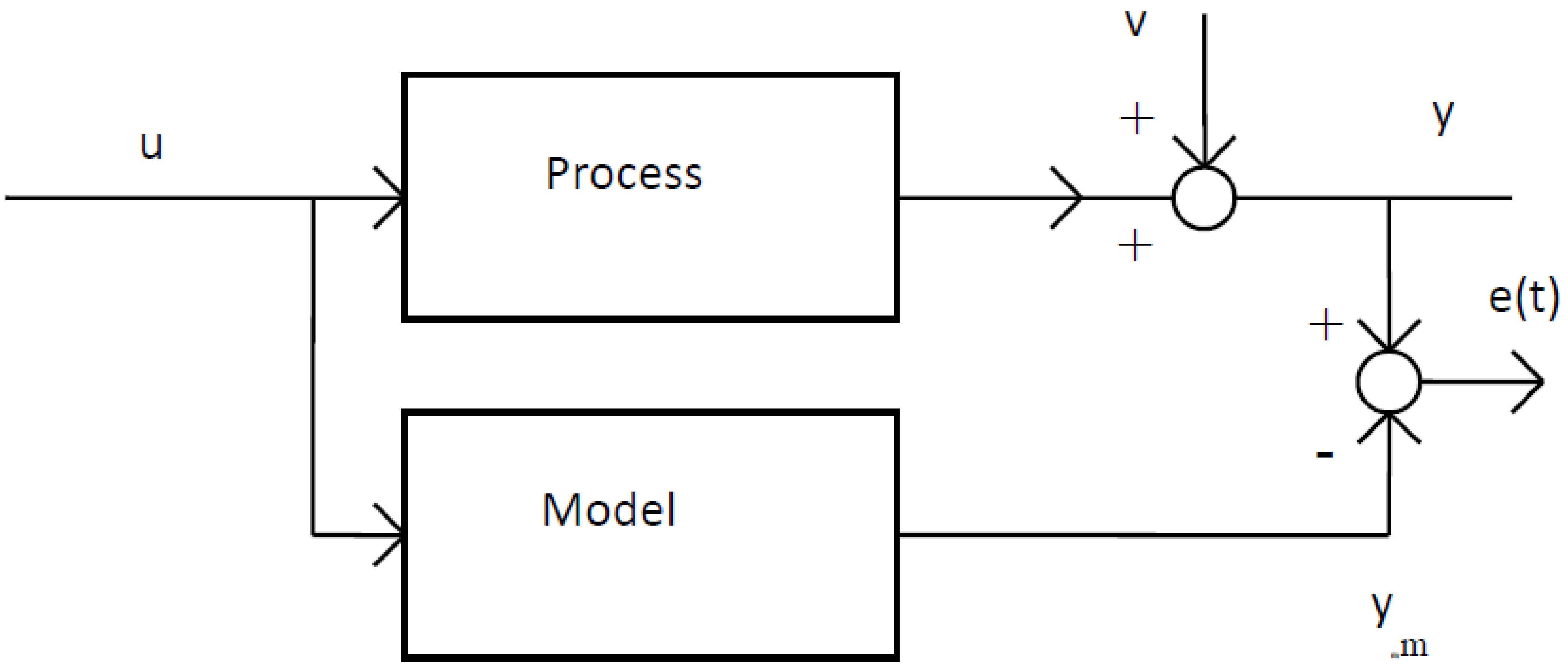
# SYSTEEM IDENTIFICATIE

- MPC steunt op accuraat model
- Opstellen behoud/krachtwetten=> ‘White box identification’
- Via Data => ‘Black box identification’
- Mix!

