



# Meet- en Regeltechniek

## Les 1: Inleiding en modelvorming

Prof. dr. ir. Toon van Waterschoot

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

**ESAT** – Departement Elektrotechniek

KU Leuven, Belgium



# Onderzoeksafdeling



- **STADIUS** Centrum voor Dynamische Systemen, Signaalverwerking en Data-Analyse:
  - **Dynamische Systemen:** identificatie, optimalisatie, regeltechniek, systeemtheorie
  - **Signaalverwerking:** spraak- & audioverwerking, digitale communicatie, biomedische signaalverwerking
  - **Data-Analyse:** machine learning, bio-informatica
- **AdvISe** – Advanced Integrated Sensing Lab:
  - **Biomedisch:** biomedische technologie, ambient assisted living
  - **Audio:** akoestische modellering, audio-analyse, akoestische signaalverbetering
  - **Chip-ontwerp:** stralingsharde elektronica

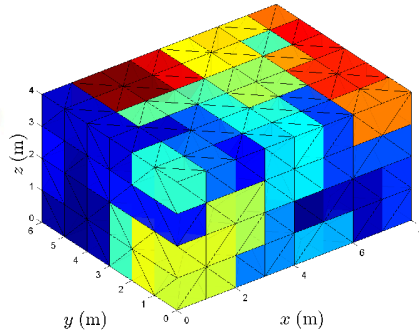


Advanced Integrated Sensing



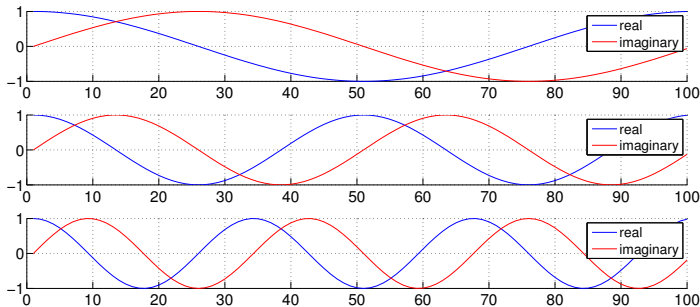
# Onderzoekstopics

Cochlear®  
ATBaha



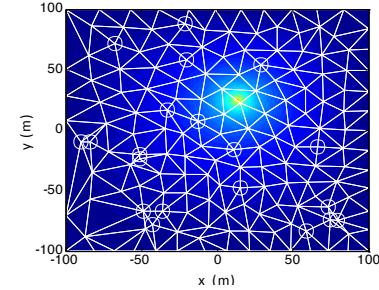
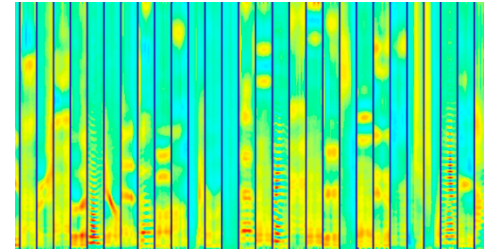
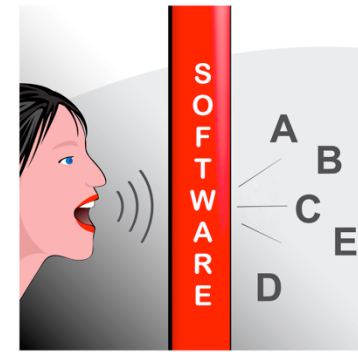
## Acoustic modeling

- ear modeling
- room modeling
- loudspeaker modeling
- signal modeling



## Audio signal analysis

- speech recognition
- event detection
- source localization
- audio classification



## Acoustic signal enhancement

- noise reduction
- echo/feedback control
- room equalization



**KU LEUVEN**

# Contactgegevens

## Toon van Waterschoot

- Mail: [toon.vanwaterschoot@esat.kuleuven.be](mailto:toon.vanwaterschoot@esat.kuleuven.be)
- Kantoor (enkel op Campus Leuven):  
Departement Elektrotechniek (ESAT-STADIUS)  
Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Leuven  
lokaal: B.00.17  
telefoon: +32 16 321788

# 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

# Meet- en Regeltechniek: Tijdschema

- **Hoorcolleges: maandag 10:45 – 12:45**

- 09/02: Les 1
- 16/02: Les 2
- 23/02: Les 3
- 02/03: Les 4
- 09/03: Les 5
- 16/03: Les 6
- 23/03: Les 7
- 30/03: Les 8
- 20/04: Les 9
- 27/04: Les 10
- 04/05: Les 11
- 11/05: Les 12
- 18/05: Les 13

# Meet- en Regeltechniek: Lesmateriaal

- **Deel 1: Systeemtheorie**

- **Cursustekst** (beschikbaar op Toledo)

- [Nise] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, Wiley, uitg. 6, 2011. Hoofdstuk: 1
- [Baeten, REG1] J. Baeten, *Regeltechniek 1: Basis Regeltechniek*, KHLim, uitg. 2005. Hoofdstuk: 1
- [Baeten, SYST] J. Baeten, *Systeemtheorie*, KHLim, uitg. 2006. Hoofdstukken: 3 – 5

- **Slides** (beschikbaar op Toledo)

- [van Waterschoot, MR] T. van Waterschoot, *Slides Meet- en Regeltechniek*, KU Leuven, uitg. 2015. Lessen: 1 – 3

- **Bijkomende literatuur** (beschikbaar op Toledo)

- [Baeten, SYST] J. Baeten, *Systeemtheorie*, KHLim, uitg. 2006. Hoofdstukken: 2, 6 (Signaaltransformaties)

# Meet- en Regeltechniek: Lesmateriaal

- **Deel 2: Analoge regeltechniek**

- **Cursustekst** (beschikbaar op Toledo)

- [Baeten, REG1] J. Baeten, *Regeltechniek 1: Basis Regeltechniek*, KHLim, uitg. 2005. Hoofdstukken: 2 – 7
- [Baeten, REG2, Deel 2] J. Baeten, *Regeltechniek 2, Deel 2: Niet-lineaire Regeltechniek - Aan/Uit-regelaars*, KHLim, uitg. 2005. Hfst.: 1

- **Slides** (beschikbaar op Toledo)

- [van Waterschoot, MR] T. van Waterschoot, *Slides Meet- en Regeltechniek*, KU Leuven, uitg. 2015. Lessen: 4 – 11

- **Bijkomende literatuur** (beschikbaar op Toledo)

- [Tan, 2006] W. Tan *et al.*, “Comparison of some well-known PID tuning formulas,” *Comput. Chem. Eng.*, 30 (2006): 1416-1423.

