

Blok 5

Eigenschappen van processen

Doelstellingen:

- De statische karakteristiek en versterkingsfactor van een proces kunnen bepalen.
- Het dynamisch gedrag van een proces kunnen onderzoeken.
- Het verschil tussen een zelfregelend en niet-zelfregelend proces kunnen formuleren.
- Stapsresponsie van een nulde-orde-proces kunnen weergeven.
- Stapsresponsie en tijdconstante van een eerste-orde-proces kunnen afleiden.
- Stapsresponsie en tijdconstante van een tweede-orde-proces kunnen bepalen.
- Het oscillerend gedrag van processen nauwkeurig kunnen omschrijven.
- Regelbaarheid van processen kunnen onderscheiden.

Een proces is een fysisch of chemisch gebeuren met zijn eigen wetten en ritme.

De dynamische eigenschappen van de regelaars moeten aangepast zijn aan die van het proces zodat ze aan hun regelopdracht optimaal kunnen voldoen.

Om de dynamische eigenschappen van een proces te vinden, is het niet nodig het inwendig mechanisme van het proces te kennen. Het volstaat om aan de ingang van het proces een sprongvormige verandering toe te passen en het hierop volgend antwoord of responsie te meten aan de uitgang.

Uit de vorm van de responsiekarakteristiek kan men het volgende afleiden:

- tot welk type het proces behoort;
- de versterkingsfactor van het proces;
- de tijdconstante en de dode tijd van het proces.

Inhoud:

1. Statisch gedrag van een proces.
2. Standaardwaarden.
3. Dynamisch onderzoek van een proces.
4. Zelfregelende en niet-zelfregelende processen.
5. Proces met dode tijd.
6. Stapsresponsie van nulde-orde-proces.
7. Stapsresponsie van eerste-orde-proces.
8. Stapsresponsie van tweede-orde-proces.
9. Orde van grootte van dode tijden en tijdconstanten.
10. Stapsresponsie met oscillerend karakter.
11. Stapsresponsie van niet-zelfregelend proces.
12. Opnemen van stapantwoord van een proces.
13. Regelbaarheid van processen.
14. Aanpassen van regelaar aan proces.
15. Opdrachten.
16. Procesgrootheden en hun eenheden.

1. Statisch gedrag van een proces

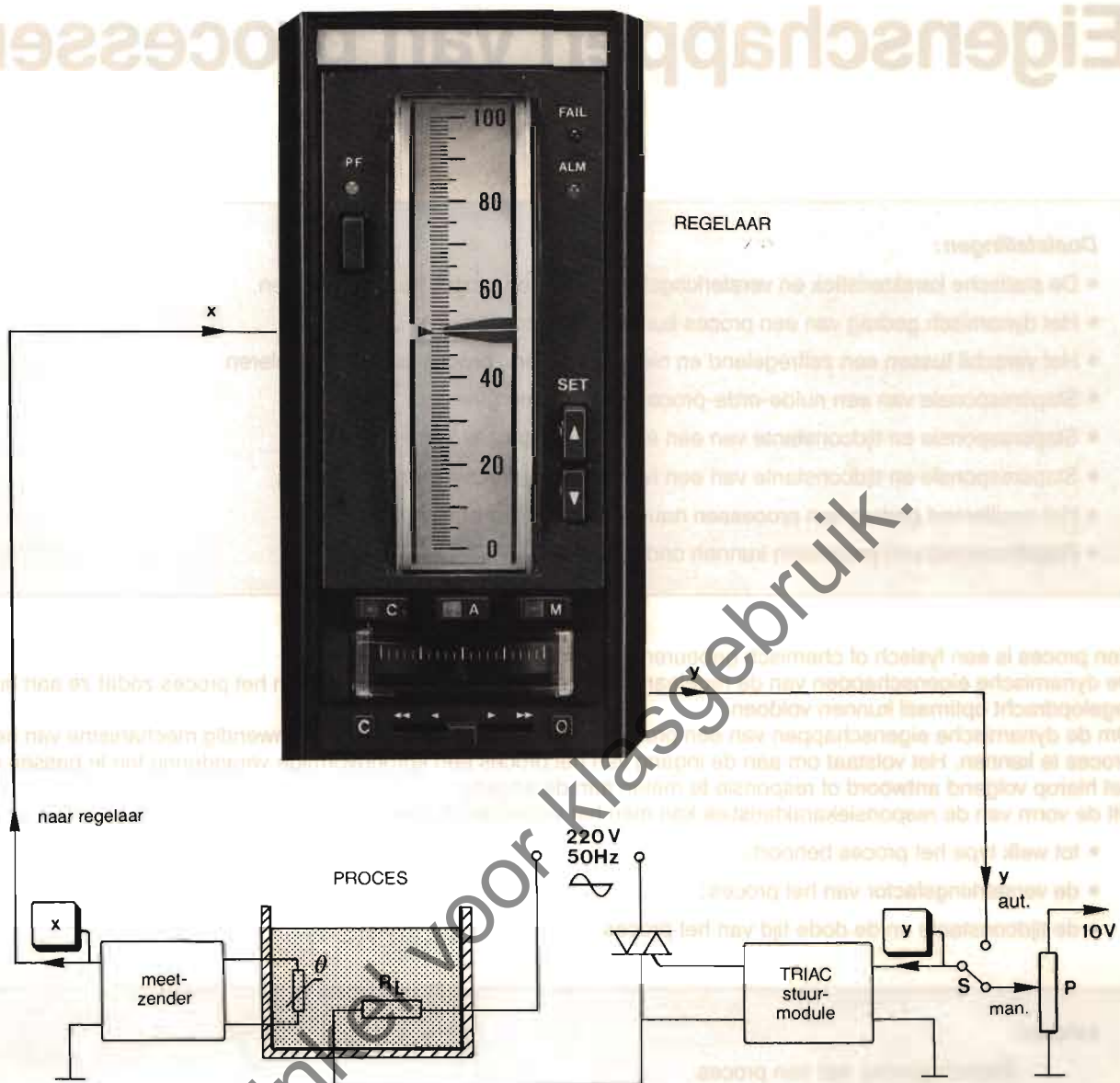


Fig. 5.1 De procesketen van een temperatuurregeling.

Omdat we in de gesloten kring de regelaar bovenaan en het proces beneden tekenen (met input rechts en output links), lezen we het signaalverloop in het proces van rechts naar links. We zullen daarom in het vervolg steeds het proces van rechts naar links tekenen.

In fig. 5.1 zien we de procesketen waarmee de temperatuur van een vloeistof geregeld wordt door het sturen van een triac of elektronische klep. Hierdoor wordt de elektrische energie die door R_L in warmte wordt omgezet, soepel geregeld. Aan de uitgang van de regelaar is er een voorziening om de gesloten keten van regelaar en proces te onderbreken met omschakelaar S.

In de stand "automatisch" wordt de regelkring gesloten, zodat de y-waarde van de regelaar als input van het proces dient.

In de stand "manueel" (handmatig), wordt echter de y-waarde van de regelaar losgekoppeld. Er is geen gesloten kring meer. De input van het proces wordt nu bepaald door de stand van potentiometer P.

Om de eigenschappen van het proces te kunnen achterhalen, gaan we in het vervolg steeds de kring openen en manueel een signaal y in het proces sturen om dan af te wachten hoe x daarop reageert.

1.1 Statistische proceskarakteristiek

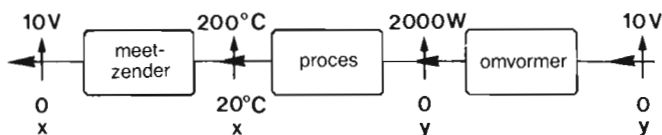


Fig. 5.2 Blokschema van de procesketen van een temperatuurregeling

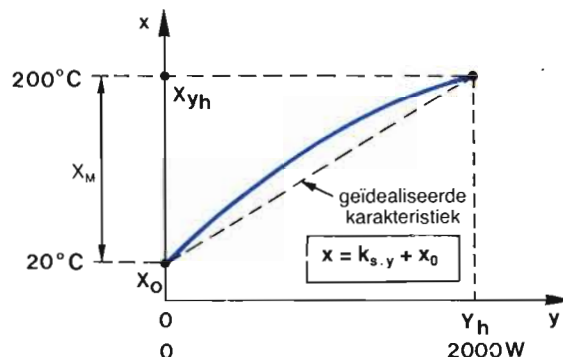


Fig. 5.3 Statistische karakteristiek van het verwarmingsproces

Men kan de statische karakteristiek van het proces als volgt bepalen. Voor elke waarde van de ingang y , laat men het proces tot rust komen en noteert de daarbijhorende waarde van x .

Op die manier verkrijgt men het verband $x = f(y)$.

Het grafisch verband tussen de gemeten waarde x en de instelwaarde y noemt men de statische karakteristiek van het proces.

Nemen we als voorbeeld de temperatuurregeling van een vloeistof. Bij een vermogentoevoer van 2000 W stijgt de temperatuur van de vloeistof na verloop van tijd van 20°C naar 200°C. Dit is in het blokschema van fig. 5.2 weergegeven.

In fig. 5.3 wordt zowel de ideale als werkelijke statische karakteristiek van het verwarmingsproces getoond.

In deze karakteristiek zijn de volgende grootheden erg belangrijk:

Y_h : maximum instelwaarde;

X_{yh} : de waarde van x als de instelling gelijk is aan Y_h ;

X_M : meetbereik van het proces;

dit is de verandering van x als y verandert over de hele afstand $0 \dots Y_h$

Uit de statische karakteristiek van het verwarmingsproces van fig. 5.3 volgt:

$$Y_h = 2000 \text{ W.}$$

$$X_{yh} = 200^\circ\text{C}$$

$$X_M = 200^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 180^\circ$$

1.2 Versterkingsfactor van het proces

De procesversterking (proces gain) is de verhouding van de verandering van de gemeten waarde dx tot de verandering van de instelwaarde dy .

$$\text{Vandaar: } k_s = \frac{dx}{dy}$$

Voor de geïdealiseerde karakteristiek in fig. 5.3 geldt ook:

$$k_s = \frac{X_M}{Y_h}$$

Als een verandering van 0 tot 2000 W aan de ingang een verandering van 20°C tot 200°C aan de uitgang veroorzaakt dan kan in dit voorbeeld de procesversterking als volgt uitgedrukt worden:

$$k_s = \frac{X_M}{Y_h} = \frac{180^\circ\text{C}}{2000 \text{ W}} = 0,09^\circ\text{C/W}$$

Op deze wijze is de versterking dus niet dimensieloos en wordt in een bepaalde eenheid uitgedrukt die zeer uiteenlopend kan zijn volgens de aard van het proces.

