KU LEUVEN



Regeltechniek

Les 1: Inleiding en modelvorming

Prof. dr. ir. Toon van Waterschoot

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
ESAT – Departement Elektrotechniek
KU Leuven, Belgium

Onderzoeksafdeling

STADIUS
Center for Dynamical Systems, Signal Processing and Data Analytics

- **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

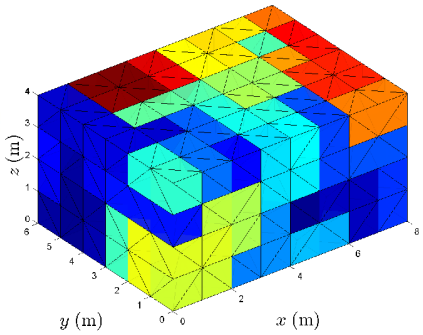


- **AdvISe** – Advanced Integrated Sensing Lab:
  - Biomedisch: biomedische technologie, ambient assisted living
  - Audio: akoestische modellering, audio-analyse, akoestische signaalverbetering
  - Chip-ontwerp: stralingsharde elektronica

Advanced Integrated Sensing
AdvISe

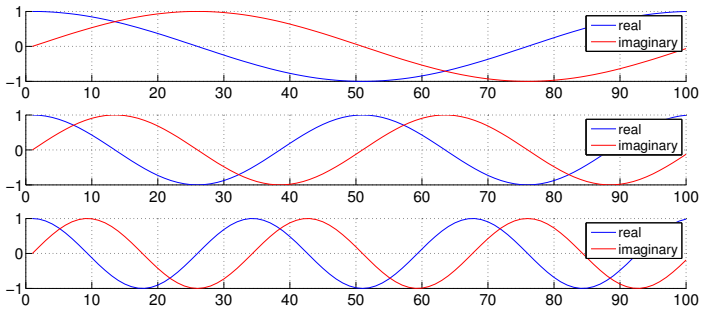
Onderzoekstopics



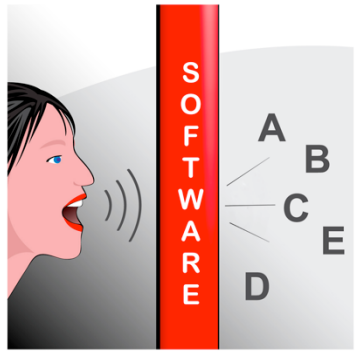


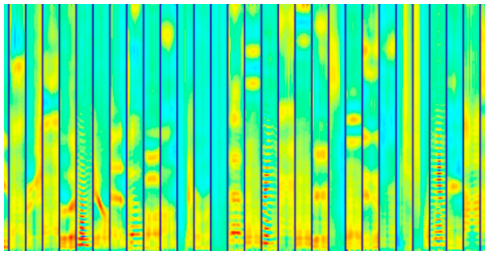
Acoustic modeling
- ear modeling
- room modeling
- loudspeaker modeling
- signal modeling

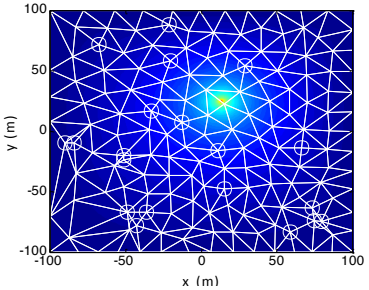




Audio signal analysis
- speech recognition
- event detection
- source localization
- audio classification









Acoustic signal enhancement
- noise reduction
- echo/feedback control
- room equalization





KU LEUVEN

Contactgegevens

Toon van Waterschoot

- Mail: toon.vanwaterschoot@esat.kuleuven.be

- Kantoor (enkel op Campus Leuven):
  Departement Elektrotechniek (ESAT-STADIUS)
  Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Leuven
  telefoon: +32 16 321788

KU LEUVEN

Regeltechniek: Vakinhoud

- **Deel 1:** Systeemtheorie
  - Les 1: Inleiding en modelvorming
  - Les 2: Signaaltransformaties
  - Les 3: Systemen van eerste orde
  - Les 4: Systemen van tweede & hogere orde en met dode tijd
- **Deel 2:** Analoge regeltechniek
  - Les 5: De regelkring
  - Les 6: Het wortellijnendiagram
  - Les 7: De klassieke regelaars
  - Les 8: Voorbeelden en toepassingen
  - Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling
  - Les 10: Speciale regelstructuren
  - Les 11: Niet-lineaire regeltechniek & aan-uit regelaars

Regeltechniek: Tijdschema Hoorcolleges

- **Hoorcolleges: maandag 8:25 – 10:25**
  - 29/09: Les 1
  - 06/10: Les 2
  - 13/10: Les 3
  - 20/10: Les 4
  - 27/10: Les 5
  - 03/11: Les 6
  - 10/11: geen les
  - 17/11: Les 7
  - 24/11: Les 8
  - 01/12: Les 9
  - 08/12: Les 10
  - 15/12: Les 11

Regeltechniek: Lesmateriaal

- **Cursustekst** (beschikbaar op Toledo)
  - Deel 1: Systeemtheorie
    - [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: 1 – 6
  - Deel 2: Analoge regeltechniek
    - [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-linaire Regeltechniek - Aan/Uit-regelaars*, KHLim, uitg. 2005. Hfst.: 1
- **Slides** (beschikbaar op Toledo)
- **Oefeningenbundel** (beschikbaar op Toledo)

Regeltechniek: Structuur

Meet- en regel-techniek (Z08634)

Automatisering-biomed (Z25004)

Automatisering-1 (Z25009)

Regeltechniek (Z51283 – Z60009 – Z60018)

Meettechniek (Z51283)

Meet- en regeltechniek pract. (Z51284)

3BACH IW
Uitdovend programma

Regeltechniek pract. (Z60010)

Stuurtechnieken pract. (Z60010)

3BACH IW richting Elektromechanica
- optie biomedische technologie

Regeltechniek pract. (Z60019)

3BACH IW richting Elektromechanica
- optie productie, ontwerp en automatisering
- optie energie

