



Regeltechniek

Les 8: Voorbeelden en toepassingen

Prof. dr. ir. Toon van Waterschoot

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
ESAT – Departement Elektrotechniek
KU Leuven, Belgium

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 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

Inleiding

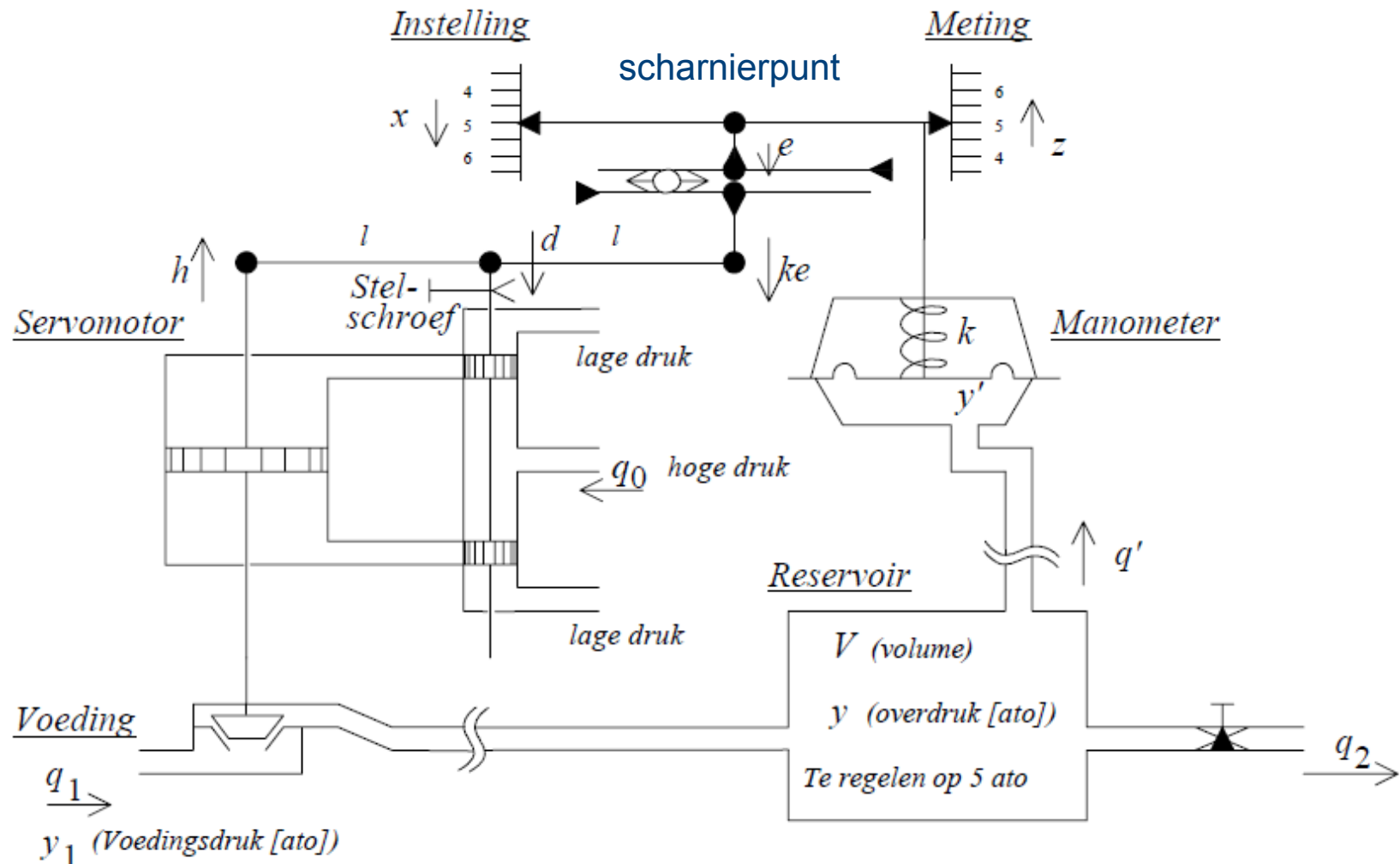
- **Doel:** toepassingen en voorbeelden van tot nu toe geziene leerstof
 - afleiden van transfertfuncties voor regelkringen
 - aanpassen systeemp parameters om gedrag regelkring te verbeteren
 - ontwerp regelaar a.h.v. vooropgestelde criteria
- **Oefeningenbundel bevat tal van andere voorbeelden!**

Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

Voorbeeld 1: Drukregeling met manometer en hydraulische servomotor

- **Doel:** regeling van de druk in een drukvat ($y = 5$ ato)

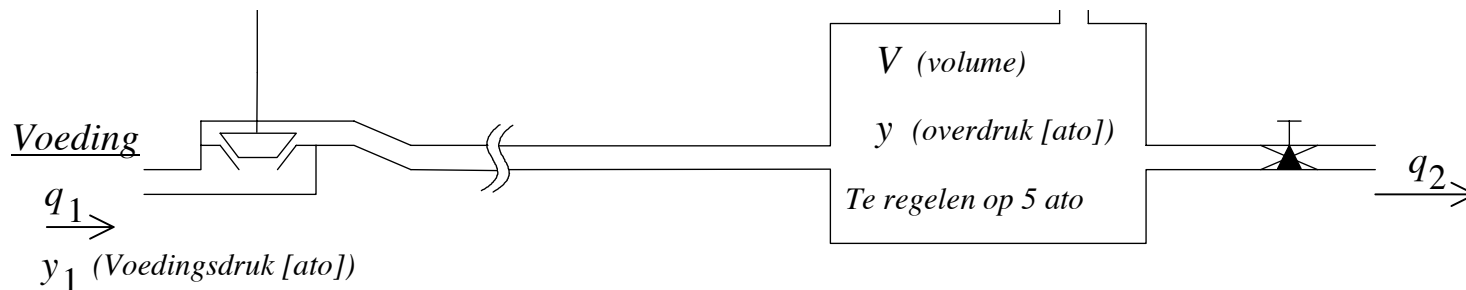
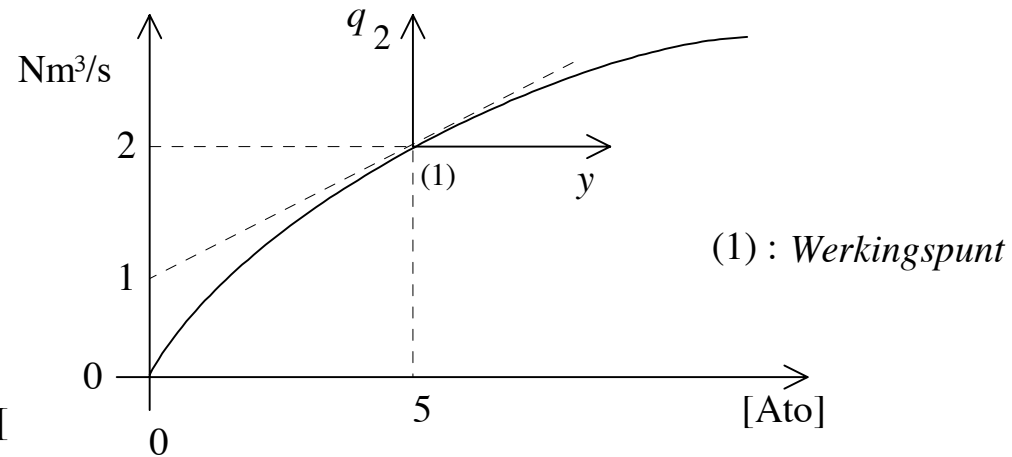
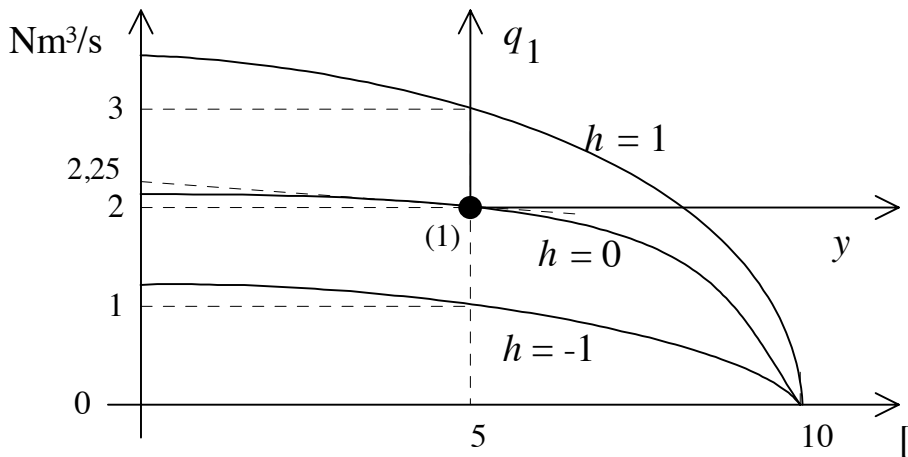