- **Oefeningenbundel + voorbeeldoefeningen** (beschikbaar op Toledo)

- **Software** (beschikbaar op Toledo)



# Meet- en Regeltechniek: Lesmateriaal

- **Deel 3: Digitale regeltechniek**

- **Cursustekst** (beschikbaar op Toledo)

- [Baeten, REG2, Deel 1] J. Baeten, *Regeltechniek 2, Deel 1: Digitale Regeltechniek*, KHLim, uitg. 2006. Hoofdstukken: 3 – 6

- **Slides** (beschikbaar op Toledo)

- [van Waterschoot, MR] T. van Waterschoot, *Slides Meet- en Regeltechniek*, KU Leuven, uitg. 2015. Lessen: 12 – 13

- **Bijkomende literatuur** (beschikbaar op Toledo)

- [Baeten, REG2, Deel 1] J. Baeten, *Regeltechniek 2, Deel 1: Digitale Regeltechniek*, KHLim, uitg. 2006. Hoofdstuk: 1 (Discete systemen)
- [Baeten, REG2, Deel 1] J. Baeten, *Regeltechniek 2, Deel 1: Digitale Regeltechniek*, KHLim, uitg. 2006. Hoofdstuk: 2 (Z-transformatie)

# Meet- en Regeltechniek: Structuur

**Meet- en Regeltechniek**  
(Z25021)

**Meet- en Regeltechniek**  
(Z11475)

**Regeltechniek (Z60045 – Z50108)**

**Virtuele instrumentatie (Z60046)**

**Meet- en Regeltechniek pract.**  
(Z50002)

**Meet- en regeltechniek pract.**  
(Z60048)

- 3BACH IW richting Elektronica-ICT
- Schakel IW richting Elektronica-ICT, **optie ICT**

- Schakel IW richting Elektronica-ICT, **optie ELO**
- Schakel IW richting Elektronica-ICT, **optie biomed**

# Meet- en Regeltechniek: Labo

- Meet- en Regeltechniek practicum
  - **Doel:** leren werken met PLC (Programmeerbare Logische Controller) als computersysteem voor industriële besturingstaken en meet- en regeltoepassingen
  - **Docenten:**
    - Hugo Belmans ([hugo.belmans@kuleuven.be](mailto:hugo.belmans@kuleuven.be))
    - Walter Mertens ([walter.mertens@kuleuven.be](mailto:walter.mertens@kuleuven.be))
  - **Uurrooster:** 6 x 2u

# Meet- en Regeltechniek: Examen

- **Examenvorm theorie:**

- mondeling met schriftelijke voorbereiding
- gesloten boek (enkel rekentoestel en formularium zijn toegelaten)
- theorievragen en oefeningen

- **Puntenverdeling:**

- eindcijfer = gewogen gemiddelde van alle onderwijs- en leeractiviteiten (OLAs)
- gewichtsfactor = verhouding studiepunten OLA/OPO:
  - Z25021: 50% theorie + 20% practicum + 30% virt. instrumentatie
  - Z11475: 77% theorie + 23% practicum

- **Voorbeeldexamen/Formularium:** beschikbaar op Toledo

# Meet- en Regeltechniek: Vakinhoud

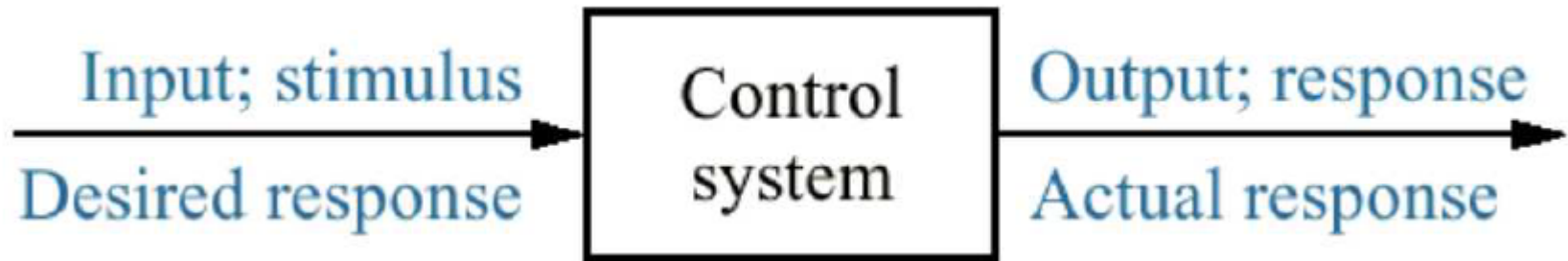
- **Deel 1: Systemtheorie**
  - Les 1: Inleiding en modelvorming
  - Les 2: Systemen van eerste orde
  - Les 3: Systemen van tweede & hogere orde en met dode tijd
- **Deel 2: Analoge regeltechniek**
  - Les 4: De regelkring
  - Les 5: Het wortellijnendiagram
  - Les 6: Oefeningen wortellijnendiagram
  - Les 7: De klassieke regelaars
  - Les 8: Regelaarontwerp + oefeningen
  - Les 9: Systemidentificatie 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 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Wat is een regelsysteem?

- In zijn eenvoudigste vorm geeft een regelsysteem een uitgangssignaal (responsie) voor een gegeven ingangssignaal (stimulus)



# Waarom hebben we regelsystemen nodig?

- vermogenversterking  
(bv. vermogensturing van radarantenne)
- besturing vanop afstand  
(bv. telerobotische operaties, ontmijningrobot)
- gemak van het ingangssignaal  
(bv. converteer positie van thermostaat naar kamertemp.)
- compenseren van verstoringen  
(bv. cruise control en bv. bergop en/of wind)
- verbeteren van de snelheid, nauwkeurigheid, herhaalbaarheid, ... van het systeem