KU LEUVEN

Regeltechniek: Labo

- Regeltechniek practicum
  - **Doel:**
    - Inleiding PLC (Programmeerbare Logische Controller)
    - Oefeningen Regeltechniek
  - **Docent:** Walter Mertens (walter.mertens@kuleuven.be)
  - **Uurrooster:** 13 x 2u
- Stuurtechnieken practicum
  - **Doel:** leren werken met PLC als computersysteem voor industriële besturingstaken en meet- en regeltoepassingen
  - **Docent:** Hugo Belmans (hugo.belmans@kuleuven.be)
  - **Uurrooster:** 13 x 2u in semester 2

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

Regeltechniek: Vakinhoud

- **Deel 1:** Systeemtheorie
  - Les 1: Inleiding en modelvorming
  - Les 2: Signaaltransformaties
  - Les 3: Systemen van eerste orde
  - Les 4: Systemen van tweede & hogere orde en met dode tijd
- **Deel 2:** Analoge regeltechniek
  - Les 5: De regelkring
  - Les 6: Het wortellijnendiagram
  - Les 7: De klassieke regelaars
  - Les 8: Voorbeelden en toepassingen
  - Les 9: Systeemidentificatie en regelaarsinstelling
  - Les 10: Speciale regelstructuren
  - Les 11: Niet-lineaire regeltechniek & aan-uit regelaars

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?
  - Lineare 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?

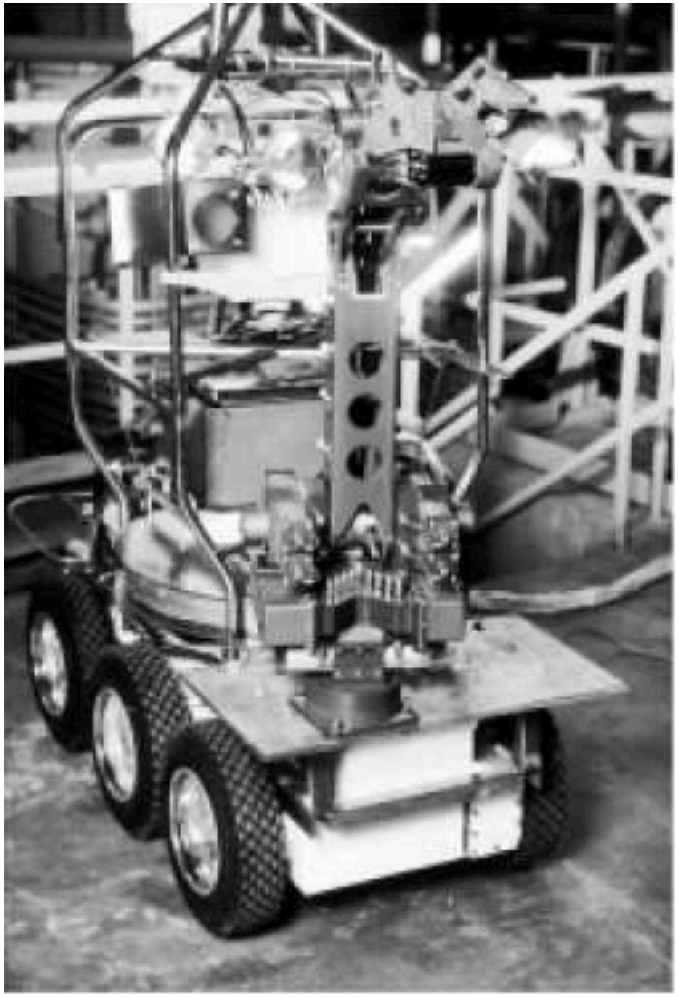
- vermogenversterking
  (bv. vermogensturing van radarantenne)
- besturing vanop afstand
  (bv. telerobotische operaties, ontmijningrobot)
- gemak van het ingangssignaal
  (bv. converteer positie van thermostaat naar kamertemp.)
- compenseren van verstoringen
  (bv. cruise control en bv. bergop en/of 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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Voorbeelden van regelsystemen (1)

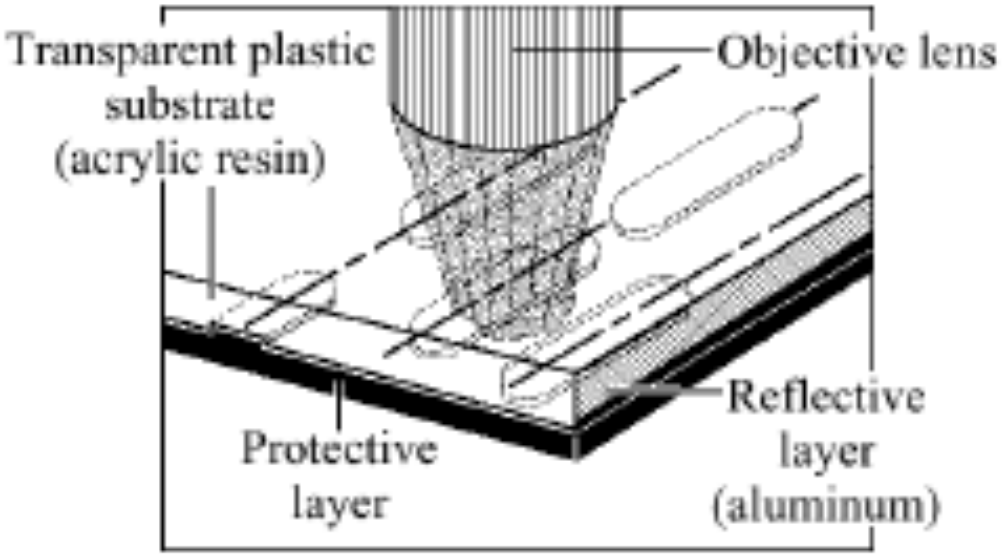
- Rover is gebouwd om te werken in gecontamineerde gebieden op Three Mile Island in Middleton, PA, waar een nucleair ongeval gebeurde in 1979.
- De op afstand geregelde arm van de robot zie je vooraan op het voertuig.