Noemt men de maximum instelling $Y_h = 100\%$ dan is $k_s = \frac{180}{100} = 1,8^\circ\text{C}/\%$

2. Standaardwaarden

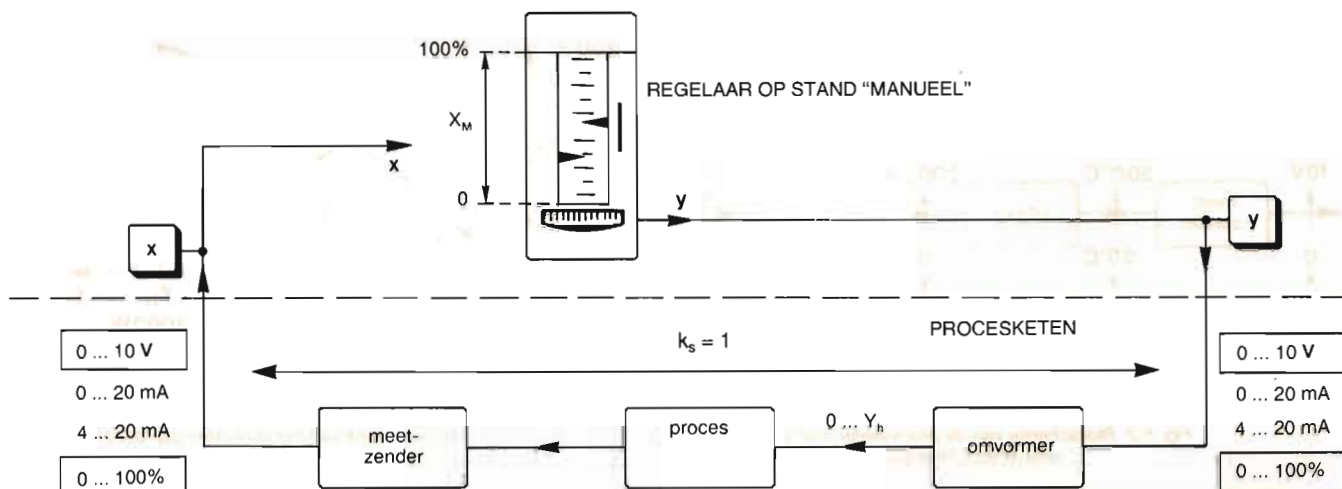


Fig. 5.4 Regelkring met standaardwaarden

Omdat het in industriële regelkringen zo belangrijk is, hernemen we in fig. 5.4 nogmaals de volledige gesloten kring met de vermelding van de standaardwaarden.

2.1 Gestandaardiseerde proceskarakteristiek

De standaardisatie van het proces wordt met behulp van fig. 5.5 verklaard. Aan de ingang van het proces zal een standaardsignaal ($0 \dots 10V \triangleq 0 \dots 100\%$) ervoor zorgen dat de vermogentoevoer van 0 tot Y_h verandert. Aan de uitgang van het proces zorgt de meetzender ervoor dat de onderste waarde van het meetbereik overeenkomt met 0 V (0%) en dat het bovenste meetbereik overeenkomt met 10 V (100%). Een verandering van y over 100% veroorzaakt een verandering van x over 100%. De versterkingsfactor voor een gestandaardiseerd proces wordt nu:

$$k_s = \frac{\% \text{ verandering van } x}{\% \text{ verandering van } y}$$

dit is
dimensieloos

In bovenstaande regelkring wordt:

$$k_s = \frac{100\%}{100\%} = 1$$

In een gestandaardiseerd proces is $k_s = 1$ en dimensieloos.

Het is echter niet altijd mogelijk de zender zo in te stellen dat de procesversterking $k_s = 1$. Meestal ligt de procesversterking tussen 0,5 en 2 hoewel ook andere waarden worden aangetroffen. Op de meeste gestandaardiseerde regelaars zal de x - en de y -waarde voorgesteld worden op meters die in % geijkt zijn. Het totale meetbereik X_M van het proces wordt in fig. 5.6 aangeduid met een verticale schaal 0 ... 100%.

De regelwaarde Y is op de horizontale schaal 0 ... 100% weergegeven. Een dergelijke regelaar kan in ieder proces, voor verschillende proceswaarden (temperatuur, druk, debiet ...) gebruikt worden als men het proces standaardiseert.

Voorbeeld

De versterking van het proces kan men als volgt bepalen. Als bijvoorbeeld 10% verandering van y , 15% verandering van x veroorzaakt dan is de procesversterking:

$$k_s = \frac{15\%}{10\%} = 1,5$$

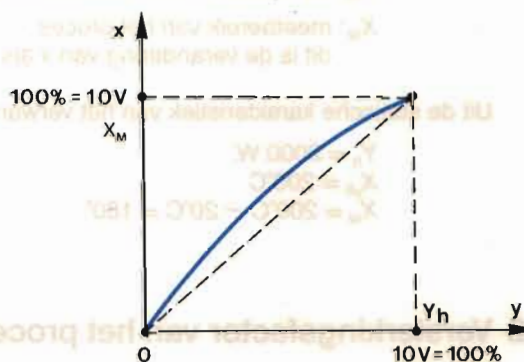


Fig. 5.5 Gestandaardiseerde proceskarakteristiek

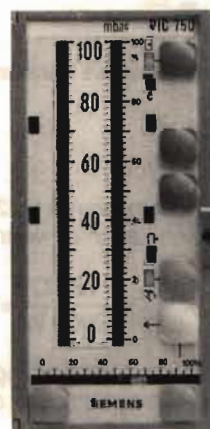


Fig. 5.6 Regelaar met X- en Y-schaal in %

2.2 Denken in een gestandaardiseerde regelkring

We nemen aan dat de procesversterking in de regelketen van fig. 5.4 gelijk is aan: $k_s = 1$.

Verder werken we met standaardsignalen.

De instrumentman moet uit de bewegingen van x en y kunnen afleiden of alles nog in orde is. Hij kan de waarden x en y alleen beoordelen op de meetinstrumenten die op de regelaar staan. Deze meetinstrumenten zijn geijkt in een schaal 0 ... 100%. Dit geldt voor de proceswaarde x en eveneens voor de instelwaarde y . De instrumentman moet dus gewend zijn om te denken in deze procentwaarden. Meestal wordt het proces zo gedimensioneerd dat de gewenste proceswaarde x bereikt wordt bij 50% van de maximum instelwaarde of $y = 1/2 Y_h$.

3. Dynamisch onderzoek van een proces

3.1 Stapantwoord

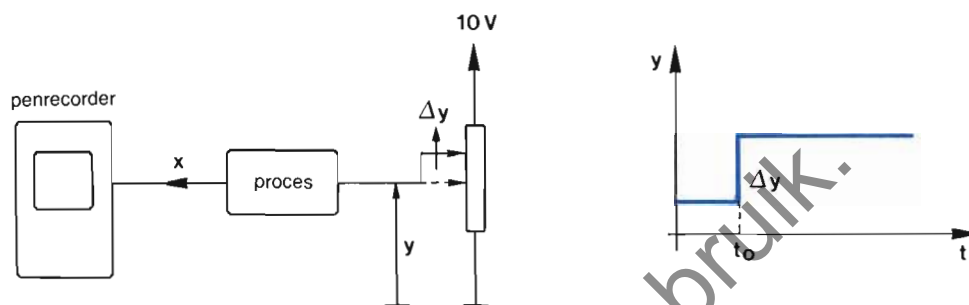


Fig. 5.7 Toepassen van een stapvormige spanning aan een proces

Veronderstel dat de ingangswaarde y van het proces met een sprong Δy verandert zoals is weergegeven in fig. 5.7. Met een penrecorder kan men nu registreren hoe het verloop is van de proceswaarde x in functie van de tijd. Hierdoor verkrijgt men de grafiek $x = f(t)$, die typisch is voor dit proces en dus de "identiteitskaart" is van het proces. Op de grafiek kan men ook aflezen of het proces snel of traag reageert op de verandering Δy .

Een maatgetal wordt dan gedefinieerd om de traagheid van het proces voor te stellen. Dit maatgetal wordt de tijdconstante van het proces genoemd.

3.2 Frequentie-antwoord

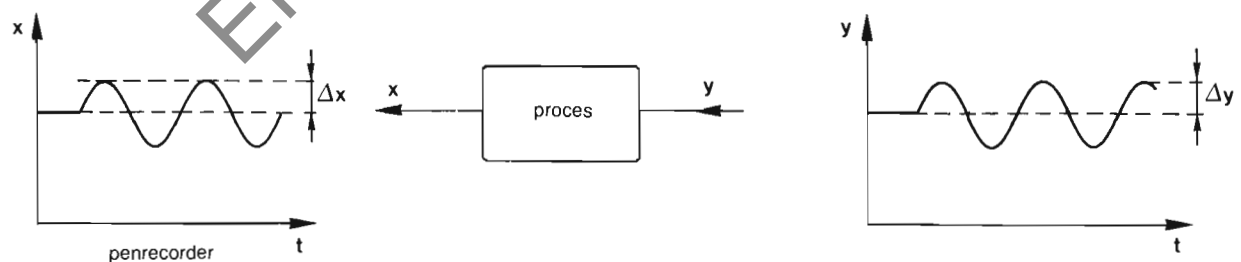


Fig. 5.8 Toepassen van een sinusvormige spanning aan een proces

In fig. 5.8 verandert de ingangswaarde y sinusvormig terwijl de amplitude Δy constant wordt gehouden. Vervolgens laat men de frequentie in stappen toenemen, bv. $f = 0,01$ Hz, $f = 0,02$ Hz, enz. Voor elke ingestelde frequentie aan de ingang zal men nu de amplitude Δx noteren aan de uitgang. Zet men de amplitude uit in functie van de frequentie, dan verkrijgt men het frequentieantwoord of frequentieresponsie van het proces.

Op deze wijze kan men zich een idee vormen op welke wijze het proces snelle en trage veranderingen van y nog volgen kan. Omdat het in de praktijk gemakkelijker is een stapantwoord te verkrijgen dan een frequentieantwoord, zullen wij de laatste methode niet behandelen.