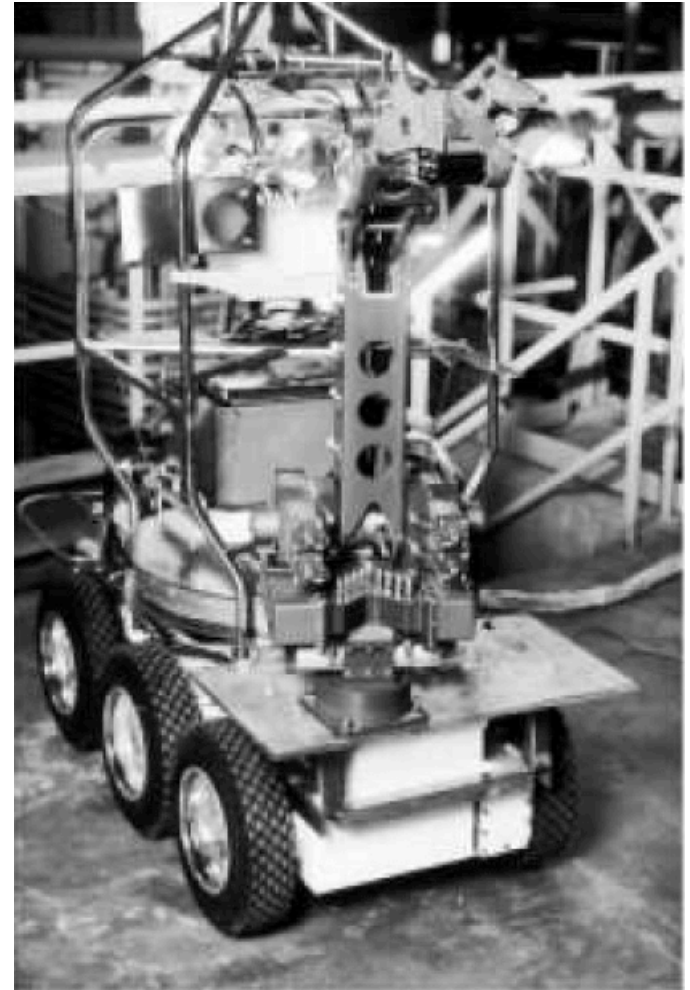


# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

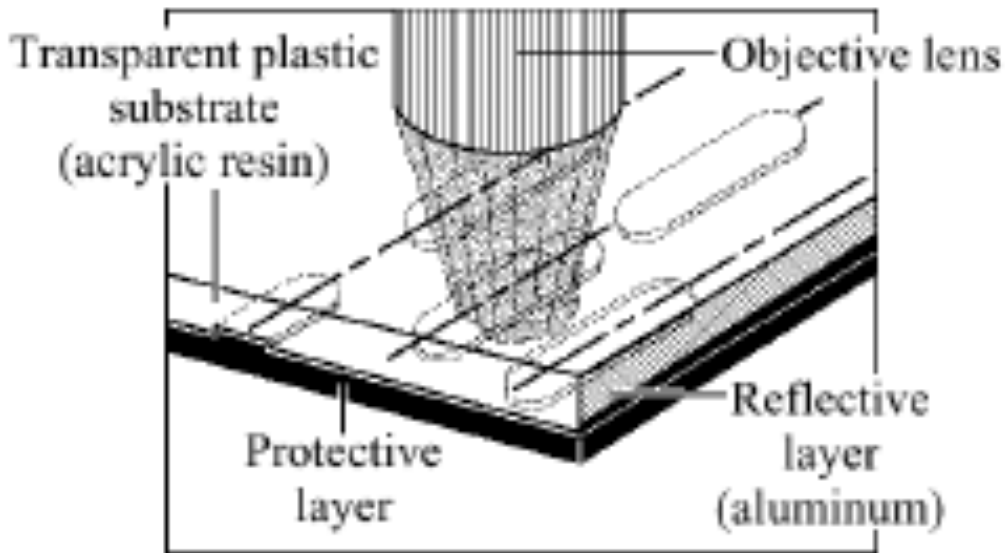
# Voorbeelden van regelsystemen (1)

- Rover is gebouwd om te werken in gecontamineerde gebieden op Three Mile Island in Middleton, PA, waar een nucleair ongeval gebeurde in 1979.
- De op afstand geregelde arm van de robot zie je vooraan op het voertuig.



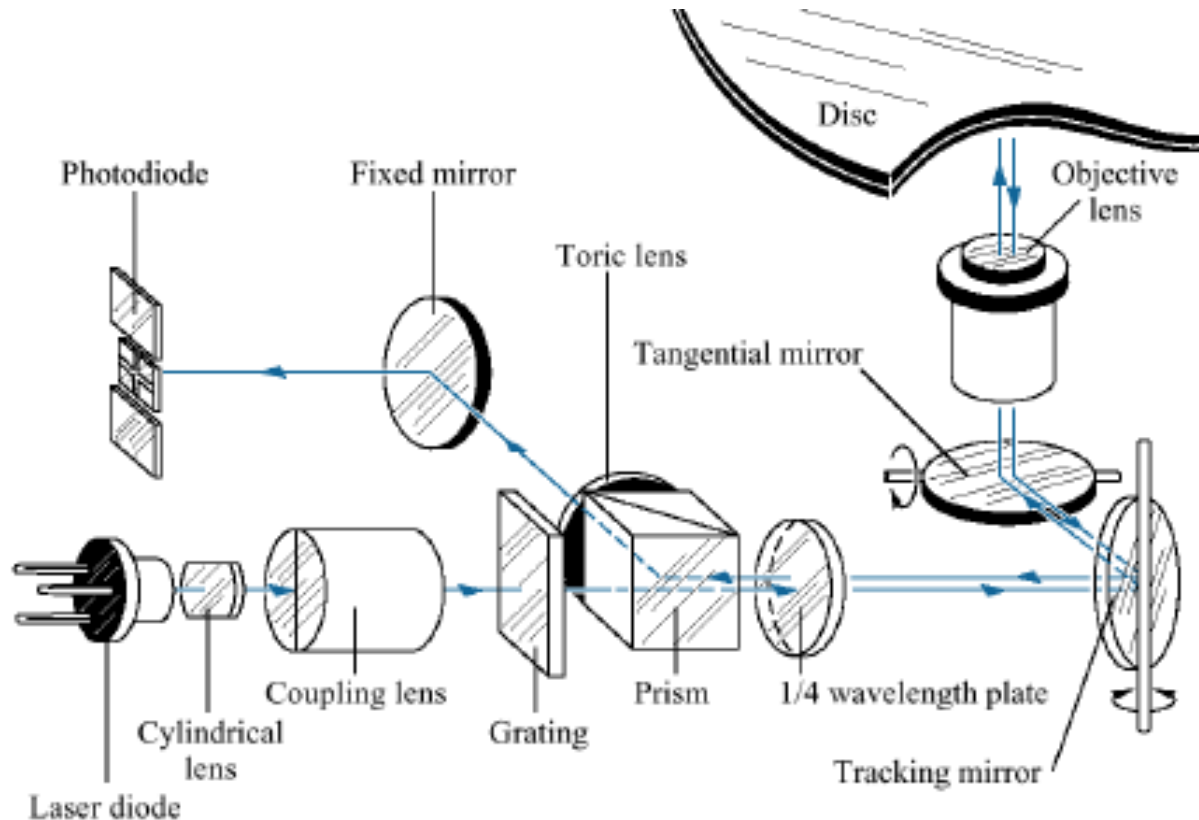
# Voorbeelden van regelsystemen (2)

- Video laser disk speler
- Objectief leest gaten op een laser disk



# Voorbeelden van regelsystemen (3)

- Optisch pad voor het afspelen met “tracking” spiegel die geroteerd wordt door regelsysteem zodat laserstraal gepositioneerd blijft op sporen van gaten.



# Voorbeelden van regelsystemen (4)

- **Tijdsoptimale regeling van kraan**
- **Doel:**
  - snelle kraanbewegingen
  - minimale residuële beweging last
- **Oplossing:**
  - Time Optimal Model Predictive Control (TOMPC)
  - implementatie op xPC target, bemonstering aan 60 Hz



Doctoraatsonderzoek Lieboud Van den Broeck

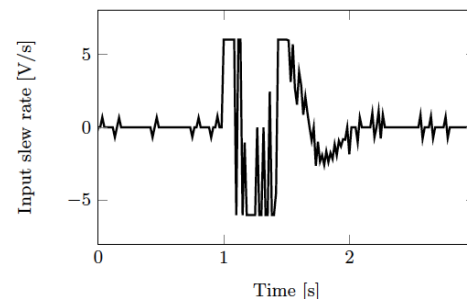
<https://www.mech.kuleuven.be/en/pma/research/robotics/media#section-2>

A model predictive control approach for time optimal point-to-point motion control

Lieboud Van den Broeck<sup>a,\*</sup>, M. Diehl<sup>b</sup>, J. Swevers<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Celestijnenlaan 300 B, B-3001 Leuven, Belgium

<sup>b</sup> Department of Electrical Engineering, Kasteelpark Arenberg 10, B-3001 Leuven, Belgium



**KU LEUVEN**

# Voorbeelden van regelsystemen (5)

- **Optimale clipping van audiosignalen**
- **Doel:**
  - audiosignaal door niet-lineair systeem sturen
  - met minimaal waarneembare vervorming
- **Oplossing:**
  - FPGA-implementatie convexe optimalisatie

IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH, AND LANGUAGE PROCESSING, VOL. 20, NO. 10, DECEMBER 2012



## Real-Time Perception-Based Clipping of Audio Signals Using Convex Optimization

Bruno Defraene, *Student Member, IEEE*, Toon van Waterschoot, *Member, IEEE*, Hans Joachim Ferreau, Moritz Diehl, *Member, IEEE*, and Marc Moonen, *Fellow, IEEE*

Doctoraatsonderzoek Bruno Defraene

<ftp://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/vanwaterschoot/abstracts/11-127.html>

# Voorbeelden van regelsystemen (6)

- **Regeling van power kites**
- **Doelstelling:**
  - kite-traject optimaliseren/stabiliseren
  - geleverd vermogen maximaliseren