Voorbeelden van regelsystemen (2)

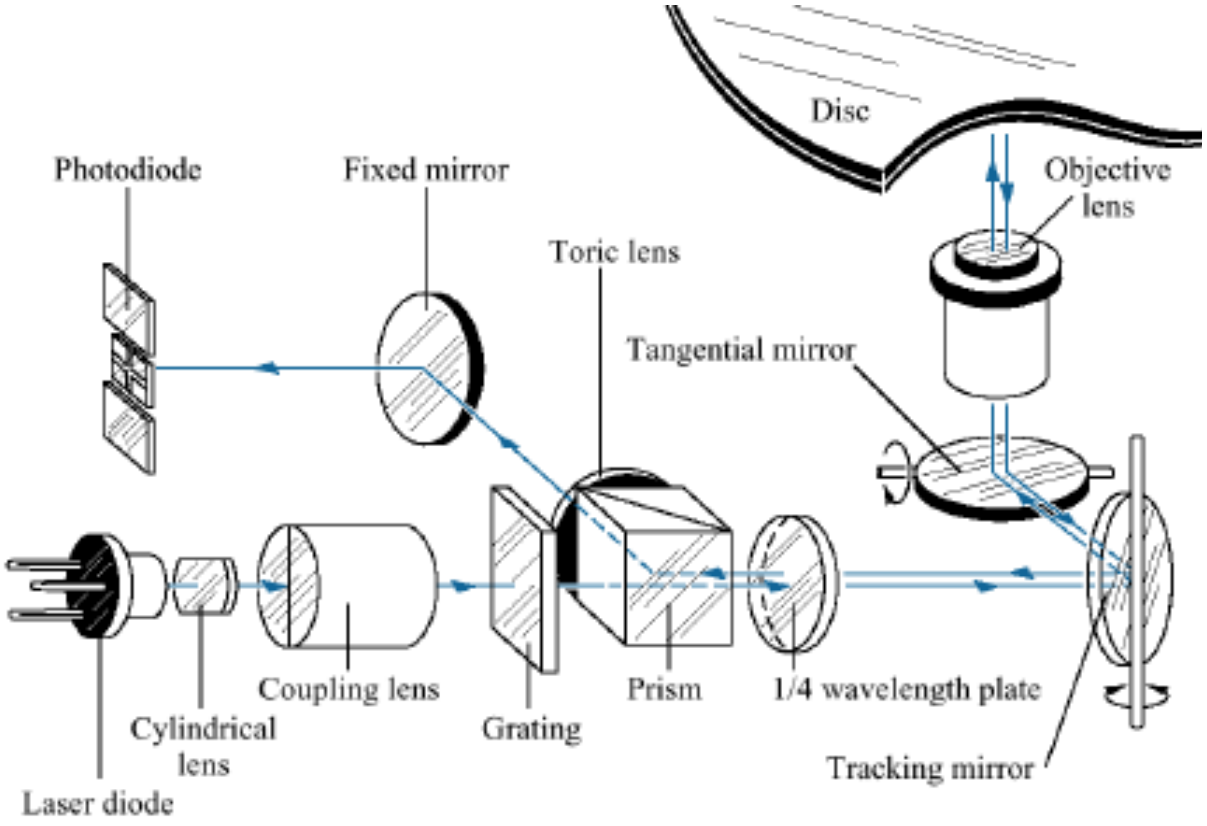
- Video laser disk speler
- Objectief leest gaten op een laser disk





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)

- Harde schijf met lees-/schrijfkoppen

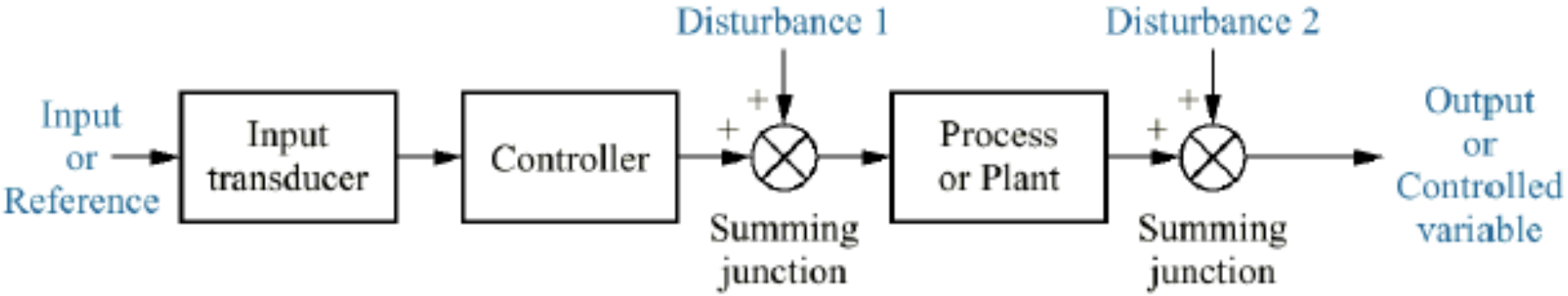


Les 1: Inleiding en modelvorming

- **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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Sturen vs. regelen (1)

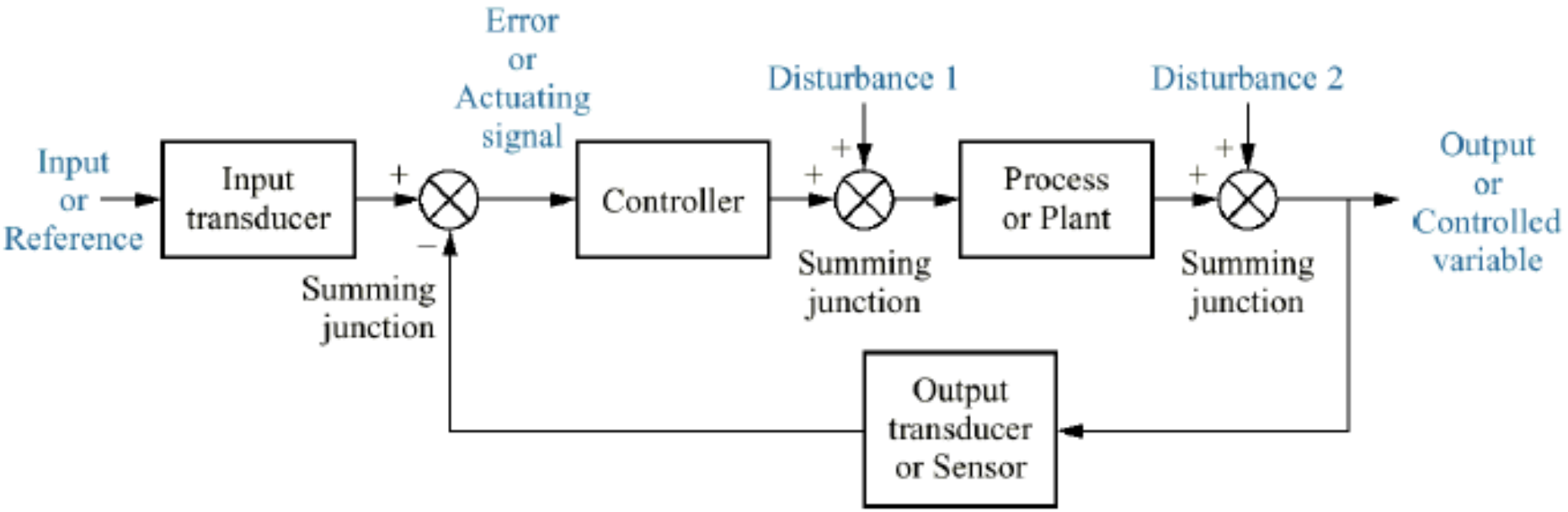
- Openlussysteem = sturing



KU LEUVEN

Sturen vs. regelen (2)