Opgave: Numerieke gegevens

- oppervlakte van de servomotor hoofdzuiger S_z
- oppervlakte van de manometer S_m
- volume manometer V_m
- manometerveerconstante
- voedingsdruk y_1
- volume reservoir
- gemiddeld verbruik $q_{2,gem}$
- oliedebiet $q_0 = d$ [m^3/s] met d in [m]

Opgave: Experimentele gegevens

- Experimenteel opgenomen verbanden openlussysteem + werkingpunten



Modelvorming

- **Meetapparaat**

- dynamische analyse: enkel veranderingen t.o.v. werkingspunt

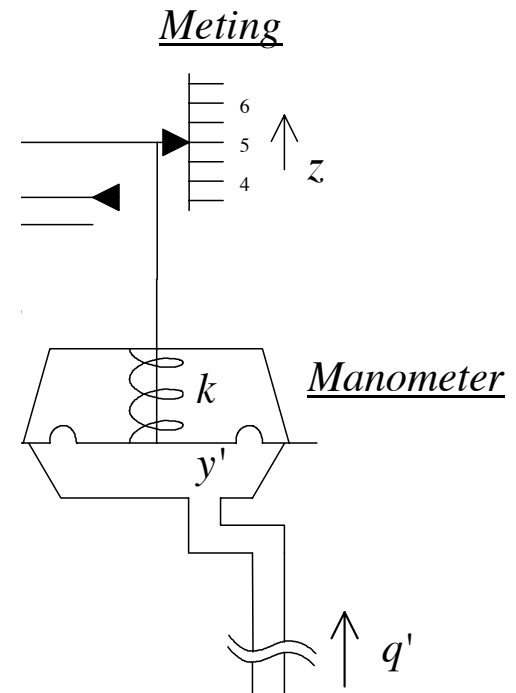
- gezocht: $TF : \frac{z}{y}$

1. Krachtevenwicht:

- wet van Hooke: $\Delta F = k\Delta z$

- druk: $\Delta F = \Delta y' S_M$

$$\Rightarrow \frac{z(p)}{y'(p)} = \frac{S_M}{k} = 0,01m/ato$$



Modelvorming

- **Meetapparaat**

- dynamische analyse: enkel veranderingen t.o.v. werkingpunt

- gezocht: $TF : \frac{z}{y}$

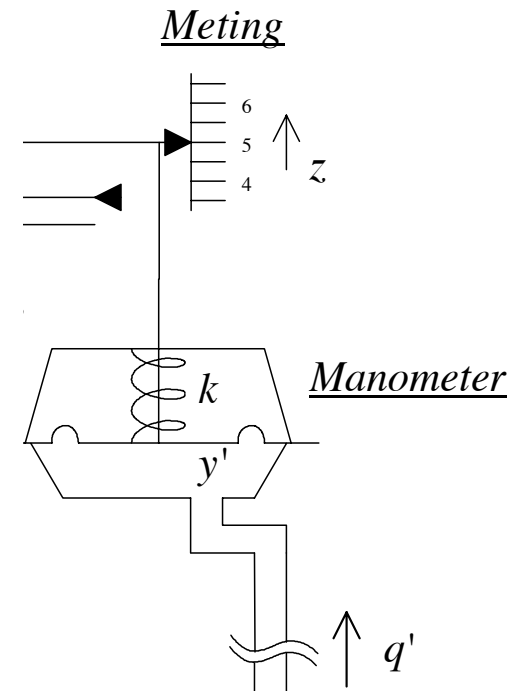
2. Continuïteitsvergelijking:

- inkomend debiet zorgt voor toename druk of volume:

$$q'(p) = \frac{d}{dt}(V_M y') = V_M \frac{dy'}{dt} + y' \frac{dV_M}{dt}$$

- linearisatie rond regimewaarde:

$$q'(p) = V_M p y'(p) + y'_{regime} S_M p z(p)$$



Modelvorming

- **Meetapparaat**

- dynamische analyse: enkel veranderingen t.o.v. werkingspunt

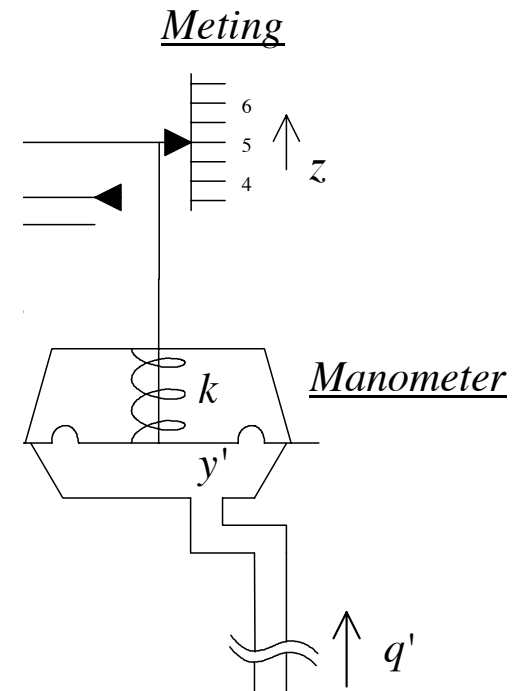
- gezocht: $TF : \frac{z}{y}$

3. Stromingsvergelijking:

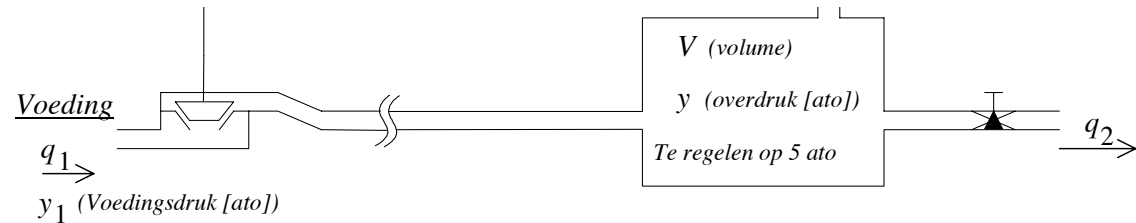
- lange transmissieleiding:
debiet \sim drukverschil

$$q' = k_4(y - y'), \quad k_4 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}^3 / \text{ato.s}$$

- TF meetapparaat: $\frac{z(p)}{y(p)} = \frac{0,01}{5p + 1} \frac{m}{\text{ato}}$



Modelvorming



- **Het reservoir met de regelklep**

- experimenteel opgenomen verbanden:

$$q_1 = f(h, y) \quad q_2 = f(y)$$

- linearisatie (zie cursustekst voor waarden k_1, k_2, k_3):

$$q_1 = k_2 h - k_1 y \quad q_2 = k_3 y$$

- continuïteitsvergelijking: debietverschil \sim drukverschil

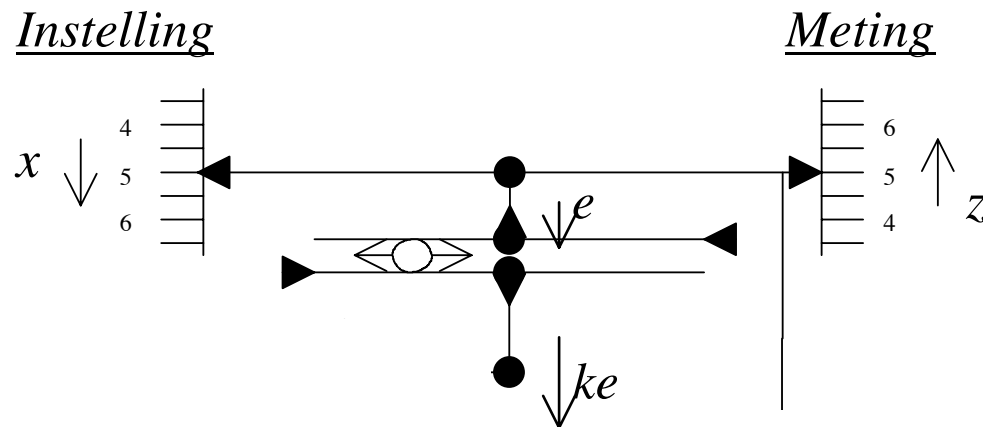
$$V \frac{dy}{dt} = q_1 - q_2$$

- TF reservoir met regelklep: $\frac{y}{h} = \frac{400}{20p + 1} \frac{ato}{m}$

Modelvorming

- **Vergelijkingsorgaan en mechanische versterking**
 - mechanisch verschil: meetwaarde – ingestelde waarde
 - mechanische versterking: hefboommechanisme