HIGHWIND Project, Prof. Moritz Diehl

<http://homes.esat.kuleuven.be/~highwind/>

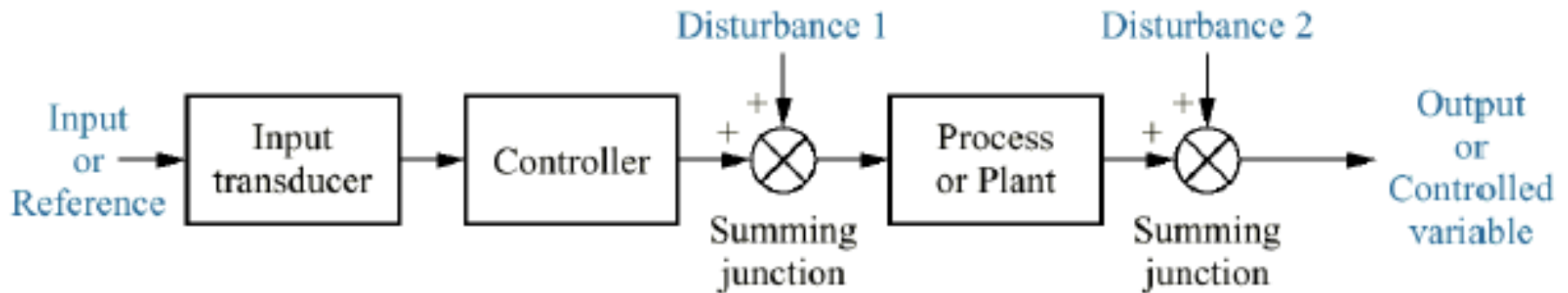
# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren



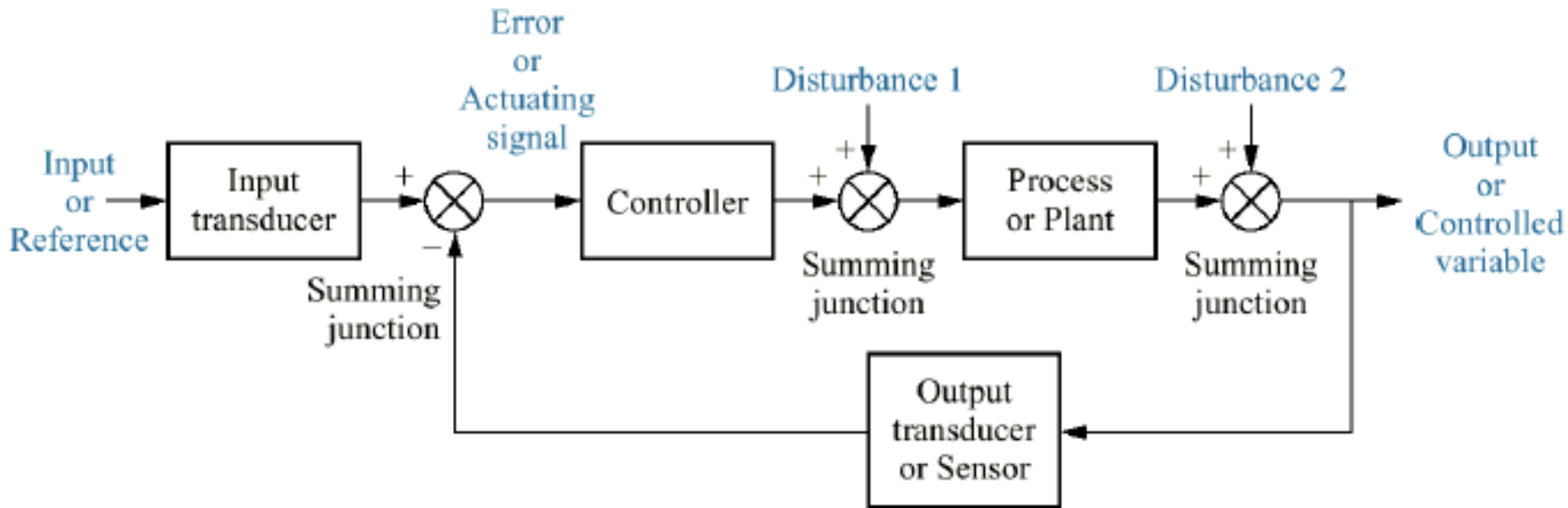
# Sturen vs. regelen (1)

- Openlussysteem = sturing



# Sturen vs. regelen (2)

- Geslotenlussysteem = regeling

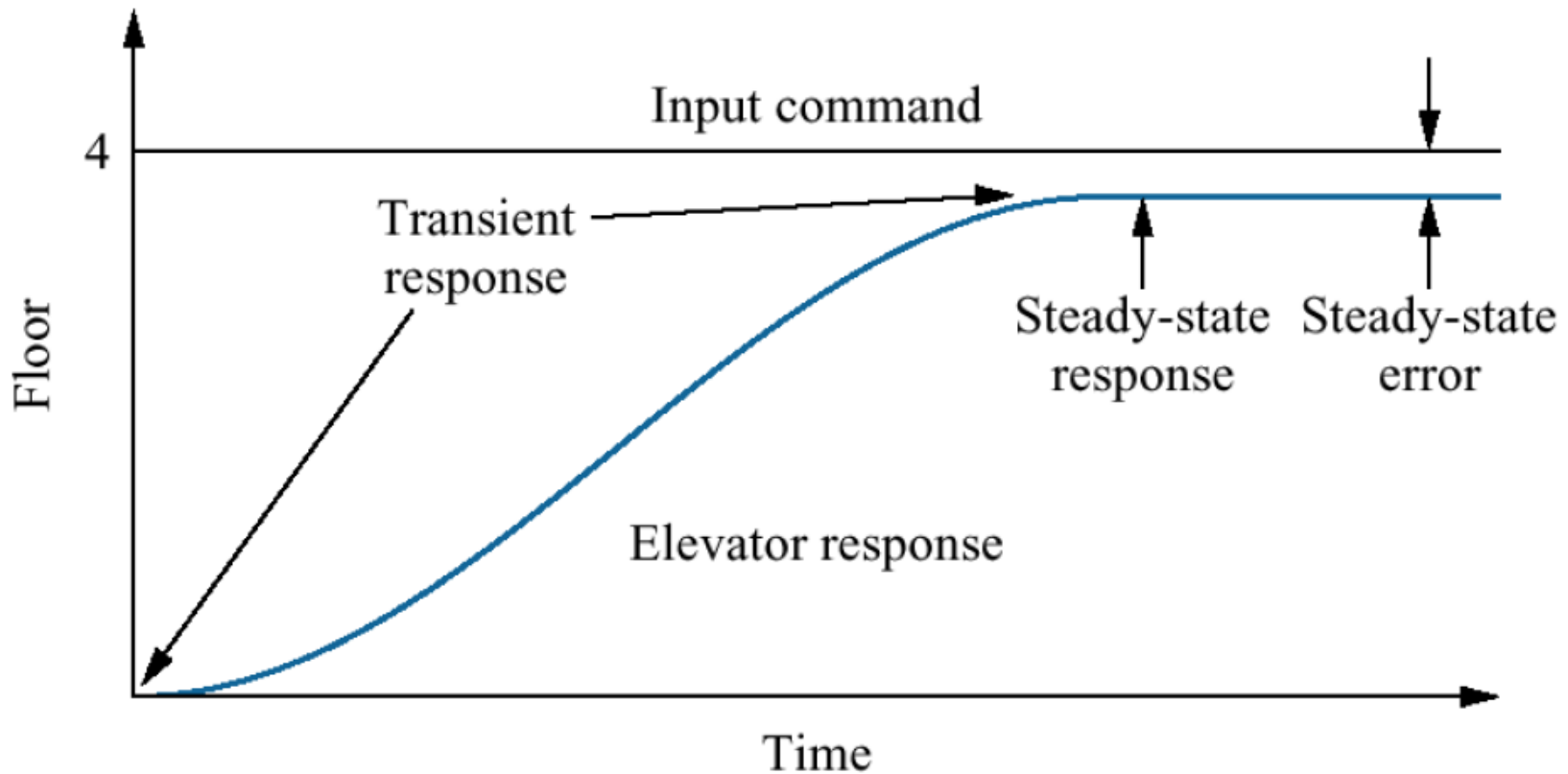


# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - **Transiente vs. steady-state responsie**
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Transiente vs. steady-state responsie (1)