- Geslotenlussysteem = regeling

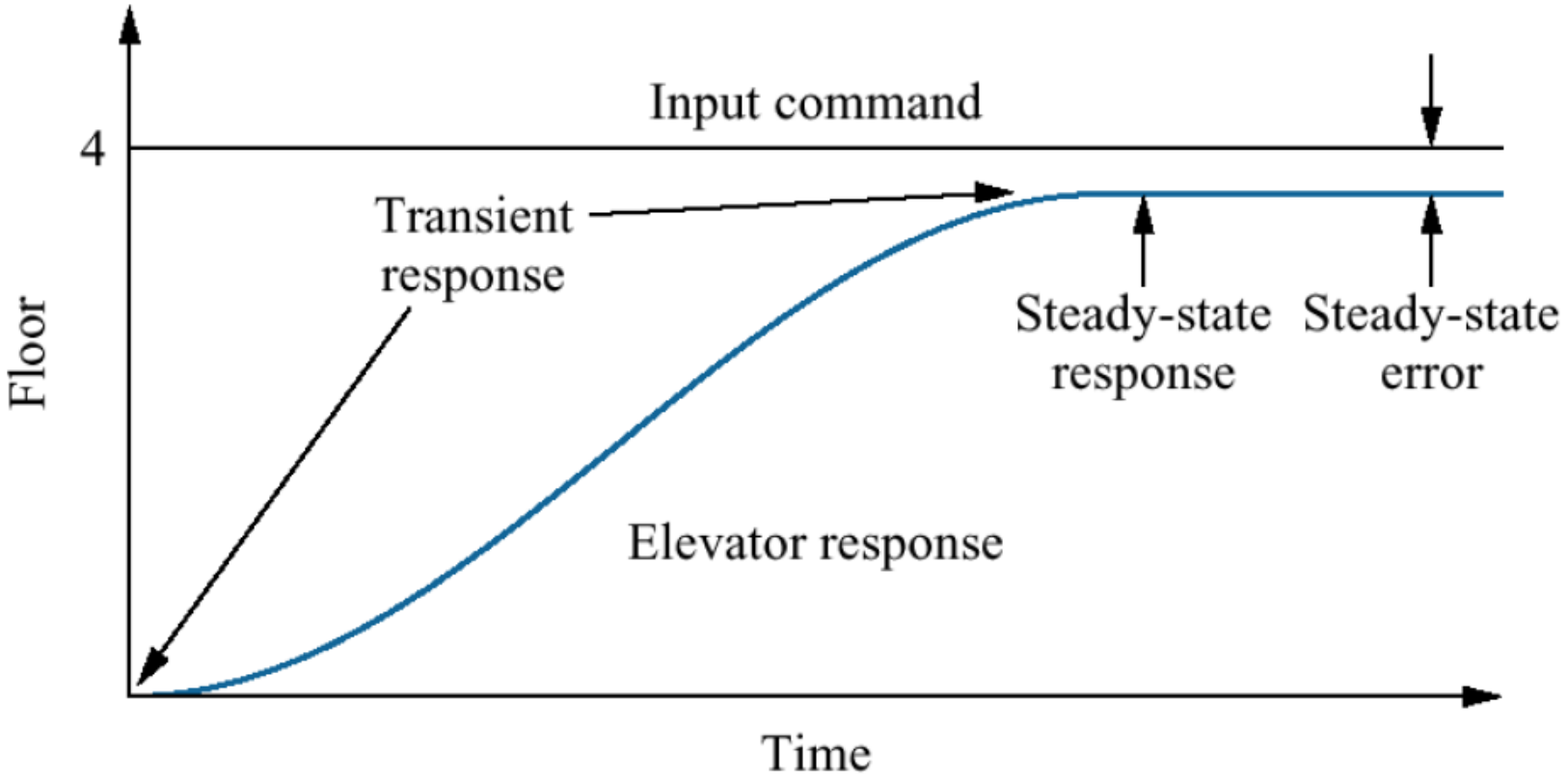


Les 1: Inleiding en modelvorming

- **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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Transiente vs. steady-state responsie (1)