4. Zelfregelende en niet-zelfregelende processen

4.1 Zelfregelend proces

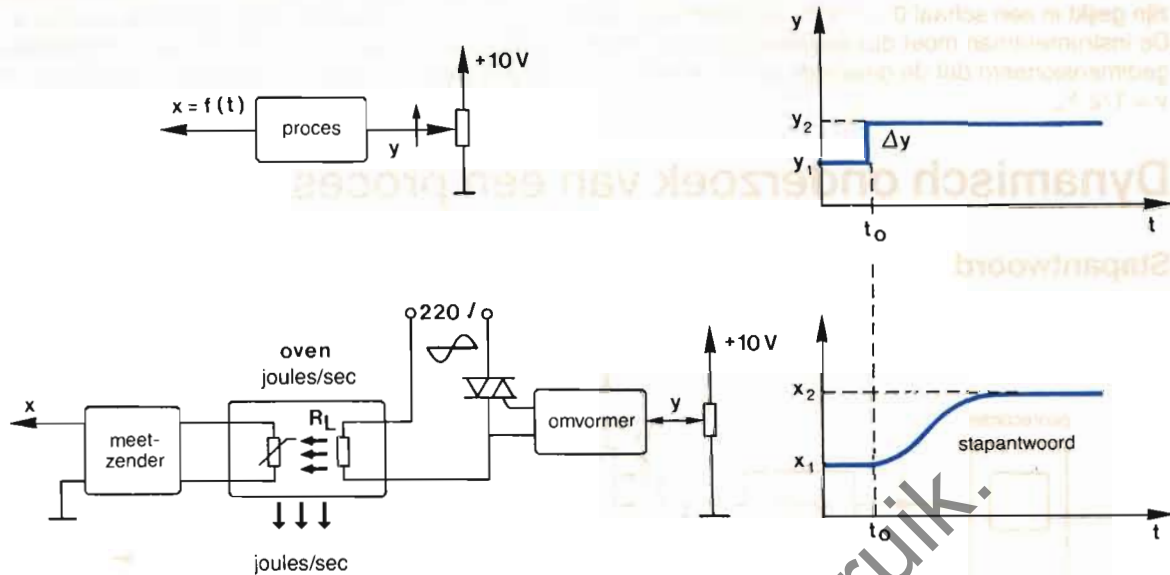


Fig. 5.9 Temperatuurregeling als zelfregelend proces

In een zelfregelend proces zal na verstellen van y over een afstand van Δy , de proceswaarde x , na verloop van een zekere tijd zich instellen op een nieuwe evenwichtswaarde x_2 . Een typisch voorbeeld is een temperatuurregeling voorgesteld in fig. 5.9. Bij een instelwaarde y_1 stelt zich een temperatuur x_1 in waarbij het toegevoerd aantal joules/sec. gelijk is aan het aantal afvloeiende joules/sec. Bij een instelwaarde y_2 verhoogt het aantal toegevoerde joules per seconde. De temperatuur stijgt waardoor er meer joules/sec. naar buiten stromen tot er een nieuw evenwicht optreedt bij een hogere temperatuur x_2 . Dit is voorgesteld in het stapantwoord van fig. 5.9.

4.2 Niet-zelfregelend proces

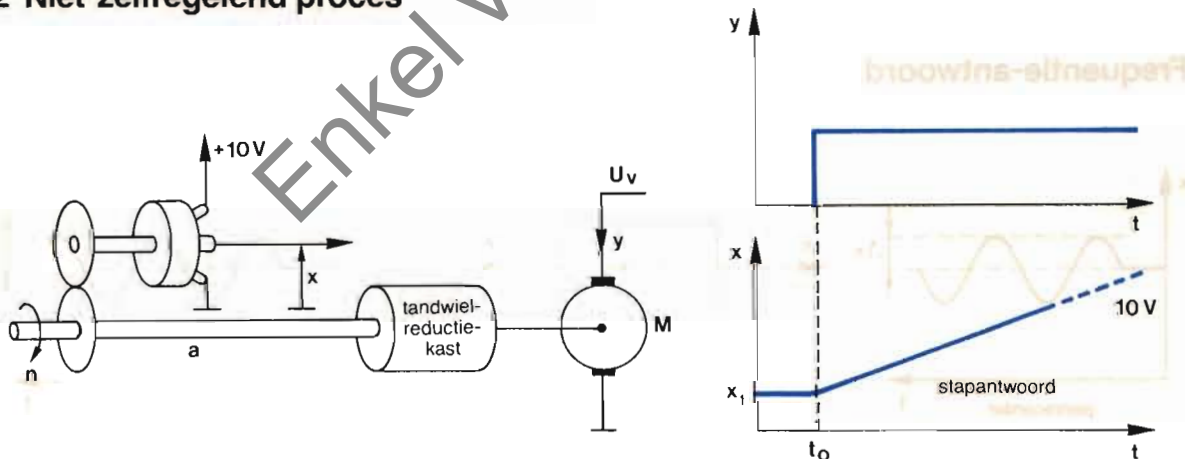


Fig. 5.10 Gedrag open servosysteem bij een stapfunctie

Hier zal bij het verstellen van de y -waarde, de proceswaarde x blijven veranderen tot deze vastloopt tegen de uiterste waarde. Het open servosysteem van fig. 5.10 is een typisch voorbeeld hiervan. Als $y = 0$, dan staat de motor M stil zodat de as a zich in een positie x_1 bevindt. Verstellen we y met een sprong, dan zal de motor draaien, eveneens as a , zodat de spanning x stijgt. De motor zal blijven draaien en x zal dus blijven stijgen.

Het blijkt nu dat in de gesloten kring, de proceswaarde in zelfregelende processen gemakkelijker te stabiliseren is dan in niet-zelfregelende processen.

5. Proces met dode tijd

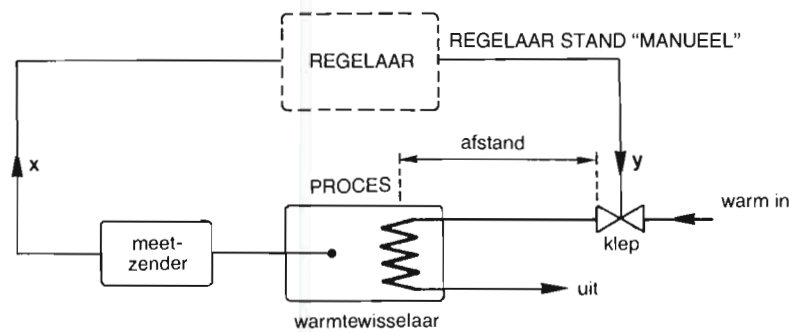


Fig. 5.11 Proces met warmtewisselaar

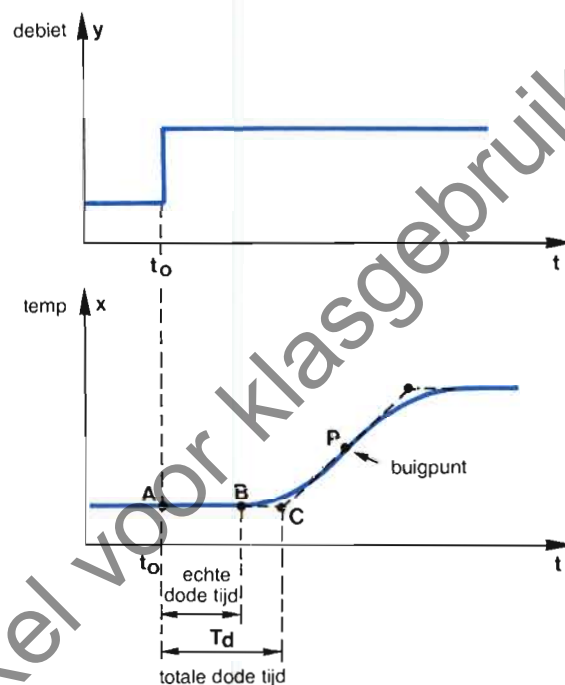


Fig. 5.12 Responsie op een stapfunctie

In fig. 5.11 beschouwen we een proces met warmtewisselaar. Doorheen de warmtewisselaar loopt warm water waarvan het debiet gestuurd wordt door een klep. De snelheid van het water is beperkt. Dus als we de klep met een sprong verstellen, dan duurt het een zekere tijd, vooraleer het groter debiet van warm water door de warmtewisselaar stroomt. Men spreekt hier eveneens van een voortplantingsvertraging, die oorzaak is van de echte dode tijd AB in fig. 5.12. De temperatuur x zal pas in het punt B beginnen te stijgen.

Het stijgen van de x -waarde wegens de verstelling van de y -waarde zal dikwijls zacht aanlopen, zodat een scherp aflijnen van de dode tijd niet altijd mogelijk is. In dit proces zal zich de nieuwe temperatuurwaarde instellen na het doorlopen van een uitgerokken S-vormige grafiek. In het buigpunt P trekt men een raaklijn en men definieert de totale dode tijd met de afstand AC. Men neemt dan deze dode tijd als maatgevend voor de vertraging.

De dode tijd is de grote boeman in de gesloten regelkring. Het is door de dode tijd dat via storingen de x -waarde fel kan afwijken voordat de correctie van de regelaar effect heeft. Stel dat een storing de x -waarde doet afnemen. Via de meetzender en de regelaar gaat de instelwaarde y vergroten. Deze correctie heeft pas effect na de dode tijd, zodat ondertussen de afwijking van x groot kan zijn.

Besluit:

Hoe groter de dode tijd, hoe moeilijker een proces te regelen is.

6. Stapresponsie van nulde-orde-proces

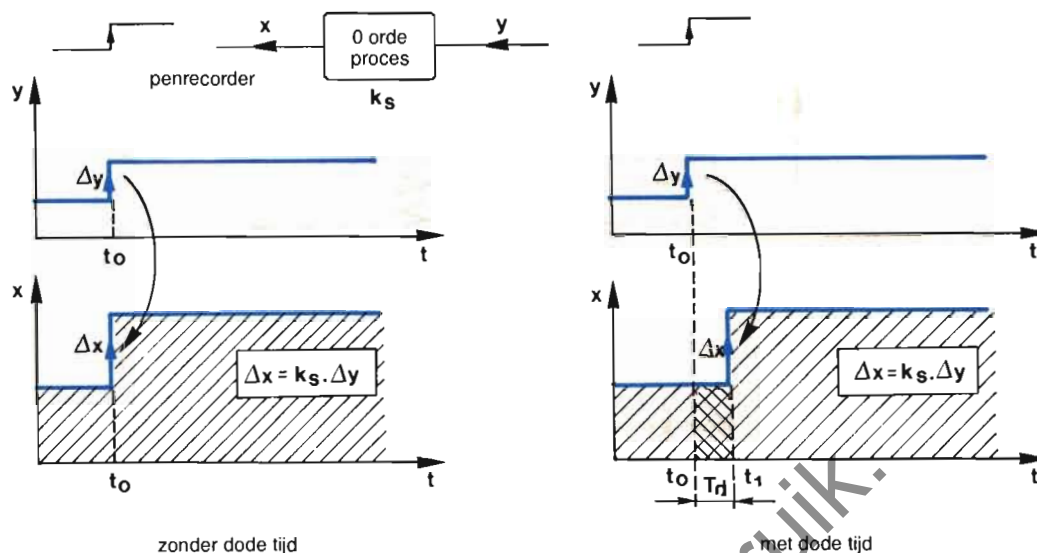


Fig. 5.13 Stapresponsie van een nulde-orde-proces

6.1 Nulde-orde-proces

Nulde-orde-processen zijn processen zonder tijdconstante. De uitgang van het proces volgt evenredig de sprong van de ingang. Er is een proportioneel verband tussen de verandering van de instelwaarde Δy en de verandering van de proceswaarde Δx .