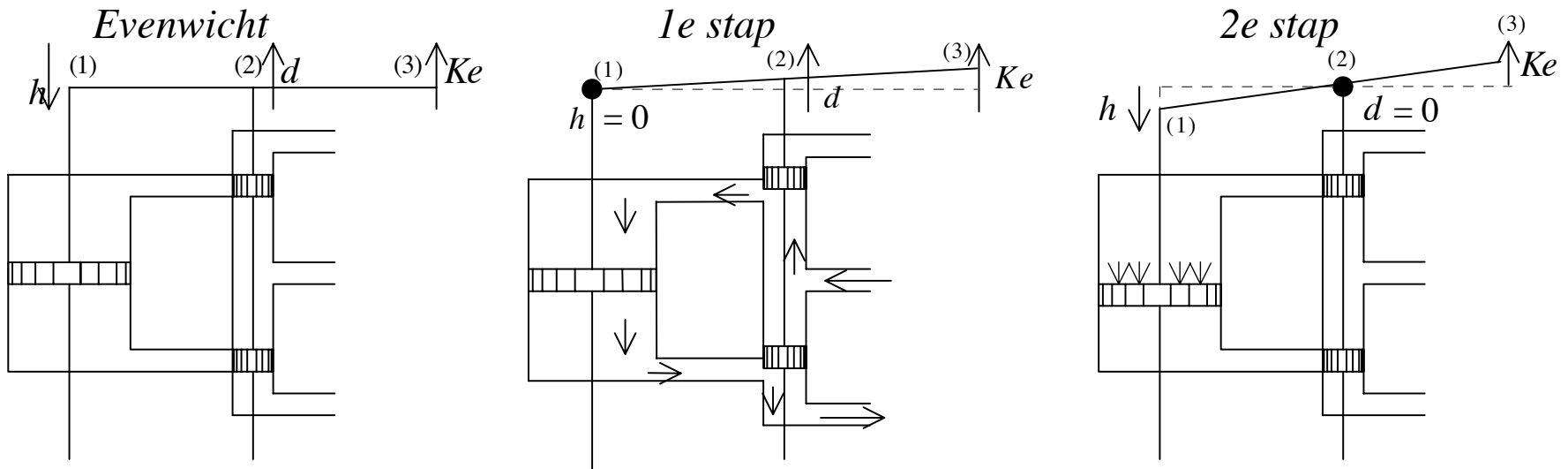
$$Ke = K(x - z)/2$$



Modelvorming

- **Servomotor**

- stelschroef: $e = 0, h = 0 \Rightarrow d = 0$
- SERVO = inwendige terugkoppeling + zeer grote versterking
- zuiger kan enkel bewegen als olie in-/uitvloeit
 - >> scharnierpunt verplaatst



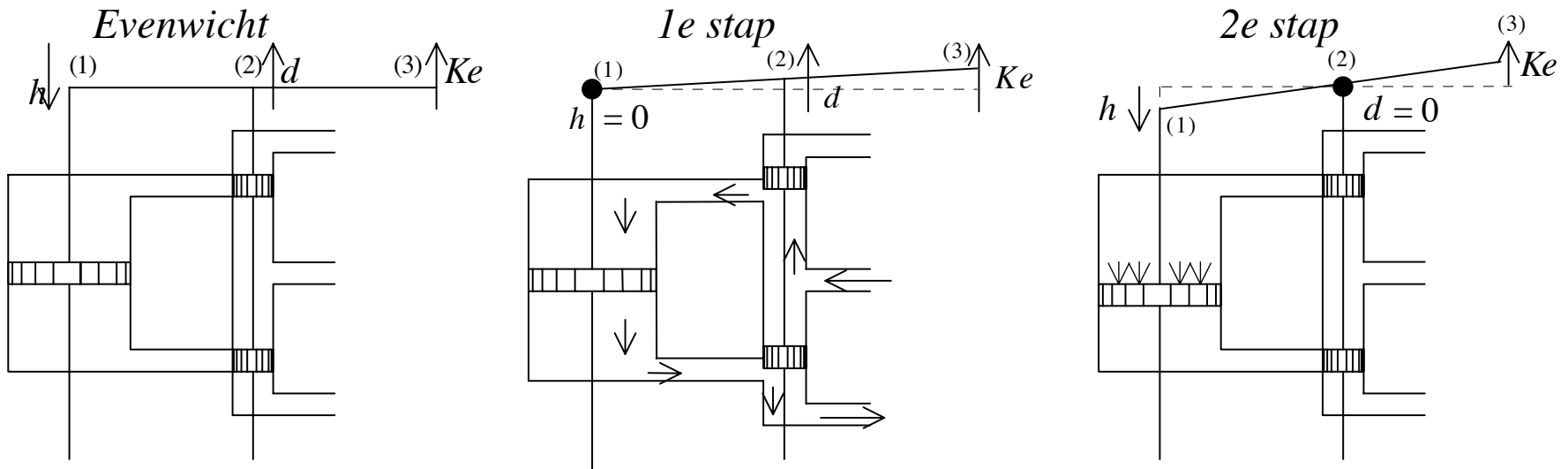
Modelvorming

- **Servomotor**

- statische vergelijking: $h = Ke$

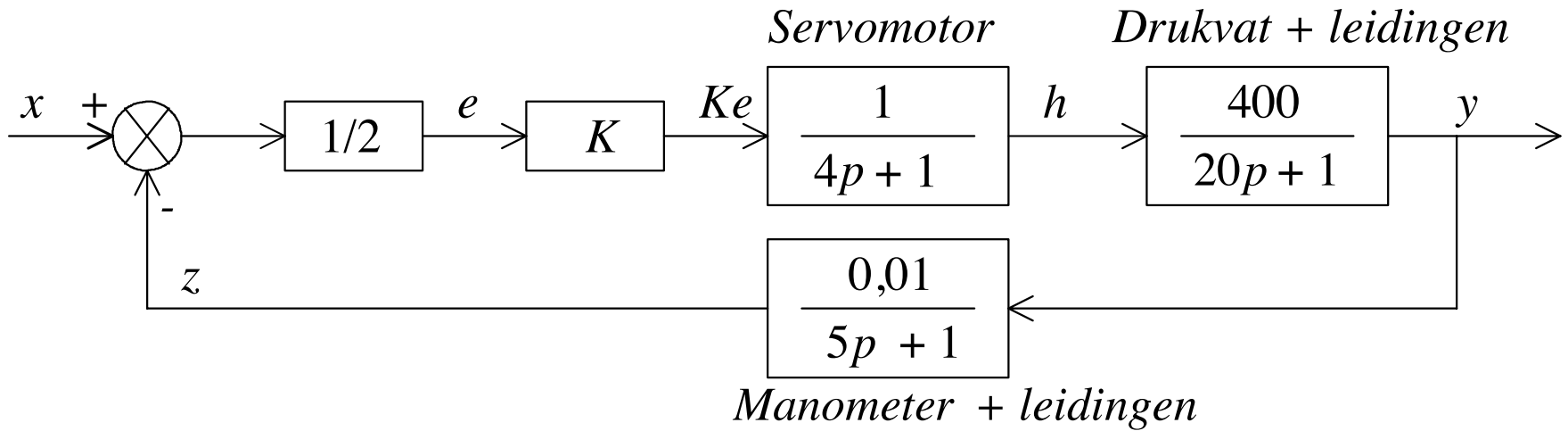
- dynamische vergelijking:
$$\begin{cases} q_0 & = 5 \cdot 10^3 d \\ d & = (Ke - h)/2 \\ q_0 & = Szph \end{cases}$$

- TF:
$$\frac{h}{Ke} = \frac{1}{4p + 1}$$



Modelvorming

- De totale regelkring



- openlussysteem $KGH = 3e$ orde systeem met tijdsconstanten

$$\tau_1 = 20\text{sec}, \tau_2 = 5\text{sec}, \tau_3 = 4\text{sec}$$

- statische versterking: $K' = 2K$

Opgave

- Bepaal de versterking K' zodanig dat de AM voor de regelkring uit vorige slide 9 dB bedraagt.
- Toon aan dat een verbetering van de regelkring mogelijk is door de grootste tijdconstante te verdubbelen van 20 naar 40 sec en de AM terug op dezelfde grootte af te stellen.
- Welke invloed heeft deze verandering op de eigenschappen van de regellus?