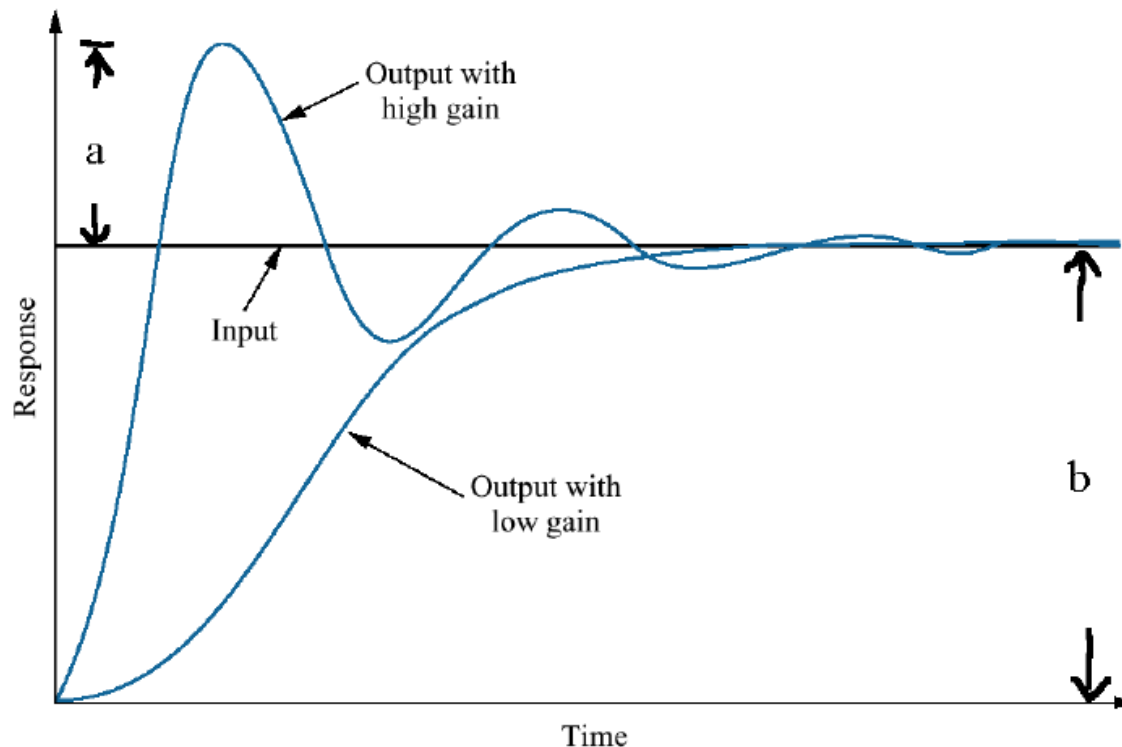
- Voorbeeld: regeling van lift



# Transiente vs. steady-state responsie (2)

Stapresponsie van een positieregelsysteem met effect van hoge en lage regelaar versterking

$$\% \text{ Overshoot (doorschot)} = \frac{a}{b} \times 100\%$$



# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Regelobjectieven

- Stabilisatie van systeem
- Genereren van gewenste transient responsie
- Vermindering/eliminatie van standfout
- Robuustheid tegen storing en variaties in procesparameters
- Behalen van optimale performantie

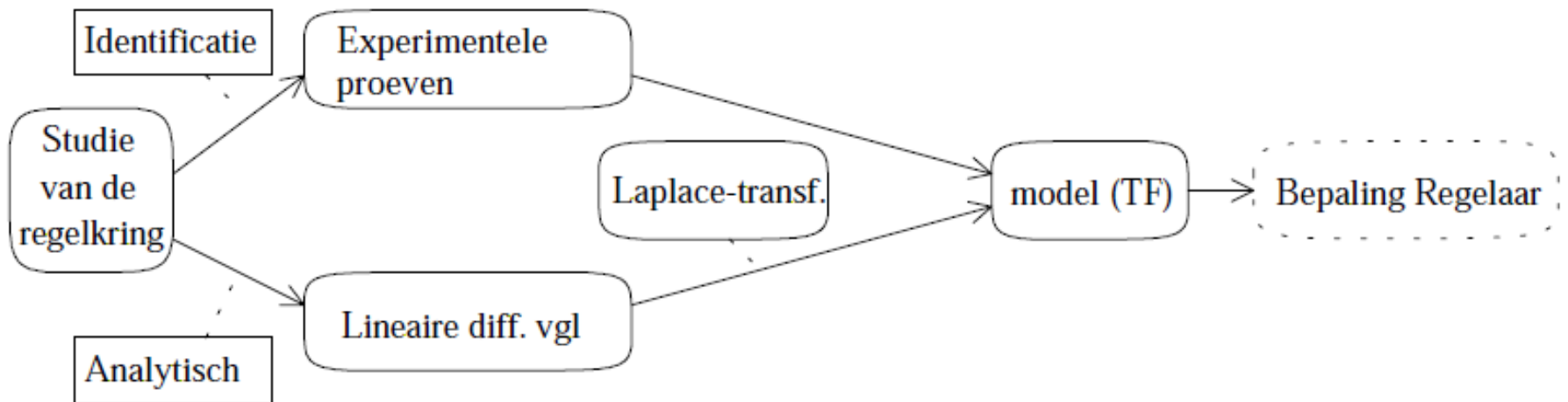
# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren



# Hoe stellen we de regelkring in?

- Met behulp van een model van het systeem:
  - Analytisch: meestal via lineaire diff. vgl. + Laplace-transform.
  - Experimenteel: via systeemidentificatie



# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

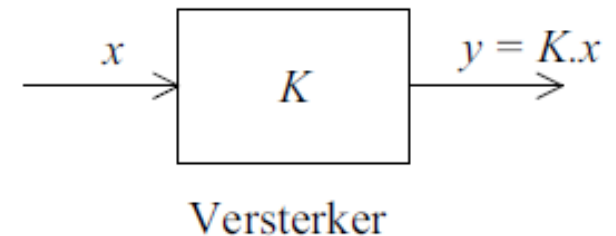
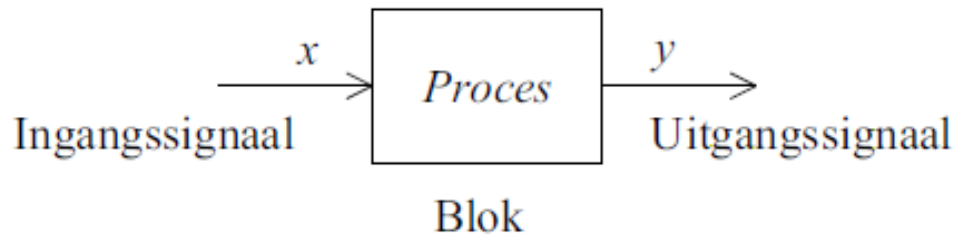
# Modelvorming: waarom en hoe? (1)