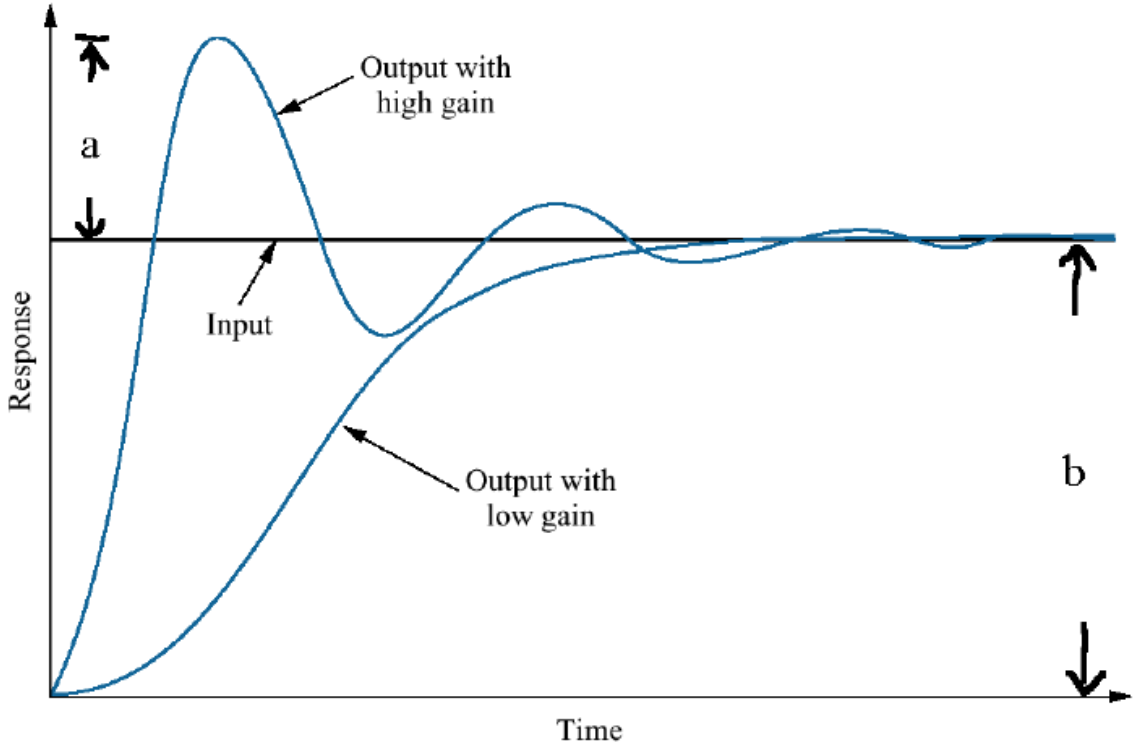
- Voorbeeld: regeling van lift



Transiente vs. steady-state responsie (2)

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

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



KU LEUVEN

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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Regelobjectieven

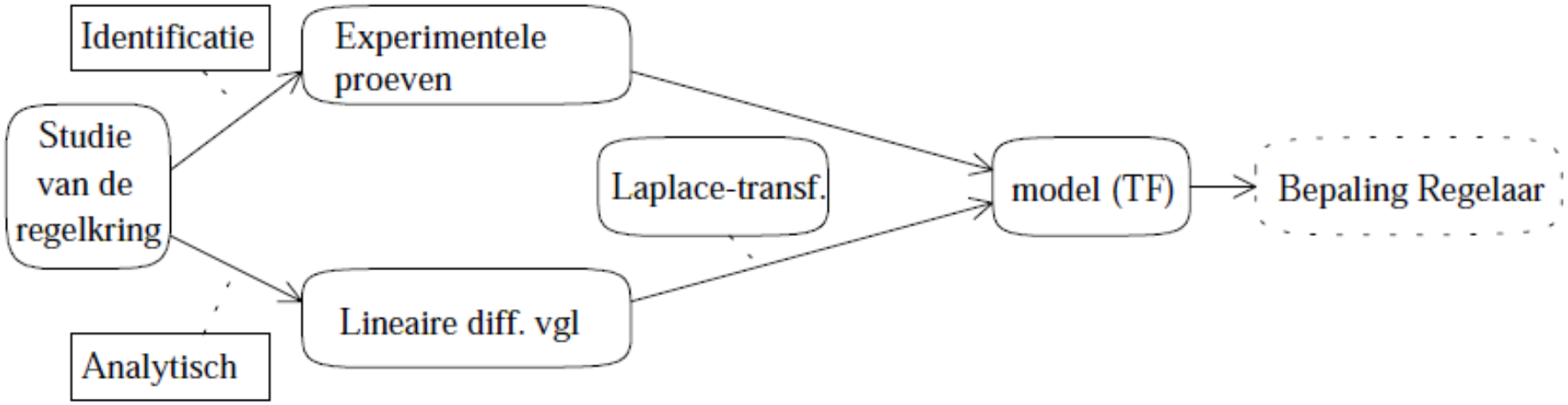
- Stabilisatie van systeem
- Genereren van gewenste transient responsie
- Vermindering/eliminatie van standfout
- Robuustheid tegen storing en variaties in procesparameters
- Behalen van optimale performantie

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?
  - Lineare 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

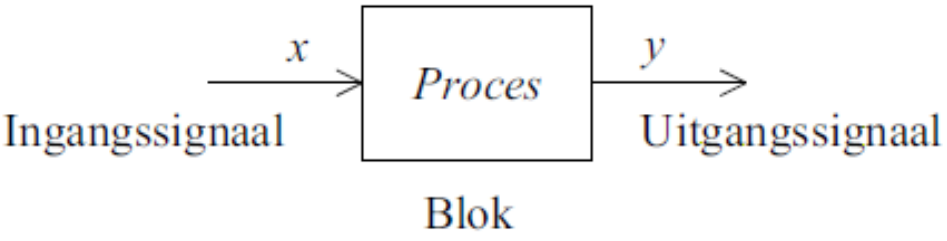
- **Inleiding** [Nise, Hoofdstuk 1]
  - Wat is een regelsysteem?
  - Voorbeelden van regelsystemen
  - Sturen vs. regelen
  - Transiente vs. steady-state responsie
  - Regelobjectieven
  - Hoe stellen we de regelkring in?
- **Modelvorming** [Baeten, REG1, Hoofdstuk 1]
  - Modelvorming: waarom en hoe?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

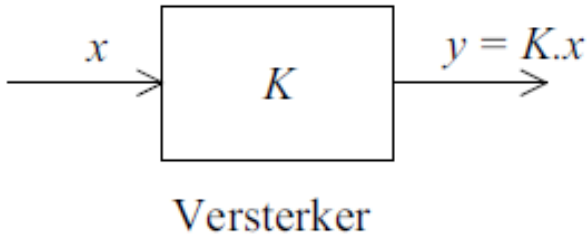
Modelvorming: waarom en hoe? (1)