Oplossing

(1) $T = 20, K = 4,85$

AM = 9 dB bij 0,27 r/s

FM = 38,4° bij 0,15 r/s

(2) $T = 40, K = 4,85$

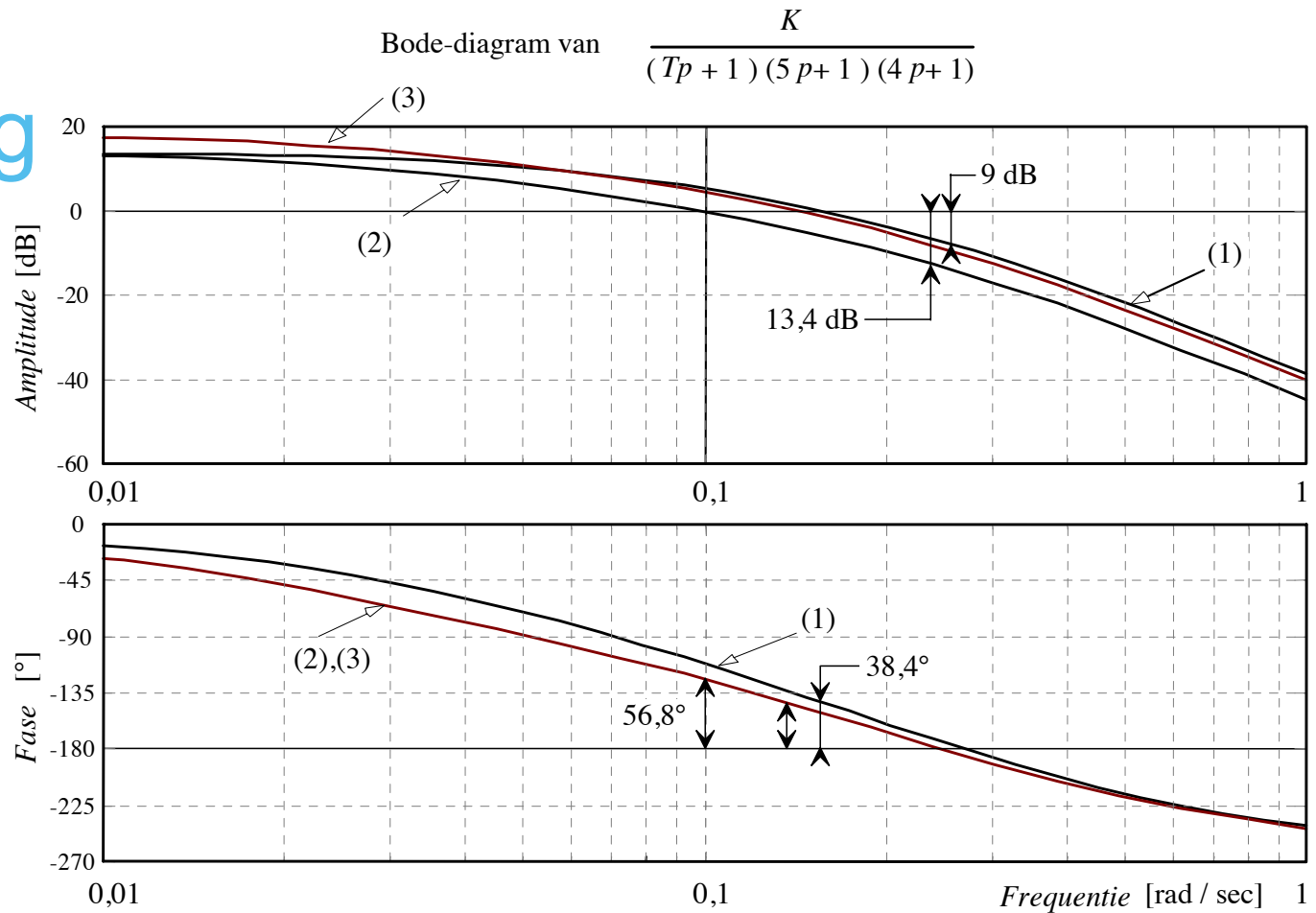
AM = 13,4 dB bij 0,25 r/s

FM = 56,8° bij 0,10 r/s

(3) $T = 40, K = 8,05$

AM = 9 dB bij 0,25 r/s

FM = 32,6° bij 0,14 r/s



- systeem (3): grotere versterking voor dezelfde AM
 >> kleinere standfout, betere ruisonderdrukking

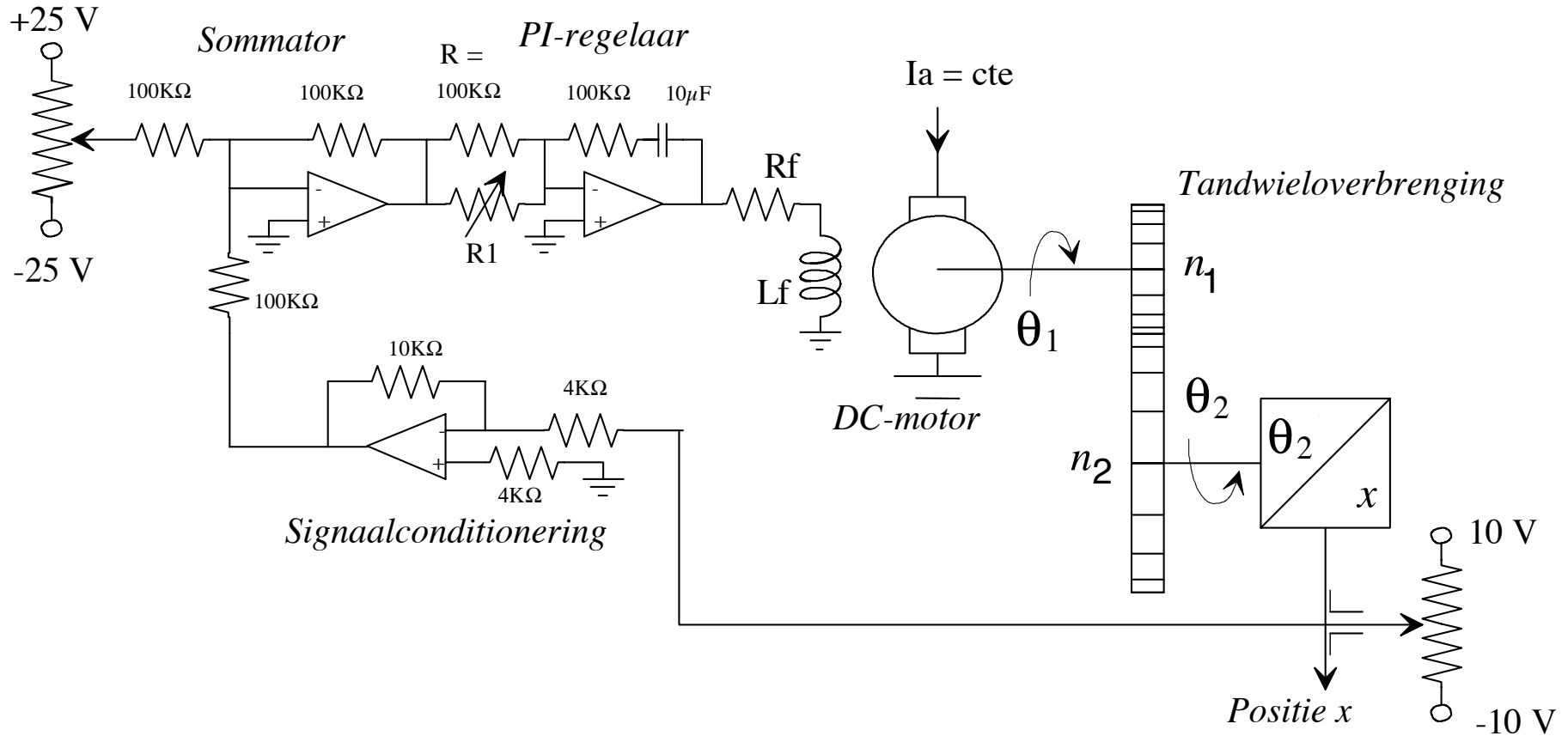
Opmerkingen

- Het verdubbelen van de grootste tijdconstante komt voor de gegeven regelkring fysisch overeen met een dubbel zo groot reservoir.
- Analooq aan de vorige opgave kan een regellus rond een aaneenschakeling van drie eerste orde systemen ook in snelheid verbeterd worden door de tweede tijdconstante te verkleinen en de versterking aan te passen.
- In alle gevallen zal het verkleinen van een eventuele dode tijd steeds voordelig zijn.

Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

Voorbeeld 2: Positionering via veldgestuurde DC-motor



Specificaties

- De positie is instelbaar over een gebied van 50 cm.
- $1 + R/R_1 = K$
- De veldweerstand van de motor 1Ω , de veldinductantie = 1H,
- Koppelcte x fluxcte x Ia = 10 Nm/A.
- Het traagheidsmoment van het anker = 0,3 Nms² en de wrijvingscoëfficiënt = 0,5 Nms.
- Tandwielkast heeft overbrengingsverhouding van $n_1/n_2 = 20$
- Op ingaande as bedraagt wrijvingscoëfficiënt van belasting 1,5 Nms. Het traagheidsmoment van belasting is 0,7 Nms², de torsieveercte = 2 Nm.
- Een hoekverdraaiing van de uitgaande as wordt omgezet in een lineaire verplaatsing als volgt: 1 omwenteling van de uitgaande as geeft een verplaatsing van 125,66 mm.

Gevraagd

1. Bepaal het blokschema en de openlustransfertfunctie.
2. Teken het wortellijnendiagram, bereken de versterking K zodanig dat de overshoot (bij de staprespons) kleiner blijft dan 16%.
3. Teken het Nichols-diagram ($K = 1$), bepaal de waarde van K opdat de fasemarge 40° zou zijn.
4. Schets het Bode-diagram van het geslotenlussysteem voor de K -waarde berekend onder vorig punt (gebruik hiervoor de gegeven versterkings- en faseverschuivingslijnen in het Nichols-diagram met M- en N-cirkels).