- Om een proces in te stellen hebben we een model van het te regelen proces nodig
- Elk regelsysteem kan beschreven worden door een blokkendiagram
- **Waarom?** Met het systeemmodel kan men
  - systeemgedrag verklaren (tijd, frequentie)
  - probleem opdelen in deelproblemen (vereenvoudiging)
- **Hoe?**
  - systeemvergelijkingen opstellen en lineariseren (vereenvoudigen)
    - differentiaalvergelijking oplossen
    - of omzetten van tijd- naar frequentiedomein (eenvoudiger)

# Modelvorming: waarom en hoe? (2)

- **Beperkingen?**

- lineariseerbaar en tijdsinvariant (geen  $f(t)$ ) en causaal verband ingang-uitgang

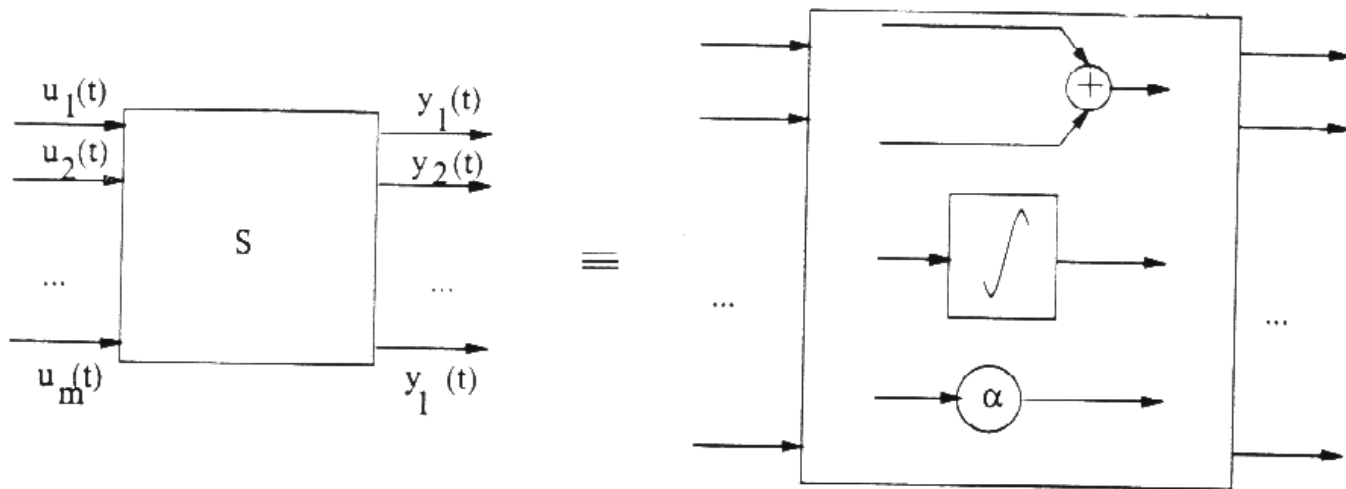


# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Lineaire tijdsinvariante systemen (1)

- Drie soorten basisblokken:
  - Integrator:  $y(t) = \int_0^t u(t)dt + y(t_0)$   
(op  $t_0$  treedt het systeem in werking)
  - Sommatiepunt:  $y(t) = u_1(t) + u_2(t)$
  - Schaalement:  $y(t) = \alpha u(t)$



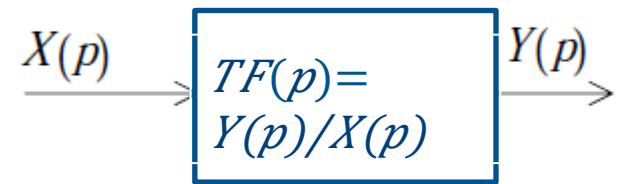
# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - **Transfertfunctie**
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Transfertfunctie

## Basisblokken omzetten naar Laplace domein

- $TF(p) = \frac{\text{uitgang}(p)}{\text{ingang}(p)}$
- $p$ -variabele
- $x(0) = 0$  veronderstelt dynamisch assenkruis
- Laplace-transf. van differentiator  
 $= pX(p) + x(0)$
- Enkel geldig voor lineaire tijdsinvariante systemen  
➡ niet-lineaire systemen lineariseren!



*Blok*

$$x(t) \longrightarrow X(p)$$

$$\frac{d x(t)}{dt} \longrightarrow pX(p)$$

$$\int x(t) dt \longrightarrow \frac{1}{p} X(p)$$

*Transformatie regels*

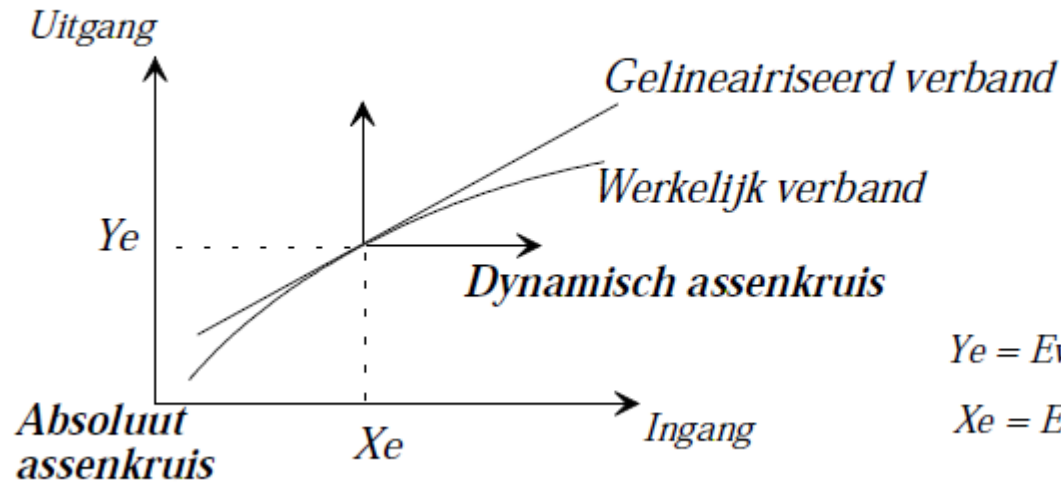


# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Dynamisch assenkruis (1)

## Algemeen



$Y_e = \text{Evenwichtswaarde uitgang}$

$X_e = \text{Evenwichtswaarde ingang}$

# Dynamisch assenkruis (2)

- Waarom assenstelsel verplaatsen?
  - Rekenwerk vereenvoudigen!
  - Veronderstel niet-lineaire relatie:  $y(x) = -x^2 + 10x$
  - Werkingsgebied rond  $X_e = 2$

➡ lineariseren rond  $X_e = 2$  (Taylor-benadering):

$$\begin{aligned}\hat{y}(x) &= y(2) + \left[ \frac{d(y(x))}{dx} \right]_{x=2} (x - 2) \\ &= 16 + (-2 * 2 + 10)(x - 2) \\ &= \text{offset} + H(X - X_0)\end{aligned}$$