- 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





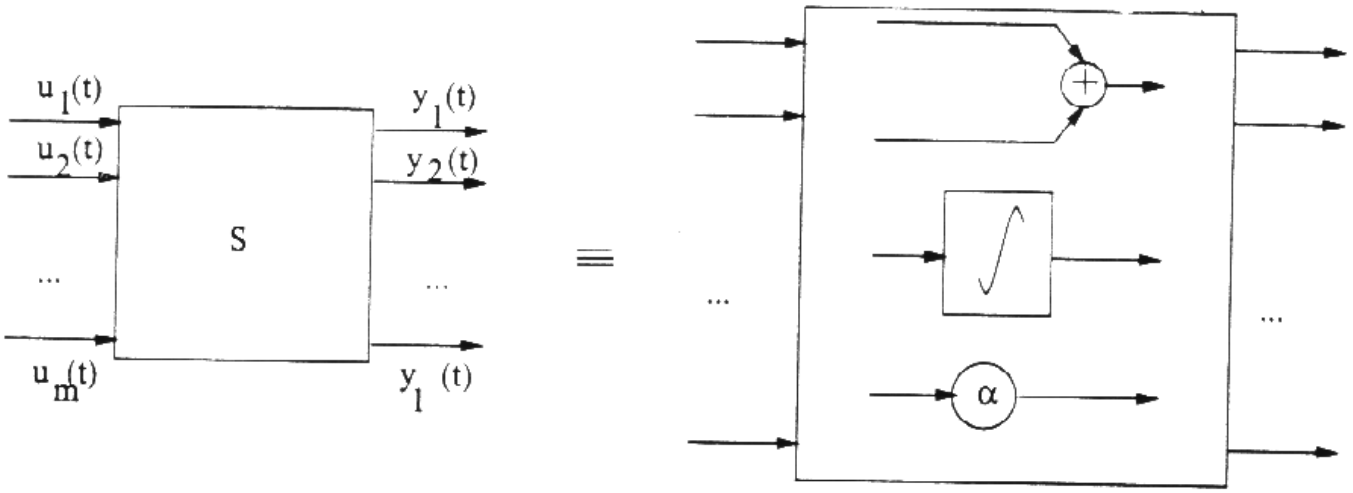
Les 1: Inleiding en modelvorming

- **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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Lineaire tijdsinvariante systemen (1)

- Drie soorten basisblokken:
  - Integrator: $y(t) = \int_0^t u(t)dt + \mathrm{y}(\mathrm{t}_0)$

    (op t_0 treedt het systeem in werking)
  - Sommatiepunt: $y(t) = u_1(t) + u_2(t)$
  - Schaalelement: $y(t) = \alpha u(t)$



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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Transfertfunctie

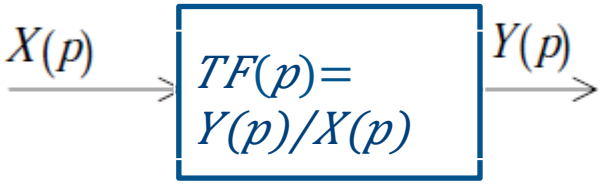
Basisblokken omzetten naar Laplace domein

- $TF(p) = \frac{uitgang(p)}{ingang(p)}$
- *p*-variabele
- $x(0) = 0$ veronderstelt dynamisch assenkruis
- Laplace-transf. van differentiator

  $= pX(p) + \boldsymbol{x(0)}$

- Enkel geldig voor lineaire tijdsinvariante systemen

  ➡ niet-lineaire systemen lineariseren!



Blok

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

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

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

Transformatie regels

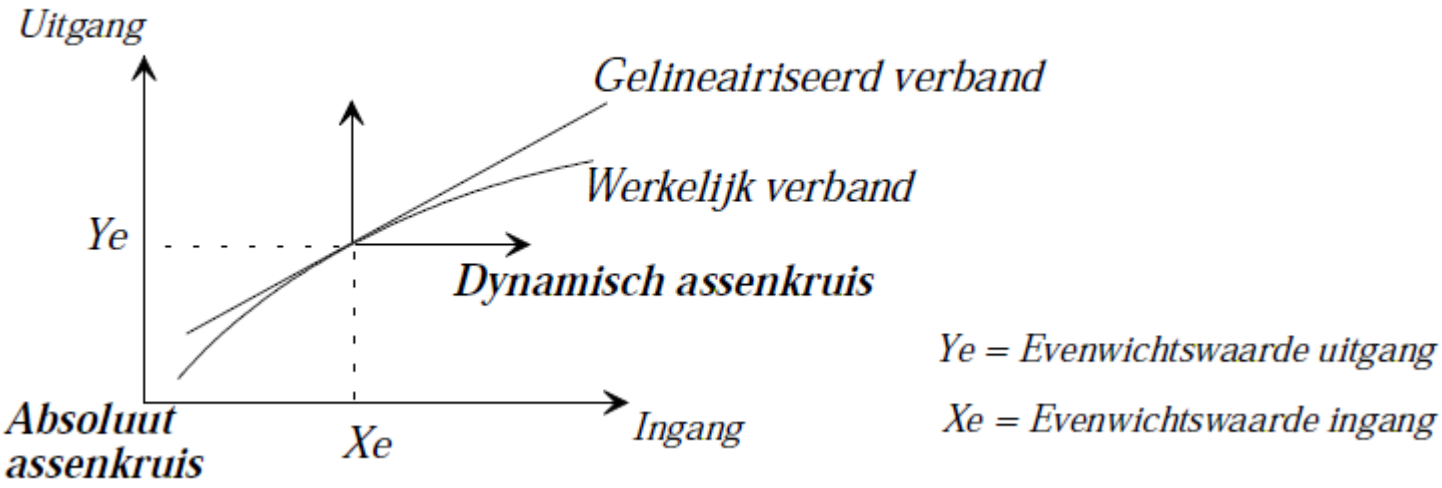
KU LEUVEN

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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Dynamisch assenkruis (1)

Algemeen



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):