Modelvorming

1. Zuivere sommatie

2. TF regelaar:
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R + 1/PC}{\frac{RR_1}{R+R_1}} = \frac{1 + RCp}{RCp} \left(\frac{R + R_1}{R_1} \right) = K \left(1 + \frac{1}{RCp} \right)$$

= PI-regelaar met integratietijdsconstante $RC = 1$ sec

3. TF spanning over inductantie / uitgangsspanning regelaar:

$$\frac{V_f}{V_2} = \frac{pL_f}{R_f + pL_f} = \frac{p}{1 + p}$$

4. Stroom door veldinductantie:
$$\frac{I_f}{V_f} = \frac{1}{p}$$

5. Constante stroom door veldinduct. > flux > motormoment

$$M_a = k_m \phi I_a = k_m k_\phi I_a I_f \Rightarrow \frac{M_a}{I_f} = 10$$

Modelvorming

6.-7. Motormoment uit momentenvergelijking:

$$M_a = M_t \Rightarrow \frac{\theta_1}{M_t} = \frac{1}{p^2 + 2p + 2}$$

8. Overbrenging tandwielkast: $\frac{\theta_2}{\theta_1} = 1/20$

9. Kogelomloopmoer (rotatie > translatie): $\frac{x}{\theta_2} = 2 \frac{cm}{rad}$

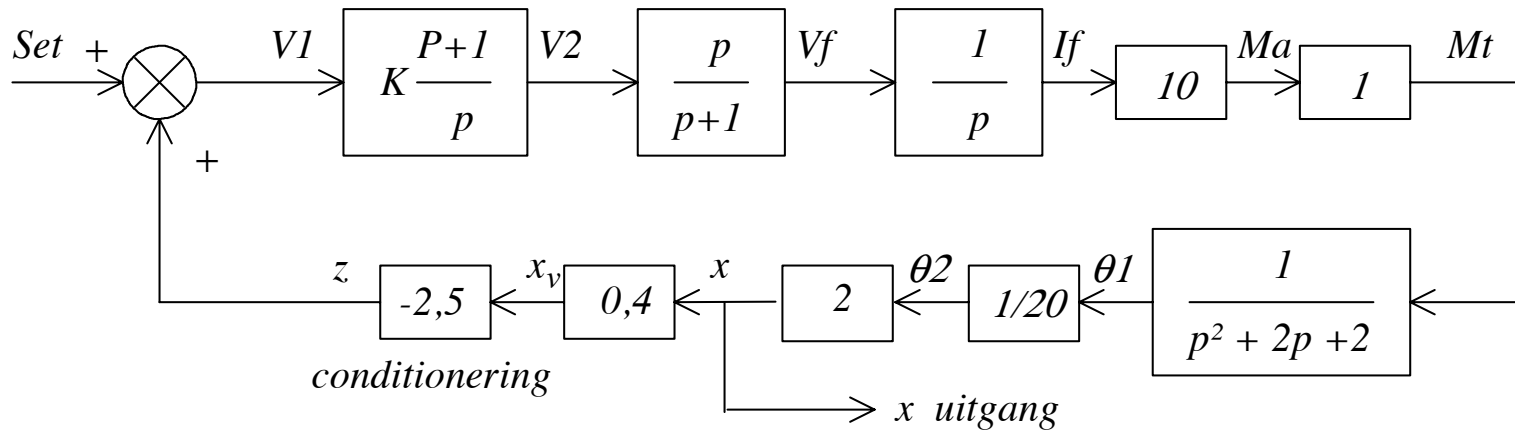
10. Potentiometer (sensor), 50 cm ~ 20 V: $\frac{x_v}{x} = 0.4 \frac{V}{cm}$

11. Signaalconditionering (spanningsdeler met opamp):

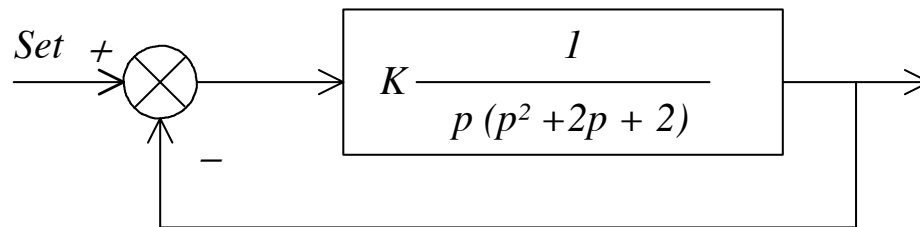
$$\frac{z}{x_v} = 2,5$$

Modelvorming

- De totale regelkring



- Vereenvoudigde regelkring



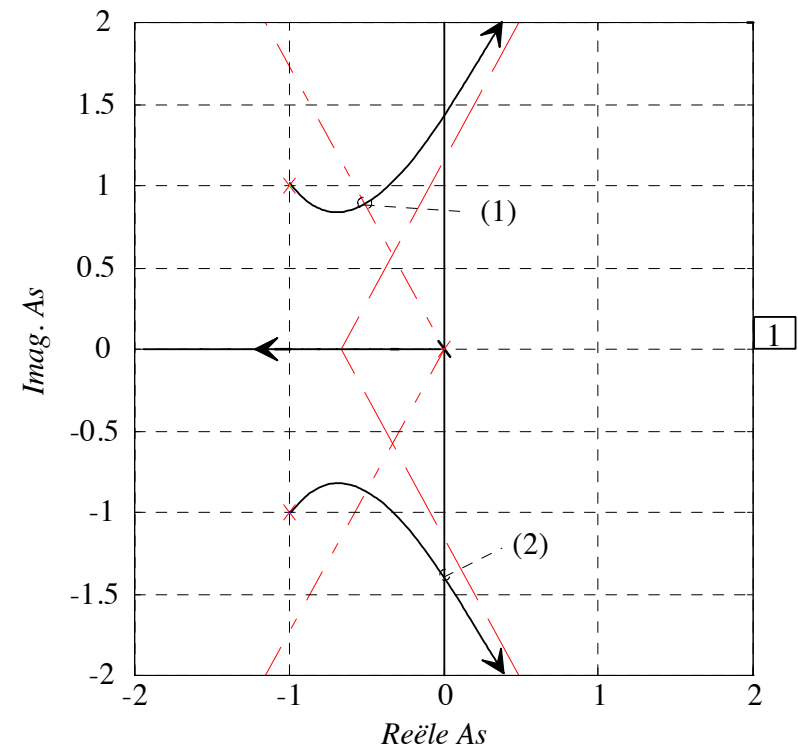
Wortellijnendiagram

- Wortellijnendiagram wordt getekend a.h.v. regels Les 3
- Overshoot i.f.v. dempingsfactor (2e orde systeem):

$$D = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\%$$

ofwel

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left(\ln \frac{D}{100\%}\right)^2}{\pi^2 + \left(\ln \frac{D}{100\%}\right)^2}}$$



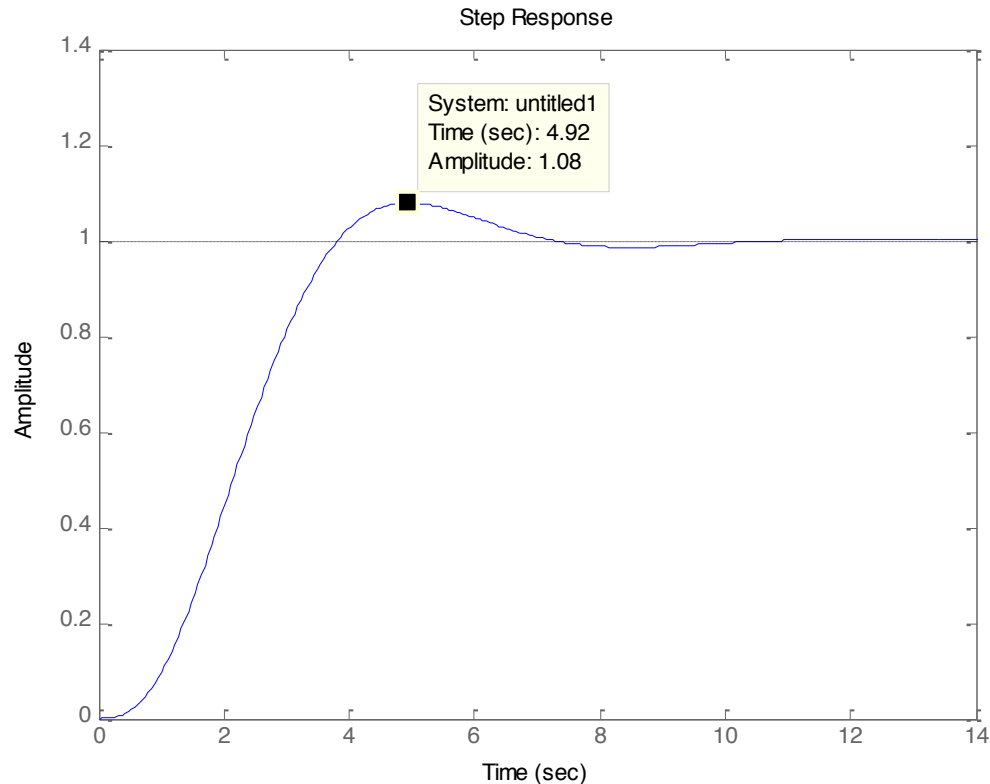
- $D = 16\%$ gives $\zeta = 0,504$ and $K = 0,992$