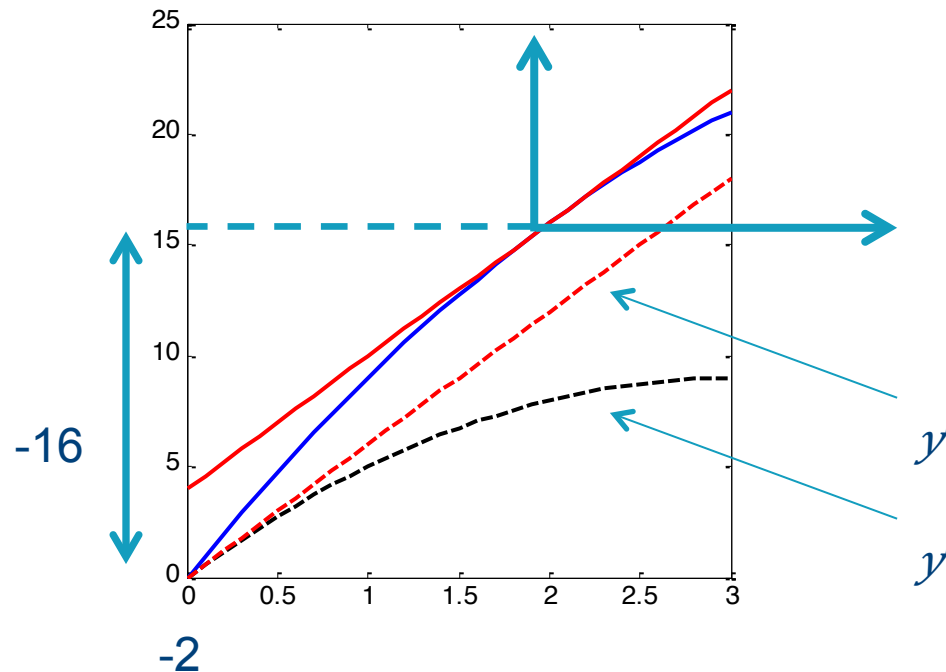
- Verplaats assenstelsel naar  $X_e = 2$ , voorwaarden:
  - behoud van afgeleide in nieuwe nulpunt:  $\frac{d(y'(x=0))}{dt} = \frac{d(y(x=2))}{dt} = 6$
  - offset: linearisatiepunt wordt nieuw nulpunt

# Dynamisch assenkruis (3)

$$y'(x) = ax^2 + bx \text{ met } 2a \cdot 0 + b = 6 \text{ en}$$
$$a(-2)^2 + -2b = -16 \rightarrow y'(x) = -x^2 + 6x$$

- lineariseren rond  $X'_e = 0$ :

$$\widehat{y}'(x) = 0 + (6)(x - 0) = \text{offset} + Hx$$

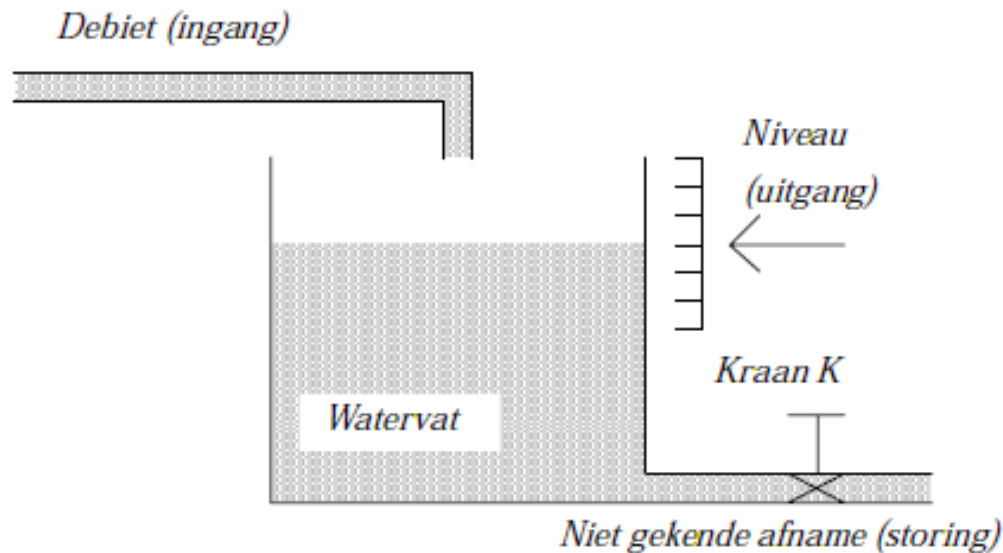


# Les 1: Inleiding en modelvorming

- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?
  - Lineaire tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

# Voorbeeld: watertoren (1)

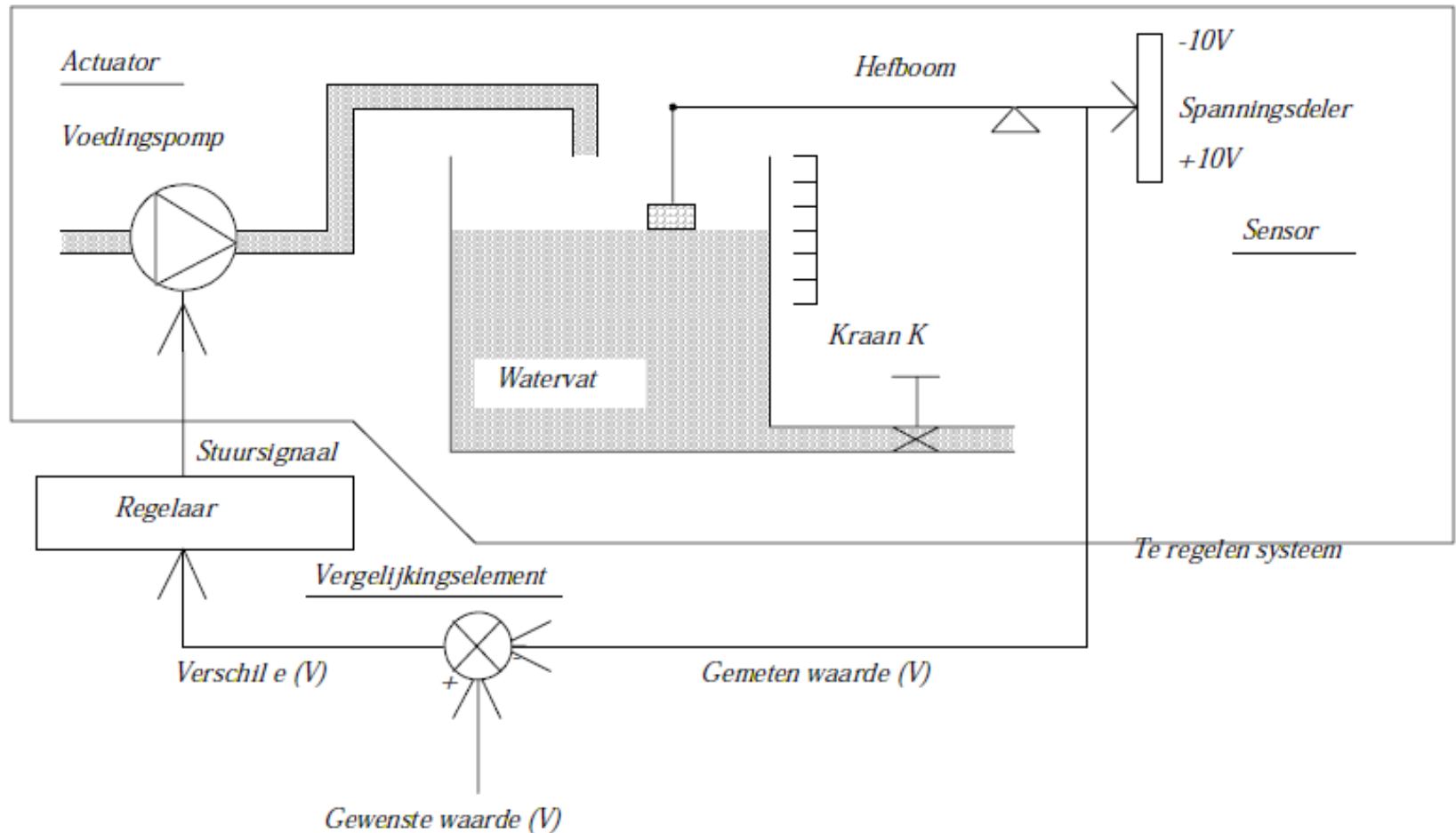
- Ingang: debiet ( $\Phi$ ) water regelbaar met actuator
- Uitgang: waterniveau ( $h$ )
- Meting/Sensor: Spanning ( $V$ ) i.f.v. waterniveau ( $h$ )