In formule gebracht:

$$\Delta x = k_s \cdot \Delta y$$

Is er een dode tijd T_d aanwezig, dan volgt de uitgang de ingangssprong onmiddellijk na de dode tijd T_d . Processen met een zuiver proportioneel gedrag, of echte nulde-orde-processen bestaan praktisch niet, tenzij men starre asoverbrengingen beschouwt, waarbij de proceswaarde x een afstand is. Toch zijn er enkele processen die zulke kleine vertragingen veroorzaken dat ze in deze categorie kunnen geklasseerd worden.

6.2 Processen zonder dode tijd

1. Starre asoverbrenging.
2. Druk en debietregeling op een vloeistof in een buis, vlak achter de klep.
3. Elektronische spanningsregeling met transistoren.
4. Spanning over een ohmse belasting.
5. Transportband, met sturing op de aandrijfmotor.

6.3 Processen met dode tijd

1. Transportband, waarbij de hoeveelheid geregeld wordt door een schuifklep.
2. Mengregeling van twee vloeistoffen.

Al deze voorbeelden worden op de volgende bladzijde in fig. 5.14 met een symbolische illustratie weergegeven.

Voorbeelden van zelfregelende processen van nulde-orde

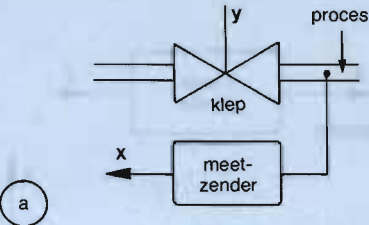
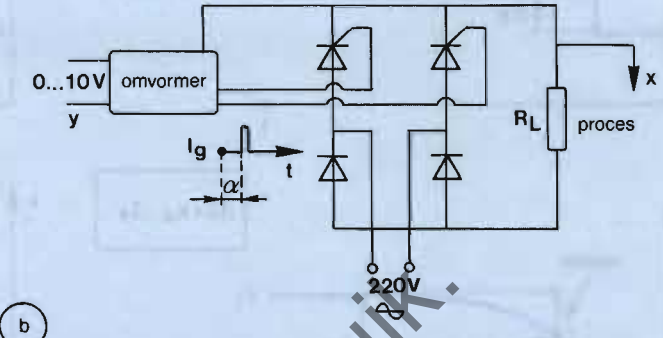
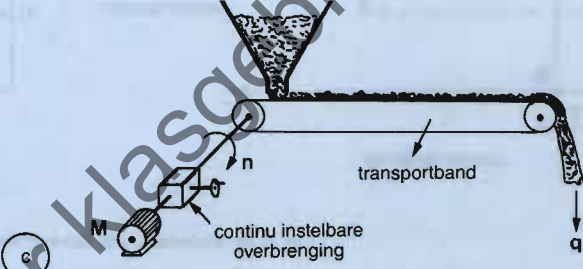
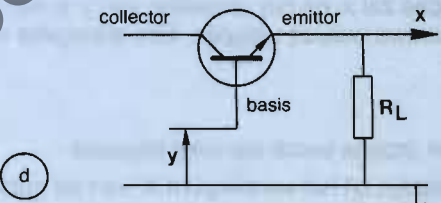
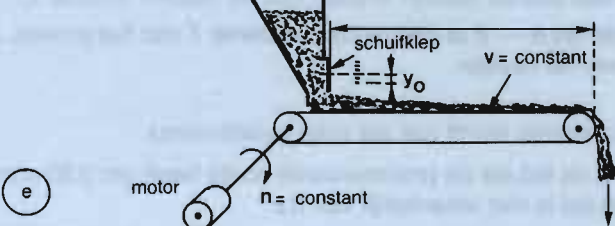
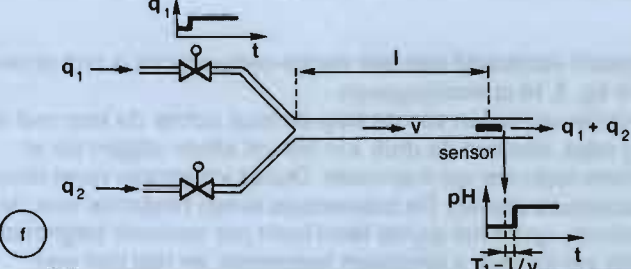
Zonder dode tijd: Druk en debietregeling op vloeistoffen in een buis met meting vlak achter de klep. • procesingang: klepinstelling y • procesuitgang x: druk, debiet	 (a)
Elektronische spanningsregeling over een ohmse belasting met thyristoren. • procesingang: $y = 0 \dots 10$ volt ontsteekhoek α • procesuitgang: $x =$ spanning U_{RL}	 (b)
Transportband. • procesingang: n • procesuitgang: debiet q	 (c)
Spanningsregeling over een ohmse belasting met transistor als instelorgaan. • procesingang: $y =$ spanning op basis van transistor • procesuitgang: $x = U_{RL}$	 (d)
Met dode tijd: Transportband met constante snelheid. De hoeveelheid massa wordt bepaald door een schuifklep.	 (e)
Mengregeling van twee vloeistoffen. Van de gemengde vloeistof wordt de pH-waarde (zuurtegraad) of de temperatuur gemeten.	 (f)

Fig. 5.14 Processen van nulde-orde

7. Stapresponsie van eerste-orde-proces

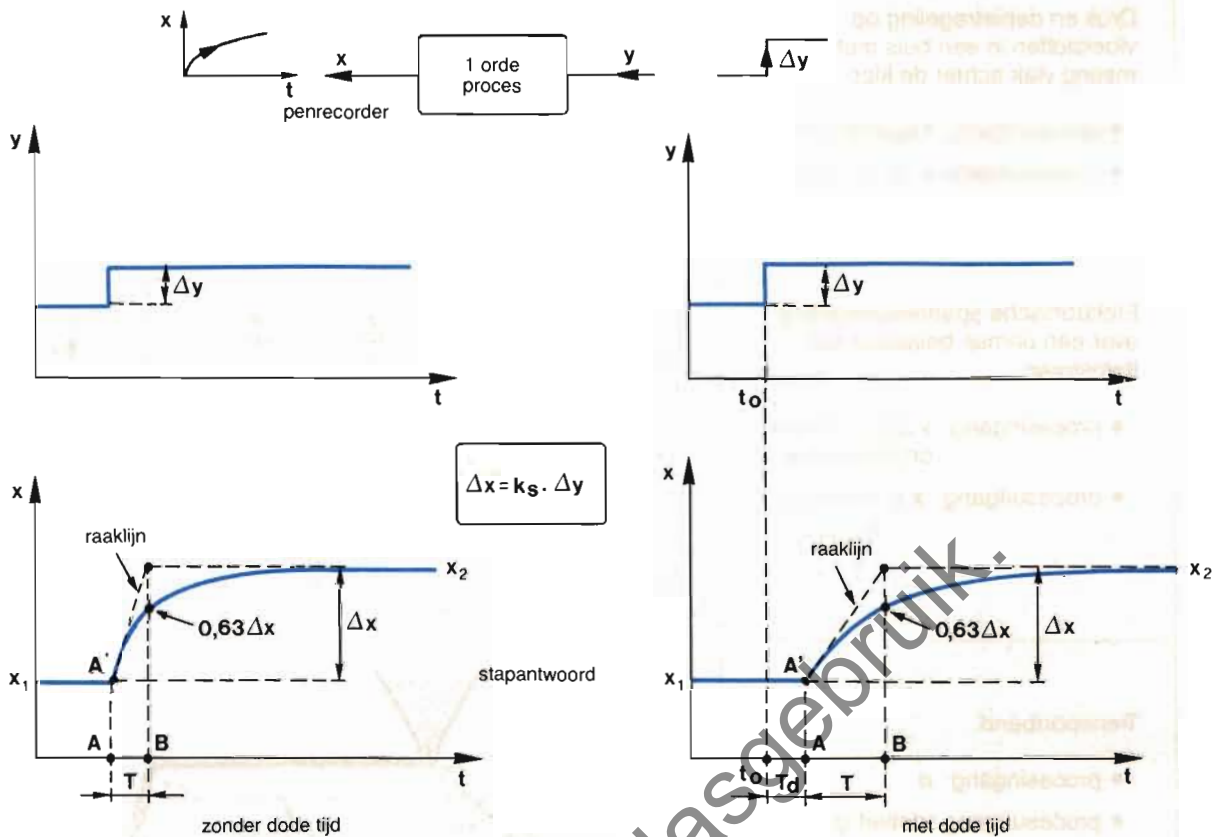


Fig. 5.15 Stapresponsie van een eerste-orde-proces

Bij een eerste-orde-proces zal x , na het verstellen van y , in het begin snel toenemen. Nadien zal x echter steeds trager naar de nieuwe waarde uitlopen. Een maatgetal voor de traagheid van dit proces is de tijdconstante T .

De tijdconstante van het proces wordt als volgt bepaald:

- men trekt een raaklijn uit het vertrekpunt A' van de curve (in principe kan dit een willekeurig punt zijn op de curve);
- men laat de raaklijn snijden met de nieuwe waarde x_2 ;
- de tijd $A - B$ is dan de tijdconstante T van het proces. Zie fig. 5.15. Hierbij is A' het raakpunt van de raaklijn.

De tijdconstante wordt ook als volgt gedefinieerd:

Het is de tijd die de proceswaarde nodig heeft om 0,63 van de totale verandering Δx af te leggen. Deze tijd is niet afhankelijk van Δy .

Een typisch voorbeeld van een eerste-orde-proces is een drukvat zoals in fig. 5.16 is weergegeven.

Als door het verstellen van de klep de druk achter de klep met een sprong stijgt, dan kan de druk x in het vat alleen stijgen als er meer liters lucht het vat instromen. Deze luchtstroom moet door de toevoerbuis vloeien. De toevoerbuis is een hindernis voor de luchtstroom, zodat het aantal liters lucht per seconde begrensd is. Hierdoor zal de druk x langzaam toenemen, en niet met een sprong. Het laden van een condensator via een weerstand is ook een eerste-orde-proces.