Staprespons

- Ter controle gesimuleerde staprespons met $K=0,992$

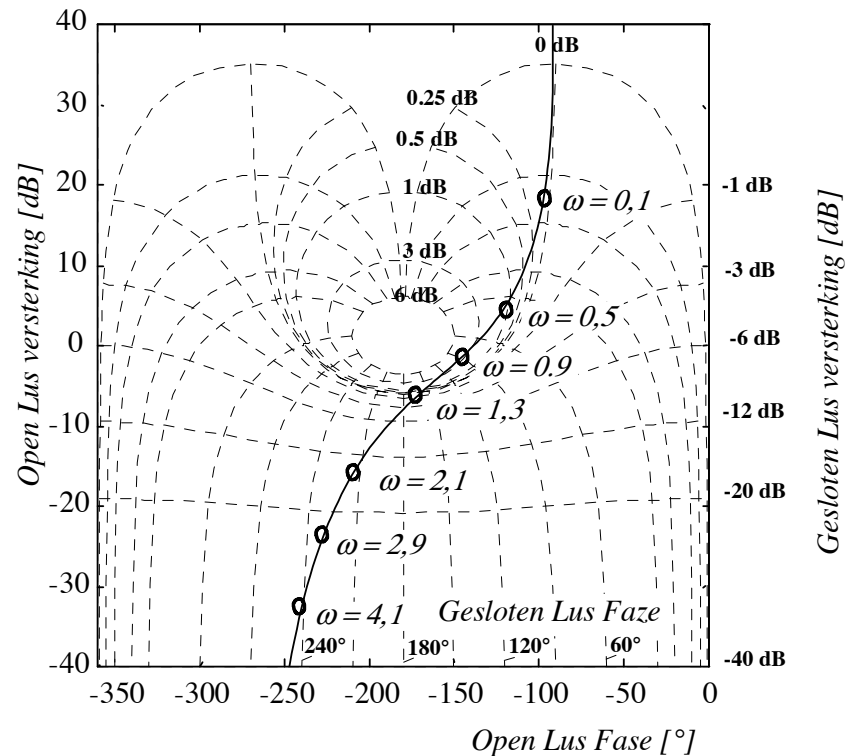
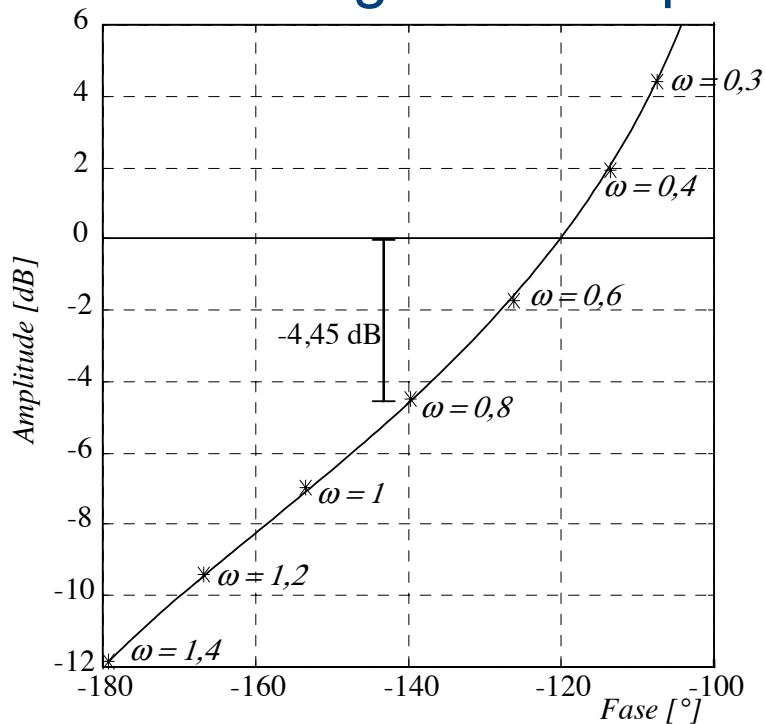
Matlab: `step(feedback(G*K, 1))`

- Doorschot is minder dan 16%, waarom?



Nicholsdiagram

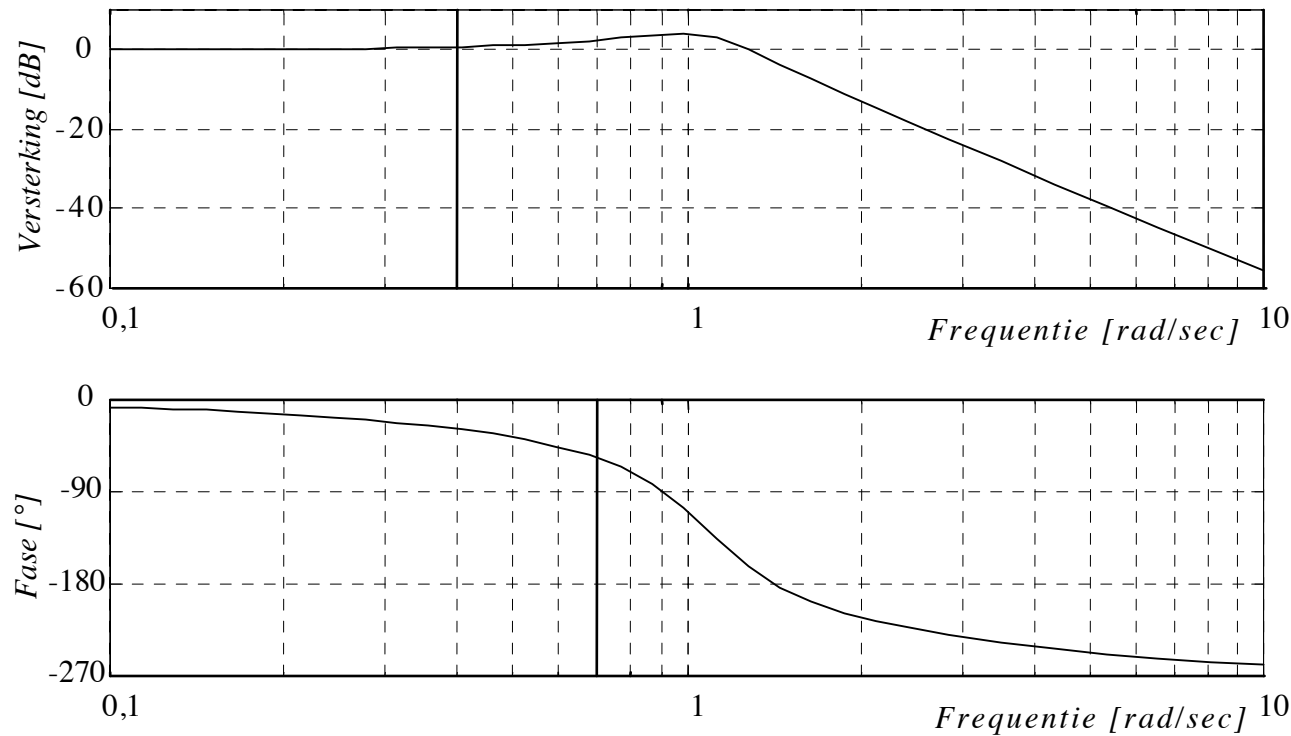
- Nichols diagram = amplitude vs. fase



- faseverschuiving = -140° bij $K = -4,45$ dB = $0,6$
- om FM = 40° te bekommen moet dus $K = 1/0,6 = 1,67$ ingesteld worden

Bodediagram

- M-cirkels = curves van constante geslotenlusversterking
- N-cirkels = curves van constante geslotenlusfase
- Bodediagram: snijpunten M-, N-cirkels met Nicholsdiagram



Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

Ontwerp van een PI-regelaar

- TF PI-regelaar (Les 4): $Kr \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right)$

- Bepaal Kr en τ_i voor een gegeven systeem zodat:

$$\angle TF_{PI}(j\omega_{0dB}) = -F_{PI}$$

- Oplossingsstrategie:
 - zoek ω^* die later ω_{0dB} moet worden; op deze frequentie heeft het systeem een fasenaijling van $-180^\circ + FM + |F_{PI}|$
 - bepaal τ_i zodanig dat de PI-regelaar een fasenaijling heeft gelijk aan F_{PI} op de pulsatie ω^*
 - bepaal Kr zodanig dat $\omega^* \rightarrow \omega_{0dB}$ voor het geheel van systeem + regelaar
 - verifieer de oplossing m.b.v. Bodediagram