*Figuur 1.7 : Het te regelen systeem.*

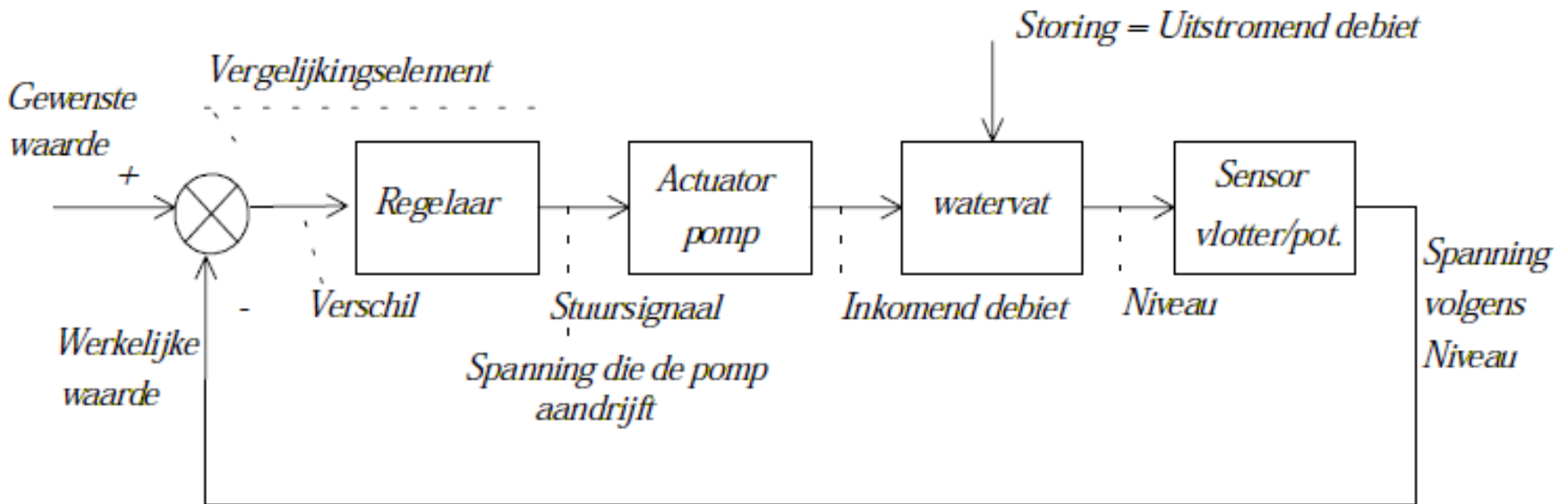
# Voorbeeld: watertoren (2)

- Regelsysteem



# Voorbeeld: watertoren (3)

- Blokkendiagram: transfertfunctie van elk blok?
  - TF actuator: relatie tussen spanning ( $V$ ) en debiet ( $\Phi$ )
  - TF watervat: relatie tussen debiet ( $\Phi$ ) en hoogte ( $h$ )
  - TF sensor: relatie tussen hoogte ( $h$ ) en spanning ( $V$ )





# Voorbeeld: watertoren (4)

- TF watervat: relatie tussen debiet ( $\Phi$ ) en hoogte ( $h$ )
  - Debietverschil is gerelateerd met de hoogte:  $\Phi_{in} - \Phi_{uit} = A_{vat} \frac{dh}{dt}$
  - Uitgaande debiet  $\Phi_{uit}$  is functie van statische druk  $P_{stat}$ 
    - $P_{stat} = \rho gh$  en  $\Phi_{uit} = A_{uit} v_{uit}$
    - $P_{stat} = P_{dyn}$  (dynamische druk onderaan) =  $\frac{\rho v_{uit}^2}{2}$
    - $\Phi_{uit} = A_{uit} \sqrt{2gh} = C_1 \sqrt{h}$
  - $\Phi_{in} = A_{vat} \frac{dh}{dt} + C_1 \sqrt{h}$
  - Lineair? Nee, dus lineariseren rond gewenste hoogte bv.  $h = 5\text{m}$ 
    - $\Phi_{in} = A_{vat} \frac{dh}{dt} + C_1 \sqrt{5} + \frac{d(C_1 \sqrt{5})}{dt} (h - 5) = A_{vat} \frac{dh}{dt} + C_2 h + \text{offset}$   
(debiet bij hoogte  $h$ )

# Voorbeeld: watertoren (5)

- TF watervat: relatie tussen debiet ( $\Phi$ ) en hoogte ( $h$ )
  - Transformeren naar dynamisch assenkruis:

$$\Phi_{igem} + \Phi_{indyn} = C_2(H_{gem} + h_{dyn}(t)) + A_{vat} \frac{d(H_{gem} + h_{dyn}(t))}{dt} + \text{offset}$$

- In evenwicht geldt debieten gelijk + hoogte constant:

$$\Phi_{igem} = \Phi_{ugem} = C_2 H_{gem} + \text{offset}$$

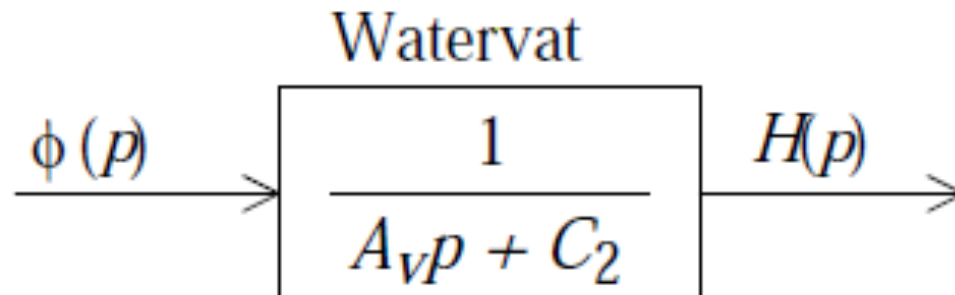
- De dynamische formule wordt:

$$\Phi_{indyn} = C_2(h_{dyn}(t)) + A_{vat} \frac{d(h_{dyn}(t))}{dt}$$

- **Beginwaarden zijn nu nul!**

# Voorbeeld: watertoren (6)

- TF watervat: relatie tussen debiet ( $\Phi$ ) en hoogte ( $h$ )
  - Laplace transformatie geeft :
$$\Phi_i(p) = C_2(H_{dyn}(p)) + A_{vat}pH_{dyn}(p)$$
  - $TF = \frac{H(p)}{\Phi_i(p)} = \frac{1}{A_{vat}p + C_2}$



# Voorbeeld: watertoren (7)

- TF sensor: relatie tussen hoogte ( $h$ ) en spanning ( $V$ )
  - Sensor is een lineair systeem dat uitgang direct weergeeft:  $C_3$
- TF actuator: relatie tussen spanning ( $V$ ) en debiet ( $\Phi$ )
  - Motor heeft een vertraging: 1e orde systeem met  $C_4$  en  $C_5$