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

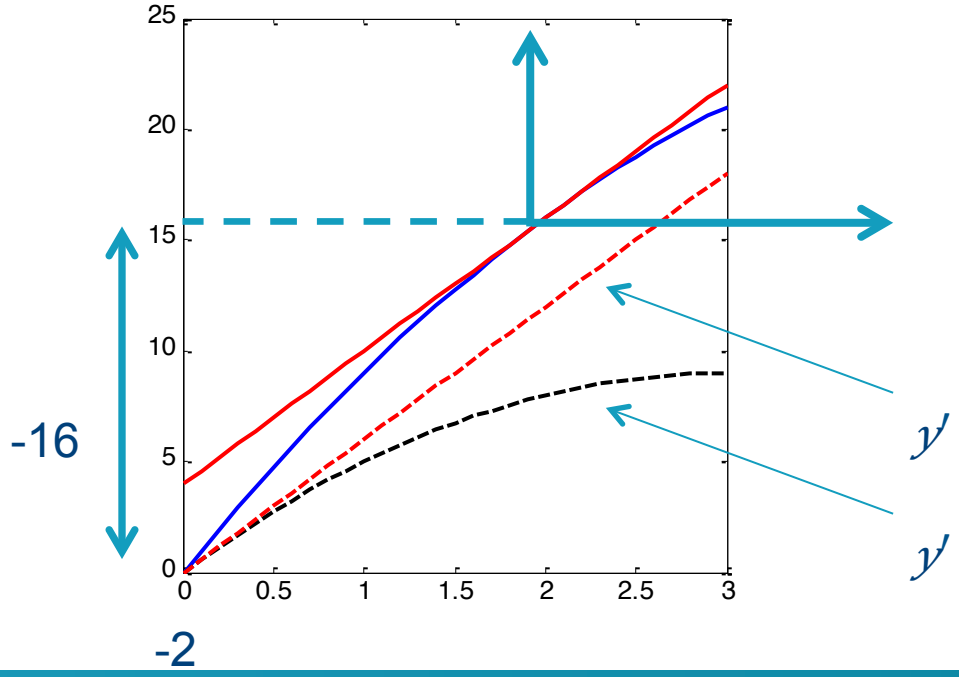
  - Verplaats assenstelsel naar $X_e = 2$, voorwaarden:
    - behoud van afgeleide in nieuwe nulpunt: $\frac{d(y'(x=0))}{dt} = \frac{d(y(x=2))}{dt} = 6$
    - offset: linearisatiepunt wordt nieuw nulpunt

Dynamisch assenkruis (3)

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

- lineariseren rond $X'_e = 0$:

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

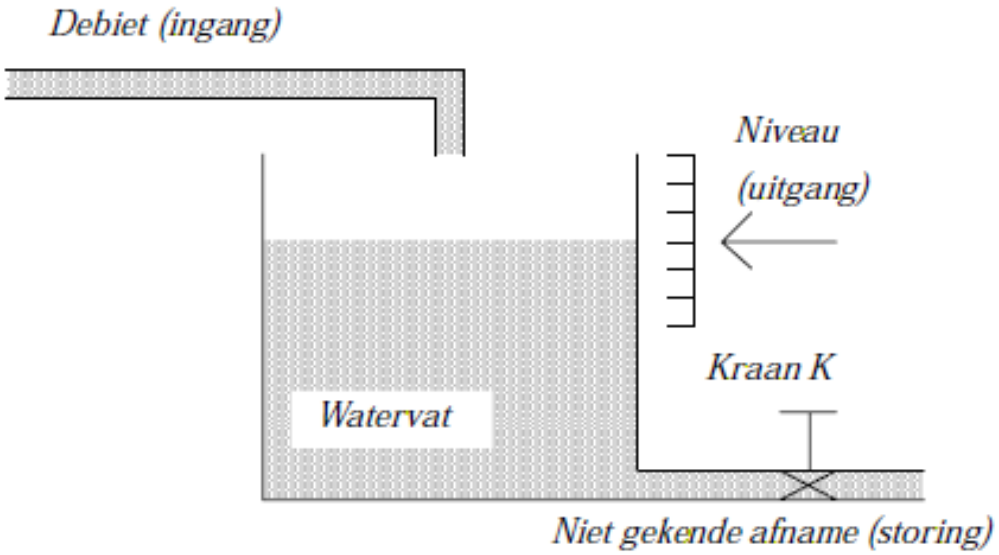


Les 1: Inleiding en modelvorming

- **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?
  - Lineare tijdsinvariante systemen
  - Transfertfunctie
  - Dynamisch assenkruis
  - Voorbeeld: watertoren

Voorbeeld: watertoren (1)

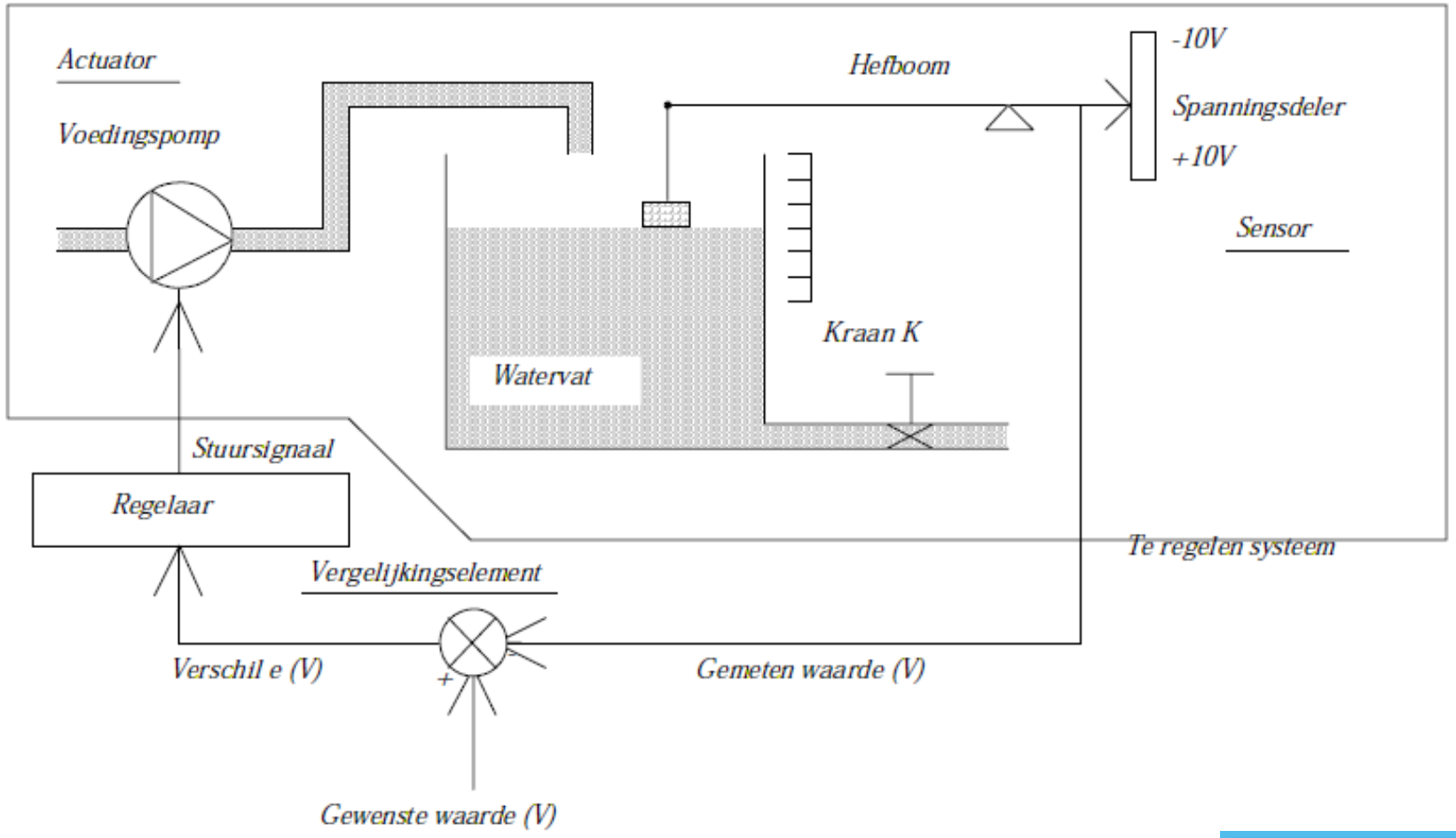
- Ingang: debiet (Φ) water regelbaar met actuator
- Uitgang: waterniveau (h)
- Meting/Sensor: Spanning (V) i.f.v. waterniveau (h)