Ontwerp van een PI-regelaar: voorbeeld

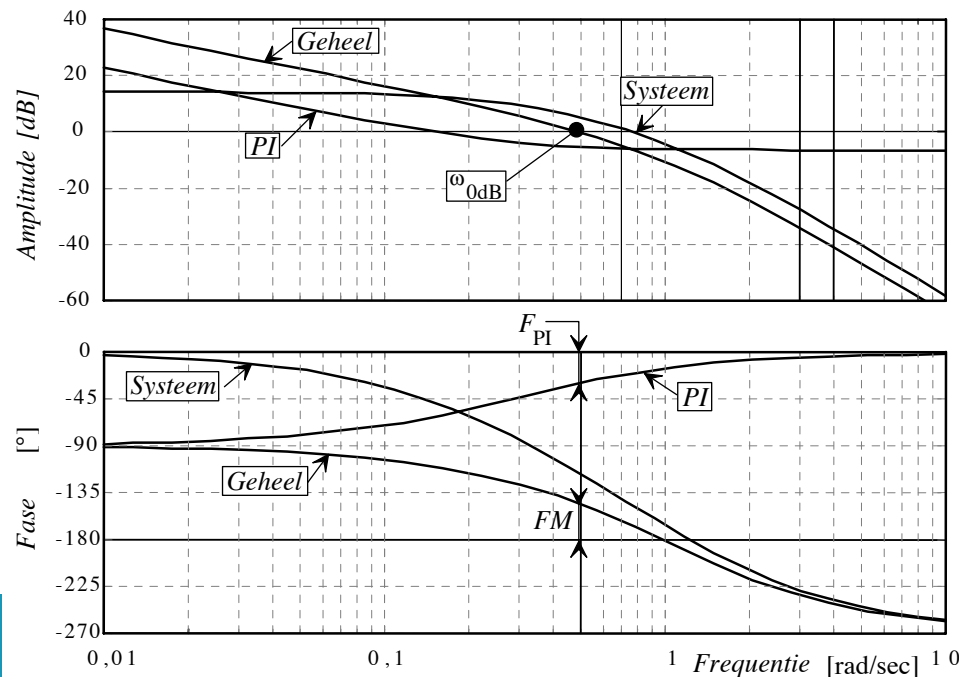
- Gegeven:

- Systeem: $G(p) = \frac{5}{(4p + 1)(p + 1)^2}$

- FM = 35°

- $F_{PI} = -30^\circ$ bij ω_{0dB}

- Oplossing: $\omega_{0dB} = 0,49 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\tau_i = 3,53 \text{ s}$, $Kr = -6,5 \text{ dB}$



Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

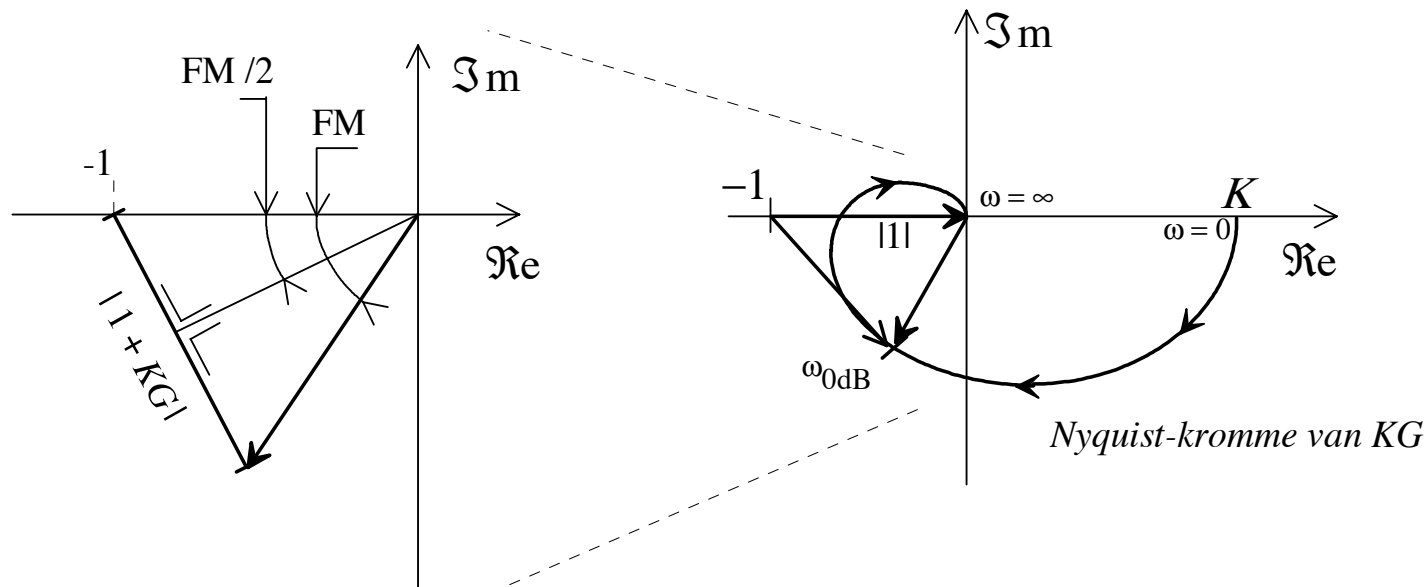
Verband FM en resonantiepiek

- Versterking geslotenlussysteem (eenheidsterugkoppeling):

$$|TF_g| = \frac{|KG|}{|1 + KG|}$$

- Bij snijfrequentie ω_{0dB} : $|KG| = 1$
- $|1+KG|$ kan worden afgeleid uit Nyquistdiagram:

Uitvergroting

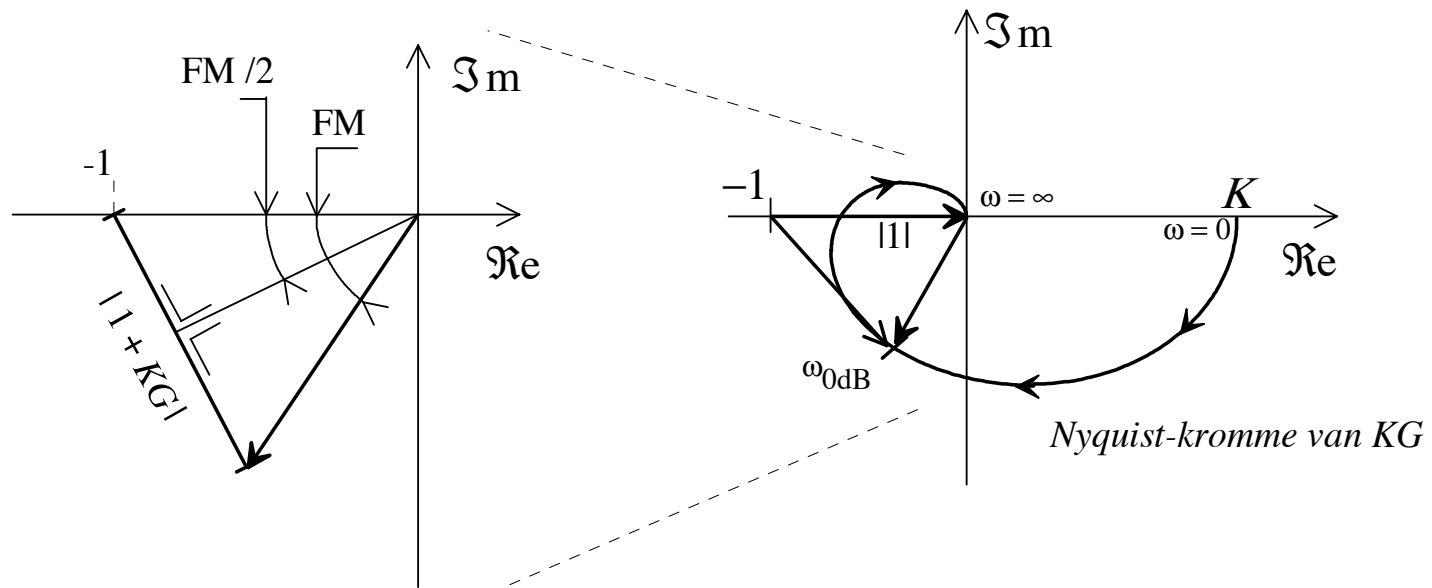


Verband FM en resonantiepiek

$$|1 + KG| = 2 \sin \frac{FM}{2} \Rightarrow |TF_g(\omega_{0dB})| = \frac{1}{|1 + KG|} = \frac{1}{2 \sin \frac{FM}{2}}$$