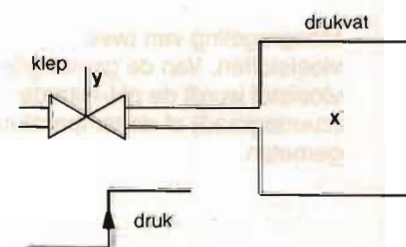


Fig. 5.16 Drukvat als eerste-orde-proces

Voorbeelden van zelfregelende processen van eerste-orde

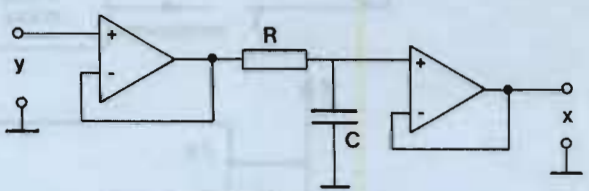
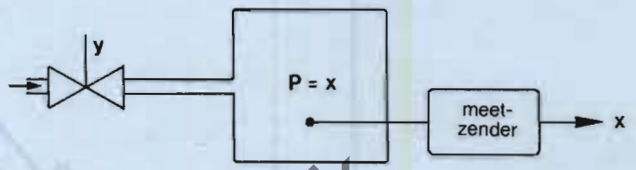
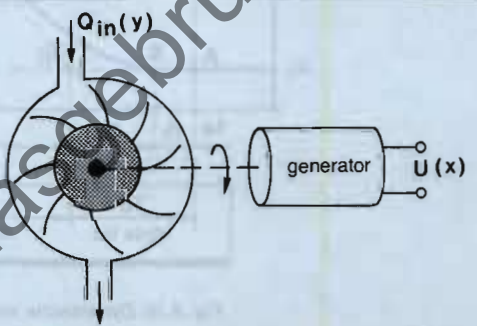
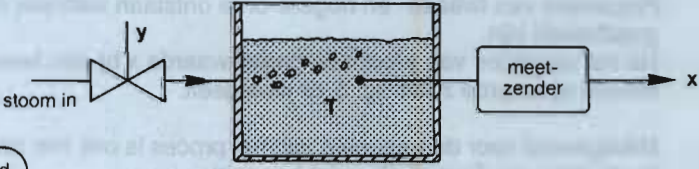
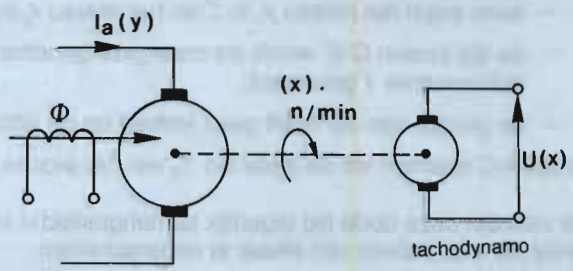
Processimulatie met integrerend RC-netwerk. • procesingang : spanning y • procesuitgang : spanning x	 (a) tijdconstante $T = R.C$
Drukregeling in een drukvat. • procesingang : instelwaarde van klep y • procesuitgang : druk in vat p	 (b)
Waterturbine met spanningsgenerator voor elektriciteitsproductie. • procesingang : debiet q_{in} • procesuitgang : spanning U	 (c)
Temperatuurregeling van een vloeistof met directe stoominvoer • procesingang : klepstand y • procesuitgang : temperatuur x	 (d)
Toerentalregeling met motoren. • procesingang : ankerstroom I_a • procesuitgang : toerental n	 (e)

Fig. 5.17 Zelfregelende eerste-orde-systemen

Een reeks voorbeelden van eerste-orde-systemen zijn overzichtelijk in fig. 5.17 weergegeven.

8. Stapresponsie van tweede- en hogere-orde-proces

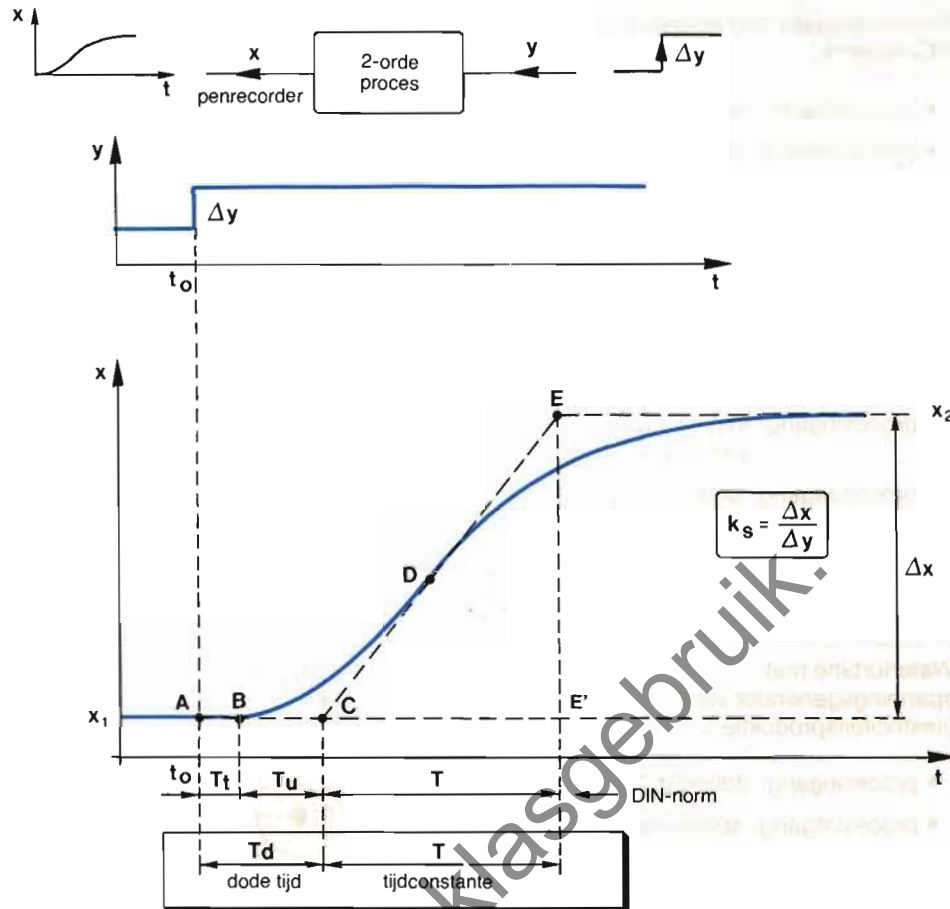


Fig. 5.18 Dynamische karakteristiek van tweede-orde-systeem

Processen van tweede- en hogere-orde ontstaan wanneer meerdere processen **van eerste orde na elkaar** geschakeld zijn.

Na het verstellen van y loopt de proceswaarde x bij een tweede-orde-proces **volgens een S-curve** naar de nieuwe x_2 -waarde zoals fig. 5.18 weergeeft.

Maatgevend voor de traagheid van het proces is ook hier de tijdconstante T .

De grootte van T wordt als volgt bepaald:

- door het buigpunt D wordt een raaklijn getekend;
- deze snijdt het niveau x_1 in C en het niveau x_2 in E;
- de tijd tussen C-E' wordt als maatgetal genomen voor de traagheid van **het proces en wordt de** tijdconstante T genoemd;
- de grootte van Δy heeft geen **invloed** op de tijdconstante.

De tijd A-C noemen we de dode tijd T_d **van het proces**.

We zien dat deze dode tijd eigenlijk samengesteld is uit een echte dode tijd A-B en een vertraging B-C. Beide zijn niet scherp van elkaar te onderscheiden.

In de Duitse DIN-norm wordt de dode tijd T_d opgesplitst en maakt men het volgende onderscheid:

- T_t : echte dode tijd (Totzeit)
- T_v : uitsteltijd (Verzugzeit)
- T : tijdconstante

Tenslotte worden in fig. 5.19 voorbeelden van zelfregelende tweede-orde-processen getoond.

Opgepast: door het invoeren van de constructie in stippellijn wordt het stapantwoord van tweede- en hogere-orde in eerste benadering herleid naar het stapantwoord van een eerste orde proces. Later, bij het afstellen van de regelaar, zullen we hierop terugkomen (blz. 200).

Voorbeelden van zelfregelende processen van tweede en hogere orde.