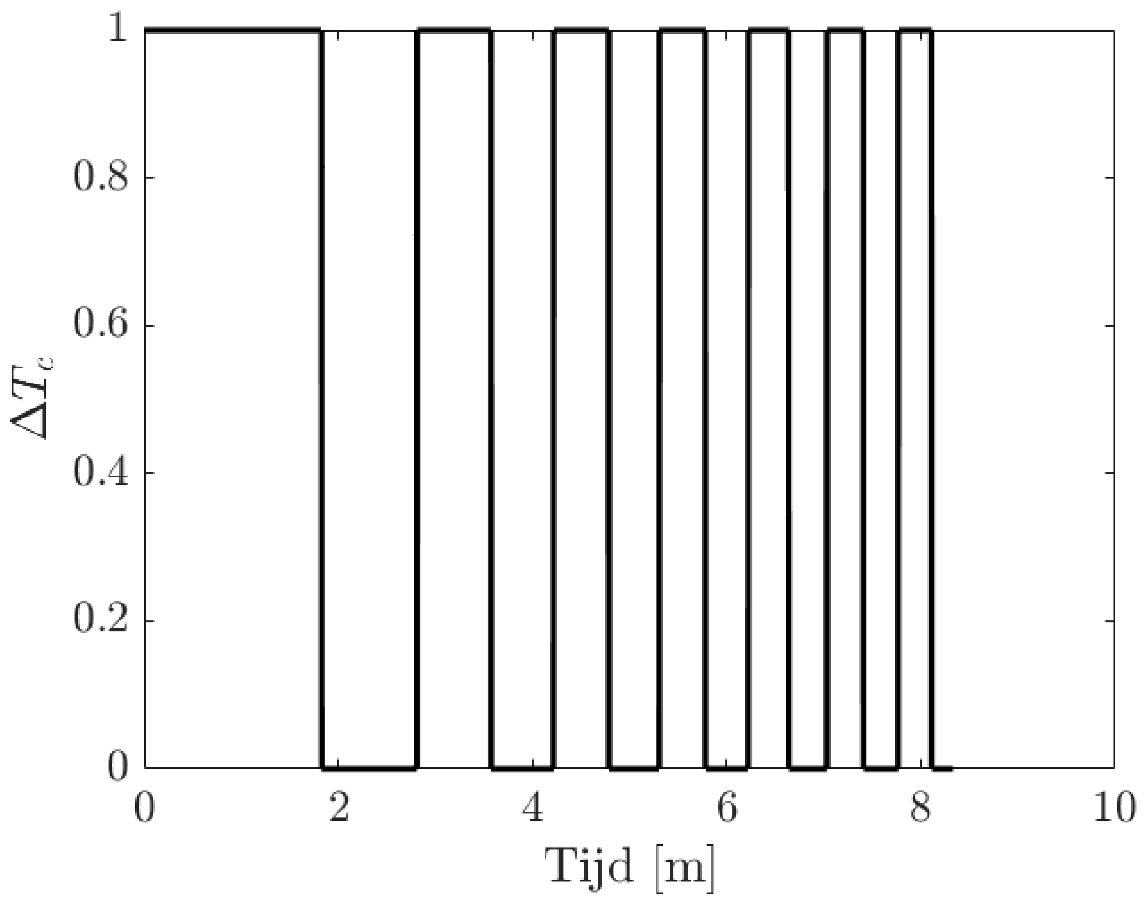


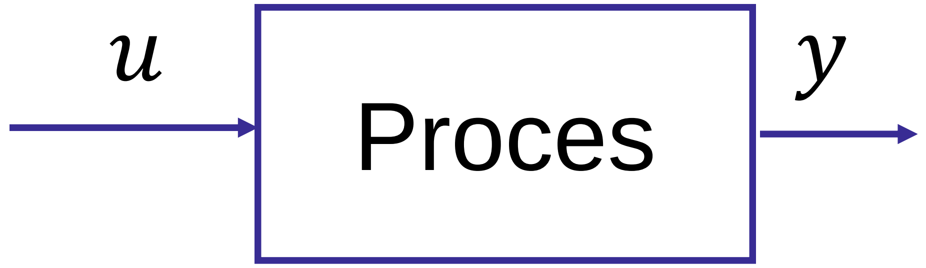
# SYSTEEM IDENTIFICATIE

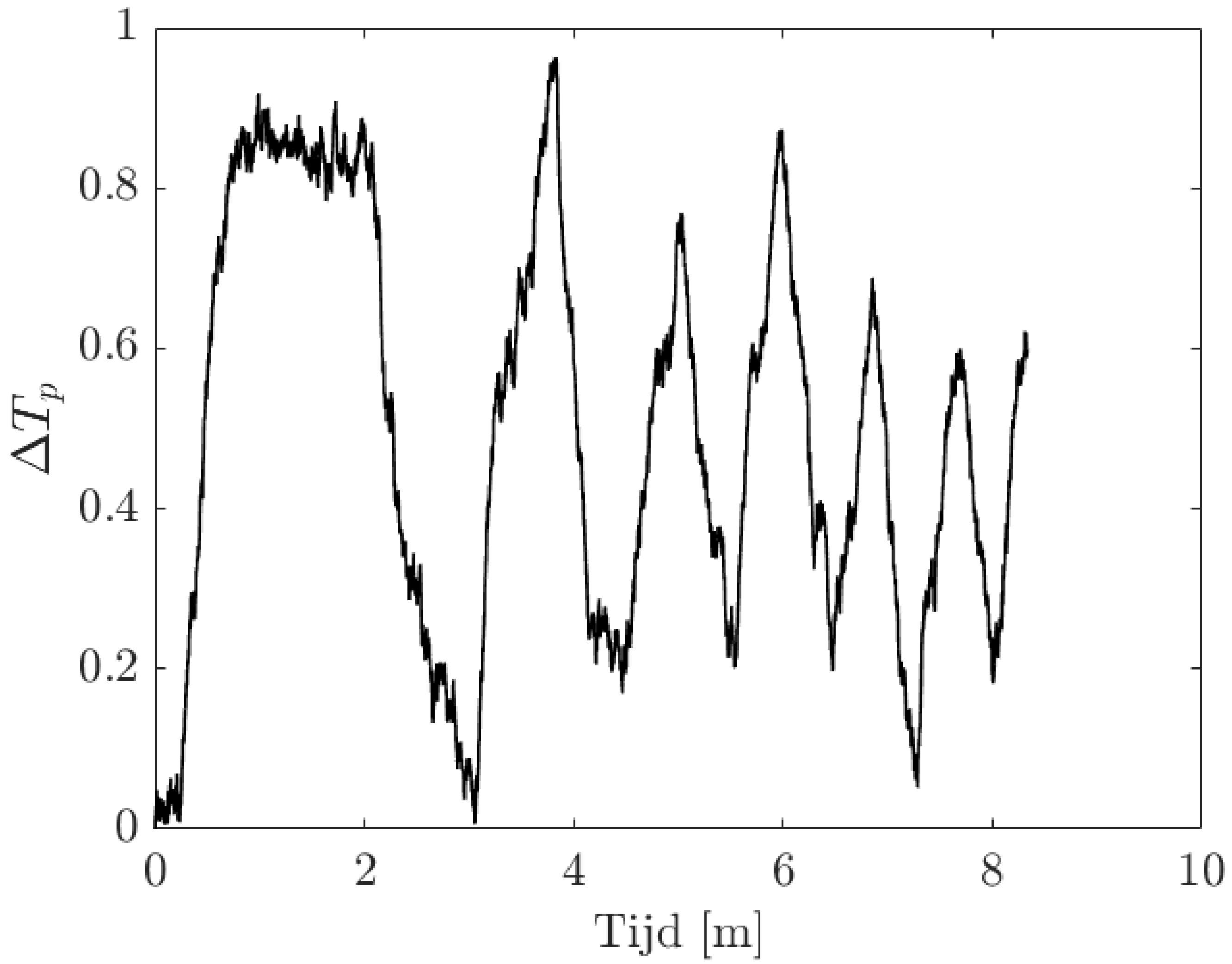
- MPC steunt op accuraat model
- Opstellen behoud/krachtwetten=> ‘White box identification’
- Via Data => ‘Black box identification’
- Mix!