Figuur 1.7 : Het te regelen systeem.

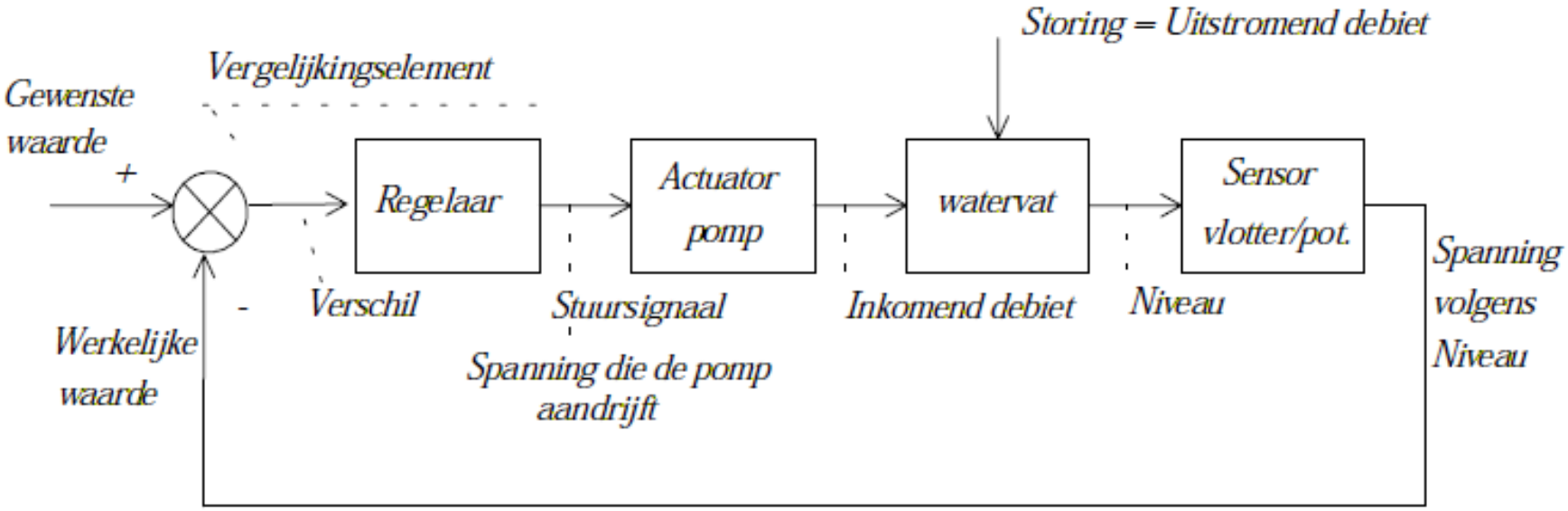
Voorbeeld: watertoren (2)

- Regelsysteem



Voorbeeld: watertoren (3)

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



Voorbeeld: watertoren (4)

- TF watervat: relatie tussen debiet (Φ) en hoogte (h)
  - Debietverschil is gerelateerd met de hoogte: $\Phi_{in} - \Phi_{uit} = A_{vat}\frac{dh}{dt}$
  - Uitgaande debiet Φ_{uit} is functie van statische druk P_{stat}
    - $P_{stat} = \rho g h$ 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 = 5m
    - $\Phi_{in} = A_{vat}\frac{dh}{dt} + C_1\sqrt{5} + \frac{d(C_1\sqrt{5})}{dt}(h-5) = A_{vat}\frac{dh}{dt} + C_2 h + \text{offset}$ (debiet bij hoogte h)

KU LEUVEN

Voorbeeld: watertoren (5)

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

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

  - In evenwicht geldt debieten gelijk + hoogte constant:

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

  - De dynamische formule wordt:

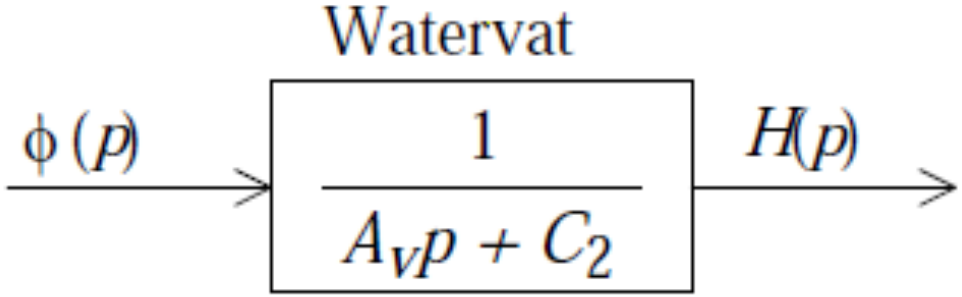
$$\Phi_{indyn} = C_2\left(h_{dyn(t)}\right) + A_{vat}\frac{d\left(h_{dyn}(t)\right)}{dt}$$

  - Beginwaarden zijn nu nul!

KU LEUVEN

Voorbeeld: watertoren (6)

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



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 (Φ)
  - Motor heeft een vertraging: 1e orde systeem met C_4 en C_5