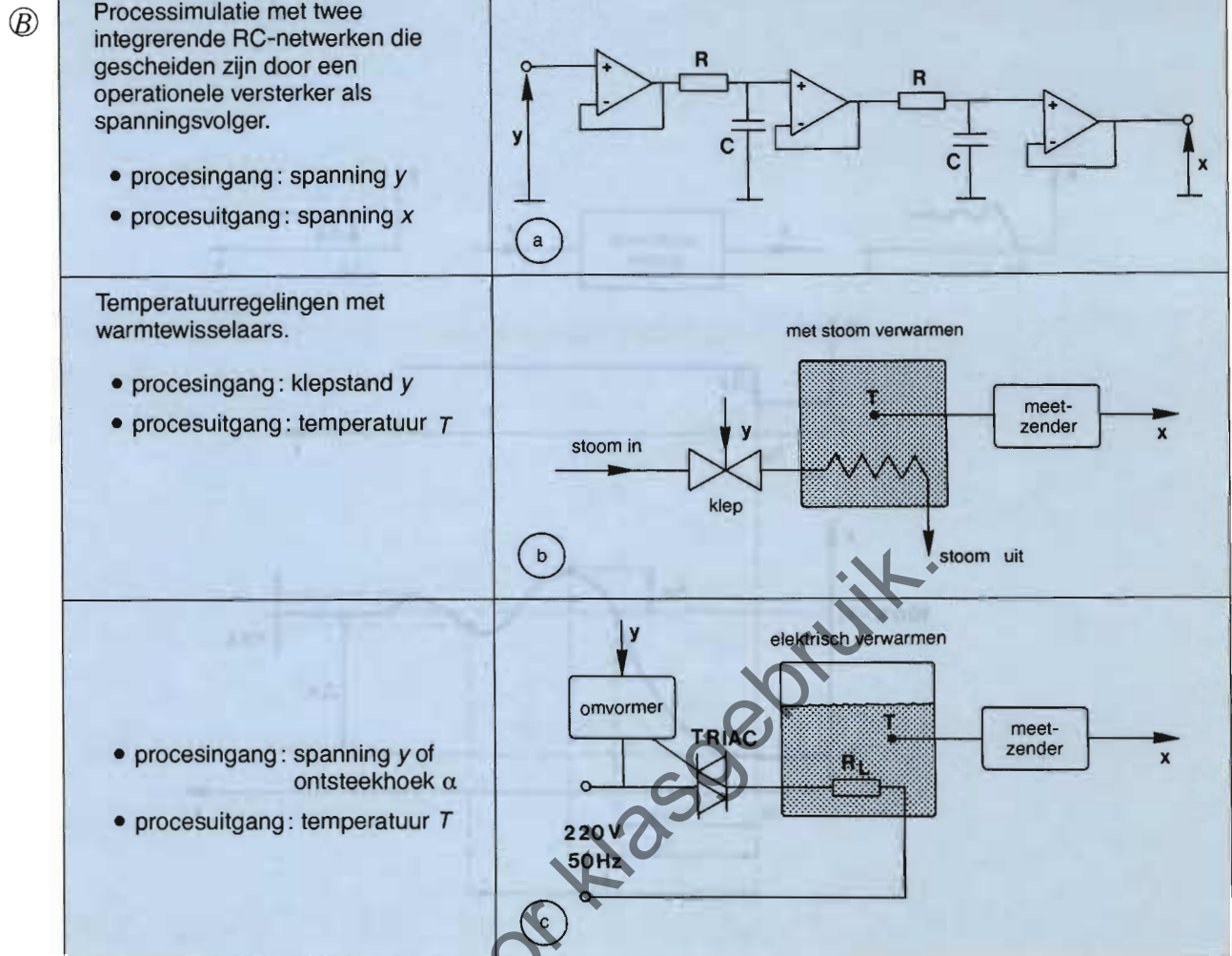


Fig. 4.19 Zelfregelende tweede-orde-processen

9. Orde van grootte van dode tijden en tijdconstanten

Te regelen grootheid	Aard van het proces	Dode tijd	Tijdconstante
Temperatuur	Kleine elektrische oven Grote elektrische oven Oven met gas gestookt Destillatiekolom Huisverwarming	rond 1 min. rond 3 min. 1 tot 5 min. 1 tot 7 min. 1 tot 5 min.	rond 10 min. rond 30 min. 3 tot 60 min. rond 50 min. 10 tot 60 min.
Debiet	Gassen en vloeistoffen in buizen	0 tot 5 sec.	0,2 tot 10 sec. 0 sec. (vloeist.)
Druk	Gassen in buizen Trommelketel met gas of mazout gestookt Trommelketel met kolen gestookt	0 0 1 min.	0,1 sec. 150 sec. rond 5 min.
Niveau	Trommelketel	0,6 tot 1 min.	—
Toerental	Kleine elektrische aandrijvingen Grote elektrische aandrijvingen	0 0	0,2 tot 10 sec. 5 tot 40 sec.
Spanning	Kleine generatoren Grote generatoren	0 0	1 tot 5 sec. 5 tot 10 sec.

10. Stapresponsie met oscillerend karakter

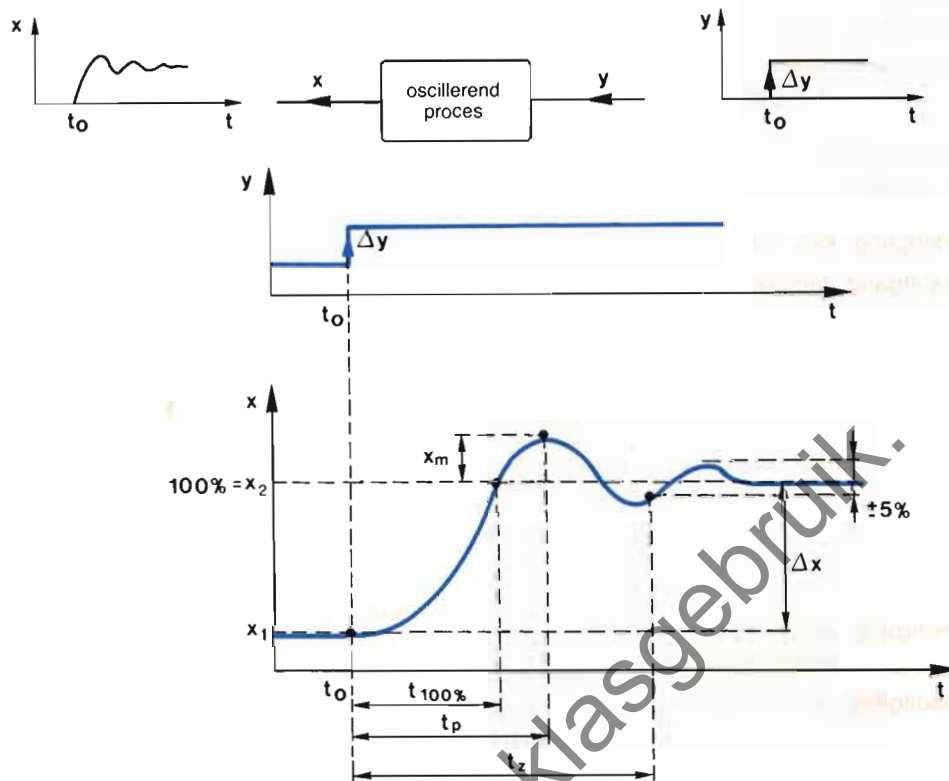


Fig. 5.20 Uitslingeren van de gemeten proceswaarde

Wordt aan een proces een stapvormige regelwaarde y toegepast, dan zal onder bepaalde omstandigheden de proceswaarde x pas na een aantal uitslingeringen tot rust kunnen komen op de eindwaarde:

$$x_2 = x_1 + \Delta x.$$

De volgende waarden bepalen het karakter van dit oscillerend proces:

- $t_{100\%}$: de tijd om de eerste keer de nieuwe waarde x te bereiken, of de tijd om de eerste keer 100% van Δx te doorlopen;
- x_m : de amplitude van de eerste top van de slingingering of het maximum doorschot (overschot);
- t_p : de piektijd vangt aan bij het begin van de stap en loopt tot de piekwaarde van het doorschot;
- t_z : de zettijd (settling-time) is de tijd die nodig is om voor de eerste keer binnen het tolerantiegebied te komen. In fig. 5.20 is t_z voor een tolerantie van 5% weergegeven.

Het is duidelijk dat men oscillaties van de proceswaarde moet vermijden.

Door de demping te verhogen, kan men:

- de grootte van het doorschot beperken;
- het aantal uitslingeringen begrenzen.

In elektronische regelkringen wordt door aangepaste RC-filters de neiging tot oscilleren aanzienlijk verminderd. Bij het ontwerpen van regelsystemen worden er gelijktijdig eisen gesteld aan de grootte van het doorschot en de zettijd.

In een gesloten kring zijn dergelijke processen moeilijker te stabiliseren dan deze zonder oscillerend karakter.

11. Stapresponsie van niet-zelfregelend proces

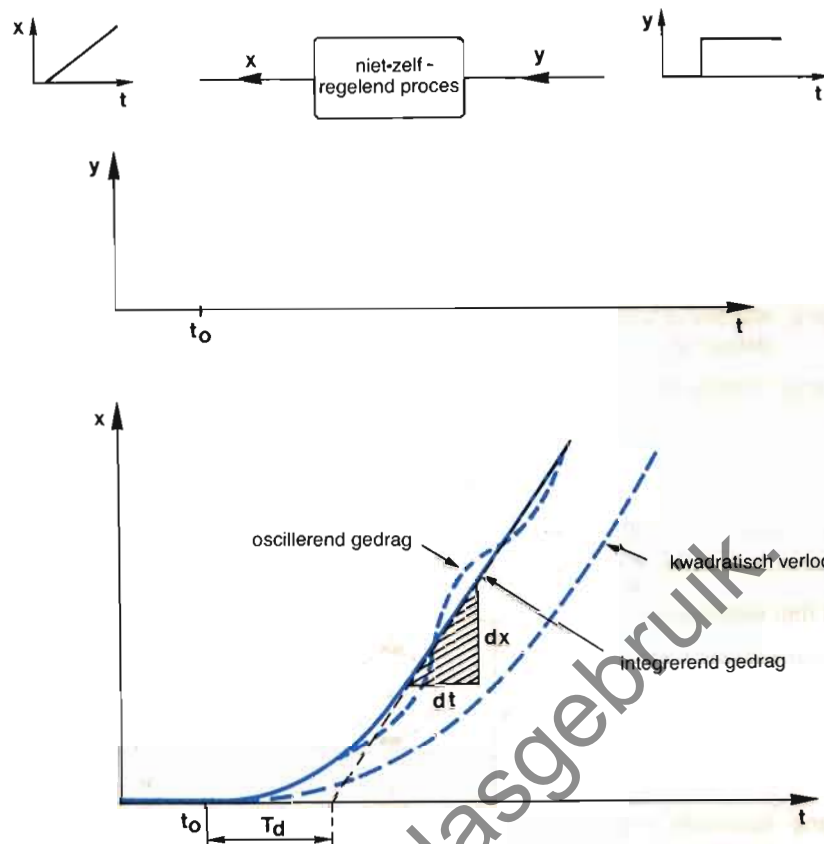


Fig. 5.21 Stapresponsie van een niet-zelfregelend proces

Een proces is niet-zelfregelend als na een stapinput de uitgang of procesuitput blijft stijgen en dus niet langzaam naar een verzadigingswaarde streeft.

In fig. 5.21 worden twee mogelijke verlopen getoond:

- de uitgang x neemt overwegend lineair toe in functie van de tijd en men spreekt van een integrerend gedrag;
- de uitgang x neemt kwadratisch toe in functie van de tijd; men noemt dit ook een dubbel integrerend gedrag.

Ook hier zijn uitsluitingen of oscillaties mogelijk.

Buiten de snelheid waarmee x verandert ($\frac{dx}{dt}$) is ook de dode tijd T_d van belang.

Typische niet-zelfregelende processen zijn:

1. vloeistofniveau in een opslagtank, geregeld door een kraan in de toevoerlijn, terwijl in de afvoer het debiet constant blijft door een pomp;
2. volgsysteem met elektrische aandrijfmotor;
3. volgsysteem met hydraulische aandrijving;
4. neutronenfluxregelingen in kernreactoren;
5. koers- en positiebepalingen van vliegtuigen, schepen, raketten.

Omdat niet-zelfregelende processen, bij verstellen van y , niet vanzelf naar een nieuwe evenwichtswaarde toestreven, is de proceswaarde in de gesloten kring moeilijker constant te houden dan in zelfregelende processen. De meest voorkomende processen in de nijverheid zijn van zelfregelende aard van eerste-, tweede- en hogere-orde.