# SYSTEEM IDENTIFICATIE




Ingang signaal: Daag systeem voldoende uit

- Verschillende werkingspunten
- Snelheden

Uitgang

- Type process?
- Tijdsvertraging

UNIVERSITEIT GENT

# SYSTEEM IDENTIFICATIE

- Via discrete metingen, vind parameters model met beste fit via optimalisatie
- ARX Model: $A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-d) + e(t)$

$$
\begin{aligned}
& y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \cdots + a_{n_a} y(t-n_a) \\
& = b_0 u(t-d) + b_1 u(t-d-1) \cdots + b_{n_b} b(t-d-n_b) + e(t)
\end{aligned}
$$

$$y(t) = \varphi(t)\theta + e(t)$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \cdots - y(t-n_a)\ u(t-d) \ldots u(t-d-n_b)]$$

$$\theta = [a_1\ a_2 \ldots a_{n_a}\ b_1\ b_2 \ldots b_{n_b}]$$

UNIVERSITEIT GENT

# SYSTEEM IDENTIFICATIE : OPTIMALISATIE

- Parameterschatting = optimalisatie!

Hoe Theta schatten? $y(t) = \varphi(t)\hat{\theta} + e(t)$

Meting

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(0) \\ \varphi(1) \\ \vdots \\ \varphi(N-1) \end{bmatrix} \hat{\theta} + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(N-1) \end{bmatrix}$$

$$\vec{Y} = \vec{\varphi} \cdot \vec{\hat{\theta}} + \vec{e}$$

Kostenfunctie $J = \sum_0^{N-1} e^2(t) = \vec{e} \cdot \vec{e}^T = [\vec{Y} - \vec{\varphi} \cdot \vec{\hat{\theta}}]^T [\vec{Y} - \vec{\varphi} \cdot \vec{\hat{\theta}}]$

Afgeleide = 0 ? $\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2\vec{\varphi}^T \vec{Y} + 2\vec{\varphi}^T \vec{\varphi} \cdot \vec{\hat{\theta}}$

Optimale schatting $\vec{\hat{\theta}} = [\vec{\varphi}^T \vec{\varphi}]^{-1} \vec{\varphi} \cdot \vec{Y}$

# SYSTEEM IDENTIFICATIE

- Algemeen model (met ruismodel):

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$$

- Numerieke optimalisatie nodig

  Voorbeeld MATLAB meting heathexchanger
- Orde A en B verhogen: in theorie betere fit
- Praktijk: Systeem niet lineair, complexe verstoring/ruis: optimale orde

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
EN ARCHITECTUUR


# Kevin Dekemele, Jasper Juchem
# Mia Loccufier

Dynamical Systems and Control

E Kevin.Dekemele@ugent.be
E Jasper.Juchem@ugent.be
E Mia.Loccufier@ugent.be
T +32 9 264 55 87


Universiteit Gent
@ugent
@ugent
Ghent University

www.ugent.be

UNIVERSITEIT
GENT