- Indien FM afneemt stijgt amplitude op snijfrequentie ω_{0dB}

Uitvergroting



Verband FM en resonantiepiek

- Bij goed geregelde systemen (FM voldoende groot):
resonantiepiek \approx snijfrequentie ω_{0dB}

- $M_s \geq \frac{1}{2 \sin \frac{FM}{2}}$ (met M_s de resonantiepiek)

- FM geeft minimumwaarde voor resonantiepiek
- omgekeerd geeft een maximum toegelaten M_s een minimumgrens voor FM:

$$FM \geq 2 \text{bgsin} \frac{1}{2M_s}$$

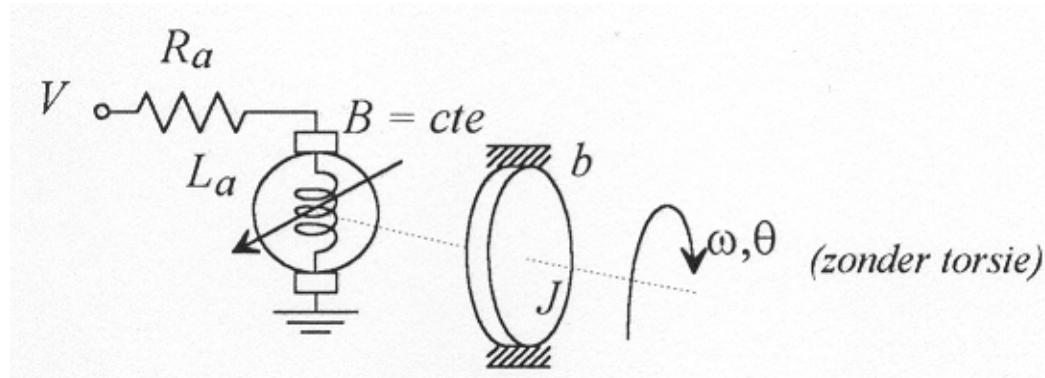
(is noodzakelijk maar niet voldoende voorwaarde)

vb: $FM = 30^\circ$ geeft $M_s \geq 1,93 = 5,7 \text{ dB}$

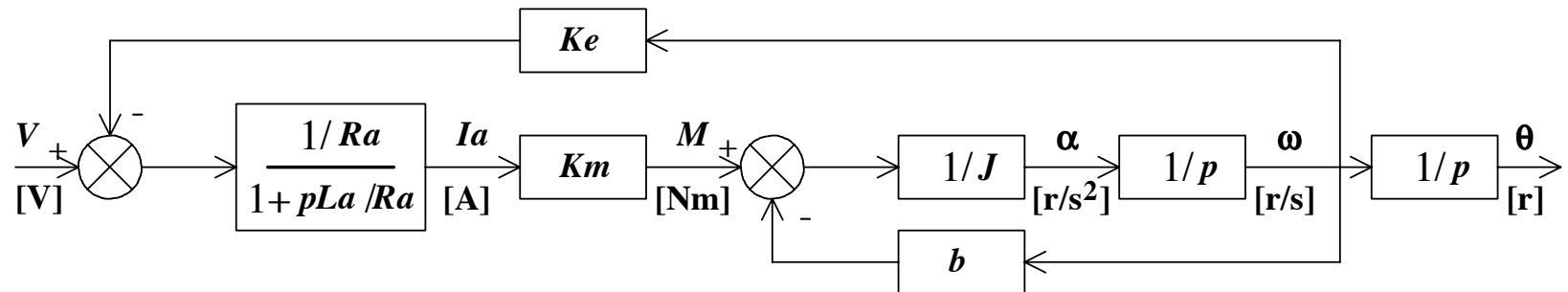
Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

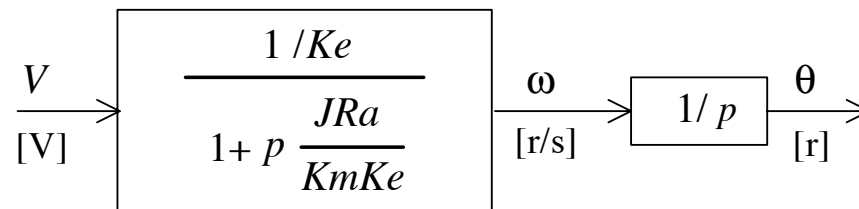
Ankergestuurde DC-motor



- Uitgebreid blokkenschema:



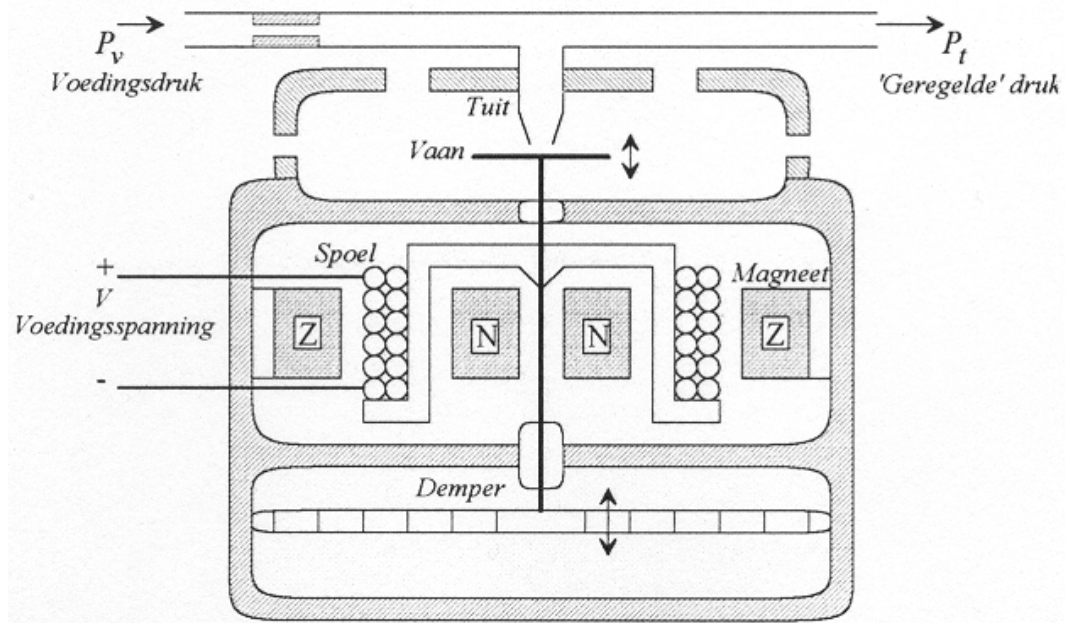
- Vereenvoudigd blokkenschema:



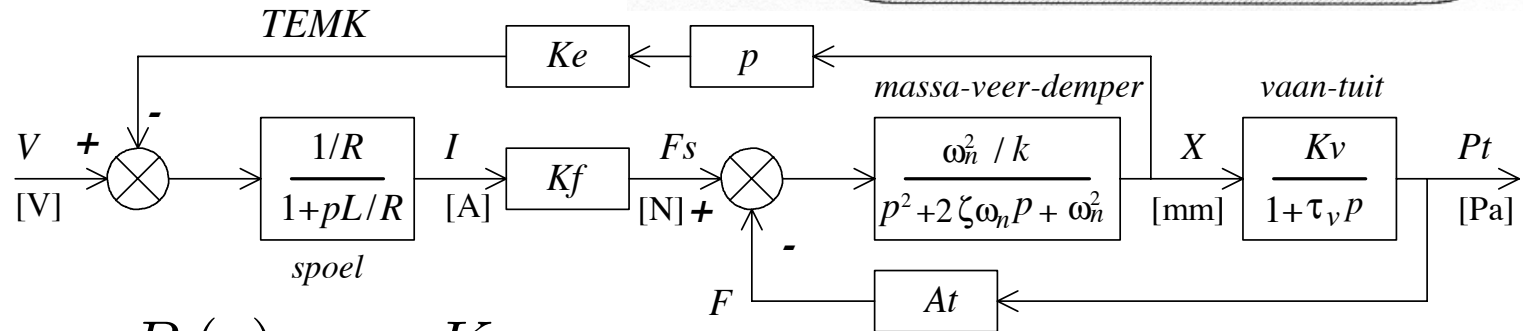
Les 8: Voorbeelden en toepassingen

- **Voorbeelden – Toepassingen** [Baeten, REG1, Hoofdst. 5]
 - Inleiding
 - Oefening 1: drukregeling met manometer en hydraulische servomotor
 - Oefening 2: positionering via veldgestuurde DC-motor
 - Ontwerp van een PI-regelaar
 - Verband FM en resonantiepiek van geslotenlussysteem
 - Ankergestuurde DC-motor
 - Elektrisch-pneumatische omvormer

Elektrisch-pneumatische omvormer



- Blokkenschema:



- TF: $\frac{P_t(p)}{V(p)} = \frac{K}{1 + \tau p}$ (na vereenvoudiging)