Voorbeelden van niet-zelfregelende processen

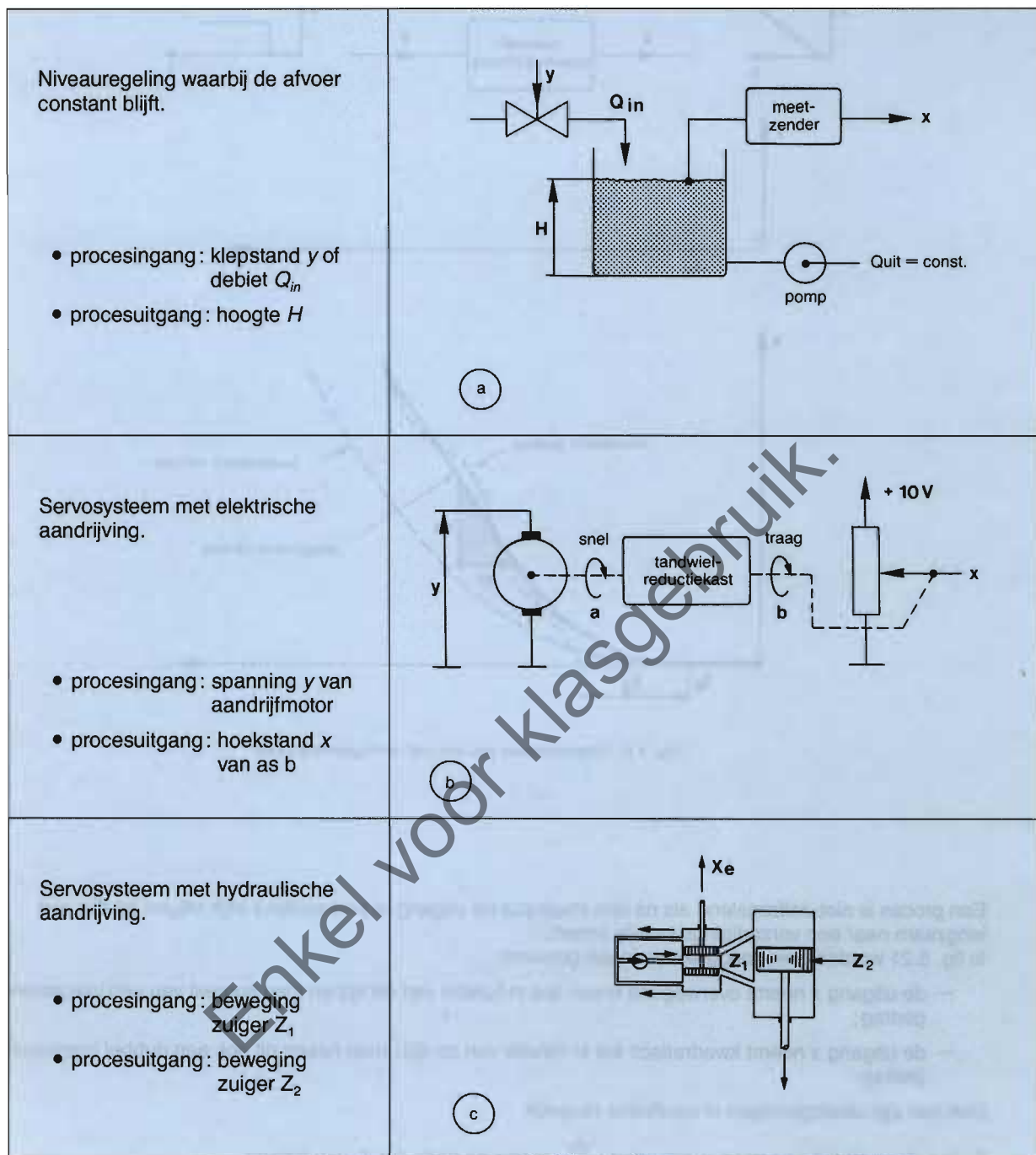


Fig. 5.22 Niet-zelfregelende processen

13. Regelbaarheid van processen

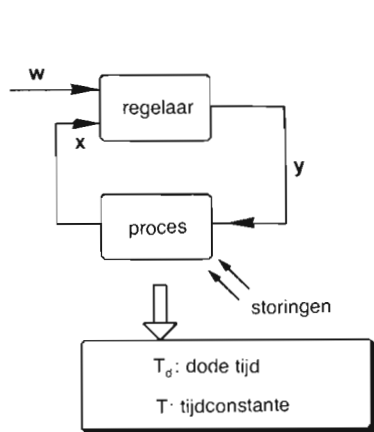


Fig. 5.25 Invloed van storingen op het proces

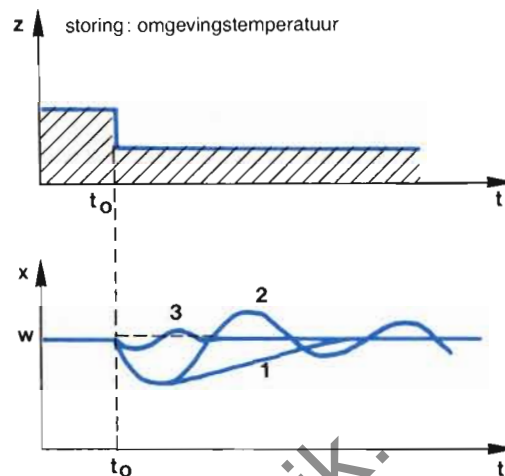


Fig. 5.26 Mogelijke stapresponsies van een proces

De regelaar moet de gemeten waarden x gelijk houden aan de gewenste waarde w , ook als storingen in fig. 5.25 de x -waarde doen afwijken van w . In een temperatuurregeling kan zulke storing bv. een daling zijn van de omgevingstemperatuur. Hierdoor gaat de temperatuur in het proces dalen en moet de regelaar deze daling zo goed mogelijk compenseren.

Als x in fig. 5.26 volgens curve 1 terug naar w geregeld wordt, dan is dit veel te traag. Gebeurt dit volgens curve 2, dan is de uitregeling veel te oscillerend. De regeling is niet stabiel genoeg en dus niet goed. Een goede uitregeling zou deze volgens curve 3 zijn. Dan spreekt men van een optimaal afgestelde regelkring. Bereikt men het resultaat van curve 3, dan is het proces goed regelbaar. Een verkeerd instellen van de regelaar kan foutieve reacties van de hele regelkring, regelaar en proces veroorzaken. Ook het proces zelf kan een ongunstige invloed hebben.

Nu zijn er processen waarbij het mogelijk is een optimale uitregeling in te stellen. De optimale regelbaarheid van processen is namelijk afhankelijk van de verhouding van dode tijd tot tijdconstante. Hierbij gelden de volgende algemene regels:

1. Processen met zelfregeling zijn gemakkelijker te regelen dan processen zonder zelfregeling.
2. Hoe groter de dode tijd (equivalente dode tijd) is, des te langer duurt het tot de instelwaarde y in het proces zijn volledige invloed uitwerkt voor de correctie van de afwijking, dus des te groter wordt de regelafwijking.
3. Hoe kleiner de tijdconstante T t.o.v. de dode tijd T_d , des te sneller reageert het proces op een storing zodat gedurende de relatief lange dode tijd zich een grote afwijking kan vormen.

Uit de praktijk volgen deze vuistregels:

$$\begin{aligned} \frac{T}{T_d} &\geq 10: && \text{goed regelbaar;} \\ &\approx 6: && \text{matig regelbaar;} \\ &\leq 3: && \text{moeilijk regelbaar.} \end{aligned}$$

14. Aanpassen van regelaar aan proces

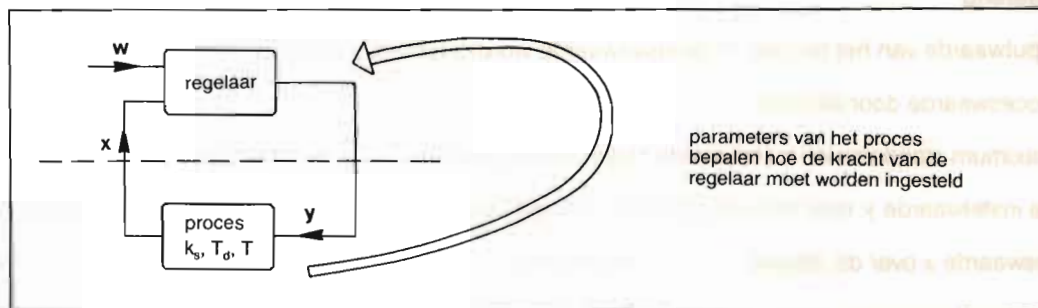


Fig. 5.27 Parameters van proces bepalen de regelaar

Opdat de gesloten regelkring op optimale wijze de proceswaarde x gelijk houdt aan de gewenste waarde w moet de regelaar aangepast worden aan het karakter van het proces, zoals fig. 5.27 weergeeft.

Processen die snel reageren zullen andere eisen stellen aan de regelaar dan processen die traag reageren.

Daarom is het belangrijk eerst het gedrag van processen te bestuderen. In de meeste boeken over regeltechniek zullen daarom de eerste hoofdstukken steeds handelen over het proces.

De aard van het proces wordt vooral bepaald door drie parameters:

- procesversterking k_s ;
- dode tijd T_d ;
- tijdconstante T .

Op gelijkaardige manier worden bij de regelaars parameters bepaald die het karakter van de regelaar vertegenwoordigen.

De parameters van de regelaar moeten dan ingesteld worden in functie van de parameters van het proces om een optimale regeling in de gesloten kring te verkrijgen.

In het volgende gedeelte van de cursus zullen we eerst de verschillende typen regelaars met hun parameters bespreken.

Zoals bij de procesbespreking wordt de regelaar onderzocht in open kring.

Pas daarna zijn we in staat de gedragingen van de gesloten kring te bestuderen.

Vooraleer we in blok 7 de continu-regelaar in open kring aanpakken gaan we eerst aan/uit-regelkringen bespreken. Als geen al te strenge eisen gesteld worden bieden deze aan/uit-regelaars een bevredigende oplossing.

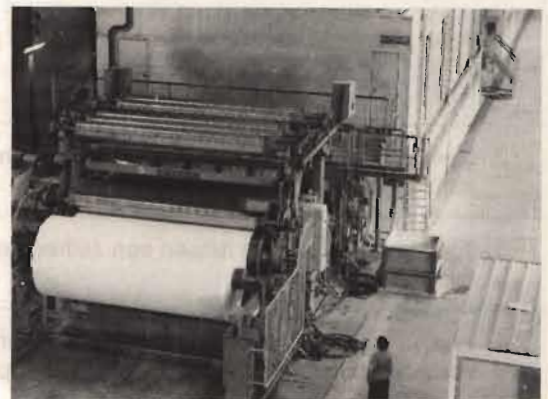


Fig. 5.28 Regelaar in controlekamer en het proces in de bedrijfsruimte vormen gesloten regelkring

15. Opdrachten

1. Invuloefening

- De inputwaarde van het proces, of de instelwaarde wordt voorgesteld door: (lettervoorstelling), de proceswaarde door de letter:
- De maximum stand van de instelwaarde stellen we voor door: (lettersymbool) of in % :
- Als de instelwaarde y , over de hele afstand verandert van 0 tot y_h of van 0 tot 100%, dan verandert de proceswaarde x over de afstand: (lettersymbool), hetgeen het van proces wordt genoemd.
- In een gestandaardiseerd proces komt de instelwaarde Y_h of 100% overeen met volt of mA. Een zorgt ervoor dat deze standaardwaarde 10 volt, (of 20 mA) omgezet wordt in maximum vermogeninput in het proces.
- Als een verandering dy in het proces een verandering van dx veroorzaakt, dan is de statische versterking van het proces: $k_s = \dots\dots\dots$ en betrokken over hele meetbereik wordt dit: $k_s = \dots\dots\dots$
- In een gestandaardiseerd proces zorgt een ervoor dat het meetbereik van het proces omgezet wordt naar een standaardsignaal volt of mA.
- Is het proces juist gestandaardiseerd, dan is de versterking: $k_s = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$. Men kan ook zeggen in dat geval: 100% verandering van y veroorzaken % verandering van x . Als de procesversterking 0,8 is, dan zal 10% verstelling van y % verandering van x veroorzaken, of 1 volt verstelling van y veroorzaakt volt verandering van x .
- Gegeven een instelwaarde $y_h = 3000$ watt. Als door het verstellen van de instelwaarde van y tot 100% de proceswaarde verandert van 20°C tot 100°C , dan is de statische versterking uitgedrukt in zijn fysische grootheden: $k_s = \dots\dots\dots$ (eenheden vermelden)
- Bij een zelfregelend proces, zal na verstellen van de y -waarde, de proceswaarde x steeds naar een nieuwe waarde uitlopen; bij een niet-zelfregelend proces zal de proceswaarde blijven
- De traagheid waarmee een zelfregelend proces reageert, wordt uitgedrukt door de en de

2. Geef de statische karakteristiek van een proces. Definieer en duid de volgende grootheden aan in de karakteristiek: y_h , X_M en k_s .
3. Toon het verschil aan tussen een zelfregelend proces en een niet-zelfregelend proces. Gebruik hiervoor twee voorbeelden.
4. Wat verstaat men onder: "dode tijd"? Waardoor wordt een dode tijd veroorzaakt, en waar leest men de dode tijd af in het stapantwoord of stapresponsie?
5. Teken het stapantwoord van een zelfregelend eerste-orde-proces. Geef duidelijk aan hoe men op deze karakteristiek de volgende grootheden kan bepalen: dode tijd, tijdconstante en statische versterking.

6. Teken het stapantwoord van een zelfregelend tweede-orde-proces.
Geef duidelijk aan hoe men op deze karakteristiek de volgende grootheden kan bepalen: dode tijd, tijdconstante en statische versterking.
7. Noem voorbeelden van de volgende processoorten (enkel vernoemen):
- Zelfregelend, nulde-orde:
 - Zelfregelend, eerste-orde:
 - Zelfregelend, tweede- en hogere-orde:
 - Niet-zelfregelende processen:
8. Gegeven een bestaande installatie regelaar-proces. We hebben toegang tot de x en y -waarde.
Welke procedure kan gevolgd worden om op een praktische wijze de stapresponsie van het proces op te tekenen.
Vermeld ook enkele bijzonderheden die men niet vergeten mag!
9. In verband met de regelbaarheid van processen:
- Wat verstaat men onder een optimaal afgestelde regelkring?
 - Hoe is de regelbaarheid van zelfregelende en niet-zelfregelende processen.
 - Wat is de invloed van dode tijd en tijdconstante op de regelbaarheid van een proces.
 - Welke vuistregels kunnen gevolgd worden?

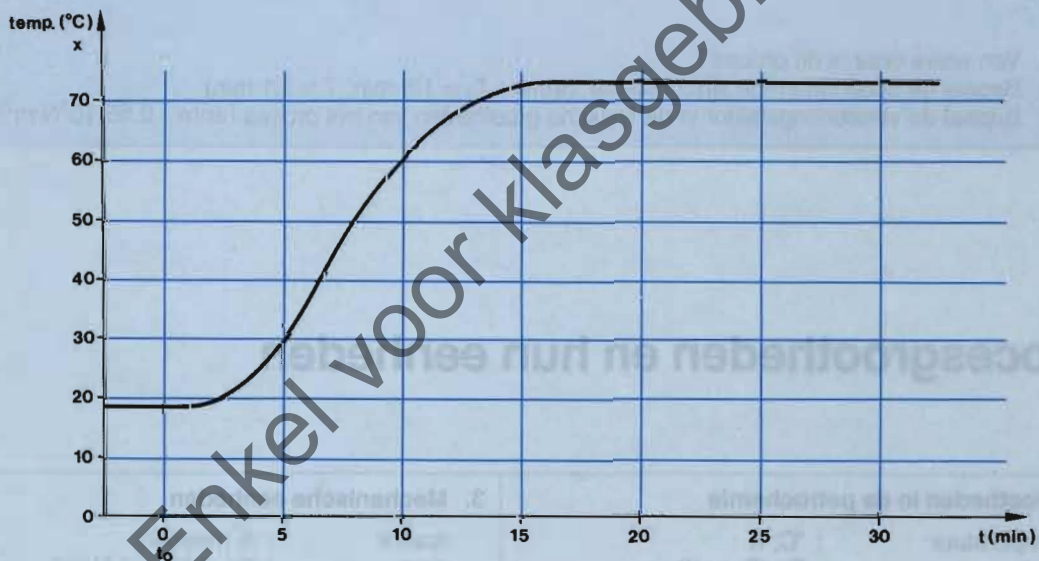


Fig. 5.29

10. De grafiek van fig. 5.29 is getekend na een stapinput van 0-2000 W. De stap trad op in het tijdstip t_0 .
Bepaal de dode tijd, de tijdconstante, de versterkingsfactor in de fysische grootheden van het proces.
(Antw.: $T_d \approx 3,75$ min. $T \approx 7$ min. $k_s = 0,027^\circ\text{C}/\text{watt}$)
11. Als in opgave 10, de variatie 0-2000 watt overeenkomt met 50% klepinstelling, en als het totale meetbereik X_m of 100% van de proceswaarde overeenkomt met een temperatuurverandering van 80°C , hoe groot is dan de versterking k_s in %/%. (of $k_s =$ onbenoemd)
(Antw.: $k_s = 1,35 \text{ \%}/\%$)
12. Een spanning van 220 volt wordt plots op een motor geschakeld. Het toerental neemt toe volgens de volgende tabel:
- | tijd in sec | 0 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
|--------------------------|---|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| n in min^{-1} | 0 | 190 | 390 | 700 | 950 | 1110 | 1185 | 1220 | 1235 | 1240 | 1240 |
- Bepaal de dode tijd en de tijdconstante. Van welke orde is dit proces?
(antw.: $T_d \approx 0$, $T \approx 6,5$ min)

11. In een drukketel wordt het toegevoerd vermogen over een afstand van 10 kW veranderd. De druk neemt toe volgens de curve van fig. 5.30

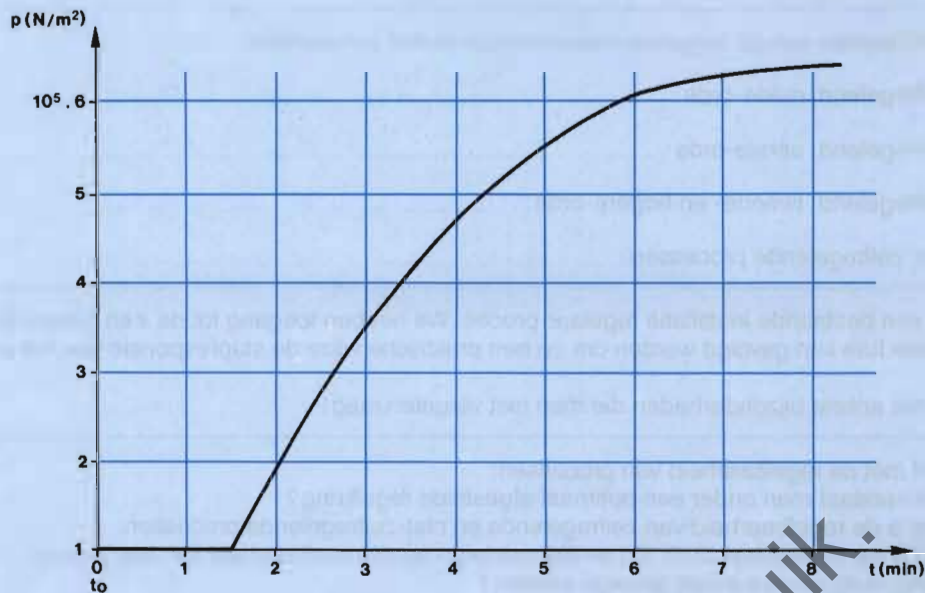


Fig. 5.30

- Van welke orde is dit proces?
- Bepaal de dode tijd en de tijdconstante. (antw.: $T_d = 1,5$ min, $T \approx 3,1$ min)
- Bepaal de versterkingsfactor in de fysische grootheden van het proces. (antw.: $0,55 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2/\text{kWatt}$)

16. Procesgrootheden en hun eenheden

1. Grootheden in de petrochemie temperatuur : °C, K druk : Pa (Pascal) $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ hoeveelheid : l (liter) m^3, kg, ton debiet : l/h; m^3/h; kg/h; ton/h mengverhouding : % niveau : m (meter) ionenconcentratie : pH gasanalyse : vol % volumeprocent; ppM: parts per million absolute vochtigheid : g/m^3 relatieve vochtigheid : % warmtehoeveelheid : J (joule); $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ joule}$	3. Mechanische eenheden kracht : N (newton) druk : Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ draaimoment : Nm snelheid : m/sec toerental : Hz; min^{-1} hoogte, stand : m toestand : ° (graden)
2. Licht lichtstroom : lm (lumen) verlichtingssterkte : lx (lux) luminantie : cd/m^2 golflengte : nm; $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$	4. Elektrische eenheden spanning : V (volt) stroom : A (ampère) vermogen : W (watt) fasehoek : ° (graden) frequentie : Hz (hertz) versterking : onbenoemd 5. Koersregelingen snelheid : m/sec; km/h versnelling : m/sec^2 koers : ° (graden) hoogte : m