

II Enige systeemtechnische beschouwingen in de regeltechniek

1. Inleiding

De regeltechniek speelt in de proces-industrie een zekere rol binnen het ruimere kader van instrumentatieproblemen, waarvan ook de beveiliging, alarmering en andere vormen van procesbeheersing deel uitmaken.

Het instrumenteren van een regelkring betekent echter impliciet het maken van een regeltechnisch ontwerp, en hierbij dient naast het doen van een verantwoorde keuze voor instrumentatie ook aandacht besteed te worden aan het dynamisch

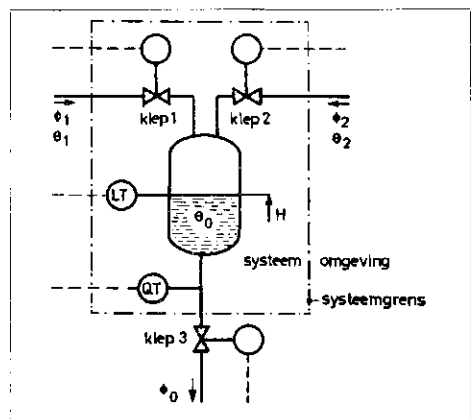


IR. O. H. BOSGRA
Laboratorium voor Werktuig-
kundige Meet- en Regeltechniek
TH Delft

gedrag van het te regelen proces. Met 'dynamisch gedrag' wordt hier bedoeld de wijze waarop de procesvariabelen als functie van de tijd onderling samenhangen. Beschouwingen over dit dynamisch gedrag hebben noodgedwongen een enigszins abstrakt, wiskundig karakter. Dit is onvermijdelijk; het is bijv. vrijwel onmogelijk om inzicht in een regeltechnisch belangrijk fenomeen zoals stabiliteit te verkrijgen, zonder hierbij wiskundige begrippen te hanteren.

De abstraktie welke in de regeltechniek gehanteerd wordt, leidt tot beschouwingen over systemen en signalen. Elke variabele welke in het proces een rol speelt kan als functie van de tijd in het probleem bekeken worden en wordt dan met het begrip signaal aangeduid. De relaties tussen verschillende signalen worden beschreven door wiskundige betrekkingen, en het geheel van signalen en de relaties hiertussen noemt men een systeem. Een systeem beschrijft dus dat deel van het

Afb. 1 - Mengproces, door een systeemgrens afgescheiden van zijn omgeving.



te regelen proces, dat men in de probleemstelling wenst te betrekken. Men bepaalt dit, door een denkbeeldige systeemgrens aan te brengen; hiermee ligt eenduidig vast, welk procesdeel beschouwd wordt en alles wat daar niet toe behoort vormt de 'omgeving'. Van deze omgeving wordt alleen nagegaan, via welke signalen het systeem beïnvloed wordt. Deze signalen worden ingangsvariabelen genoemd, indien het mogelijk is om hiervoor een vrije keuze te maken. Indien de omgeving op het systeem inwerkt op een niet-beïnvloedbare wijze, spreekt men van storingen. Omgekeerd kunnen gemeten procesvariabelen vanuit het systeem aan zijn omgeving ter beschikking worden gesteld; dit noemen we uitgangsvariabelen.

In afb. 1 is een deel van een eenvoudig mengproces weergegeven met een systeemgrens. Door na te gaan waar de systeemgrens de massastromen snijdt, kunnen we nagaan welke variabelen in elk geval als in- of uitgangsvariabele of als storing opgevat kunnen worden. Een keuze hiervoor is nog afhankelijk van het doel dat gesteld wordt. Als bijv. gewenst wordt dat het niveau H en de kwaliteit Φ_0 geregeld worden, dan zijn de uitgangen van de betreffende opnemers uitgangssignalen. Met de aangegeven systeemgrens kan ingegrepen worden op beide kleppen 1 en 2; stuursignalen naar deze kleppen zijn dan ingangsvariabelen.

Onder de aanname dat drukvariaties over de kleppen geen rol spelen, liggen de massastromen Φ_1 en Φ_2 daarmee ook vast. De kwaliteiten van beide ingaande stromen, Θ_1 en Θ_2 , kunnen echter wel variëren en spelen dan een rol als storing. Merk echter op, dat klep 3 buiten de gekozen systeemgrens ligt; er wordt dan van uitgegaan, dat klep 3 de functie heeft om de massastroom naar een volgend procesdeel te beïnvloeden. Deze massastroom Θ_0 wordt aan het mengvat onttrokken (passeert de systeemgrens) zonder dat daarop binnen de systeemgrens invloed kan worden uitgeoefend, en dient dus als storing te worden beschouwd.

Het zou natuurlijk mogelijk zijn, om klep 3 en eventueel andere hierop volgende delen van het proces binnen de systeemgrens te brengen. Dan zou een uitgebreider regelprobleem in zijn geheel bekeken kunnen worden. Dit kan gewenst zijn, hoewel de hier geschetste systeembeschouwing het mogelijk maakt om afzonderlijke deelproblemen eerst gescheiden te bekijken, waarna het altijd mogelijk is om verschillende (deel)systemen samen te voegen. Het wordt dan duidelijk, dat de begrippen storing en in- en uitgangsvariabele relatief zijn; de uitgangsvariabele van het ene deelsysteem kan als storing inwerken op een ander deelsysteem.

De geschetste gedachtengang kan gezien worden als een eerste stap in het opstellen van een model van het beschouwde proces. Het onderkennen van de rol van de verschillende procesvariabelen en van het fysisch mechanisme volgens welke het proces verloopt, vormt hiervoor de basis. Er dient daarbij strikt geredeneerd te worden van oorzaak naar gevolg: waarop kan ingegrepen worden, en wat volgt daaruit? Met behulp van fysische behoudswetten en betrekkingen voor de stroming door kleppen en andere componenten, is het dan mogelijk om een theoretisch model van het dynamisch gedrag van het beschouwde procesdeel op te stellen. Meestal zijn hierbij vereenvoudigende aannamen nodig, om een model van voldoende eenvoud te krijgen.

Vaak is het ook voldoende, om een elementair inzicht te hebben in het systeemgedrag. Zodra bijv. het inzicht is verkregen, dat een systeem beschreven kan worden door een eerste-orde differentiaalvergelijking en een voortplantingstijd, waarvan de parameters (tijdconstanten en versterkingsfactor) ruwweg bekend zijn, dan kunnen de mogelijkheden van terugkoppeling op grond van deze beschrijving bekeken worden.

Verschiedende procesvormen kunnen leiden tot hetzelfde principiële dynamische gedrag; een systeemtechnische beschrijving maakt het mogelijk om de analogieën hiertussen te herkennen. In de hierna volgende hoofdstukken zullen een aantal elementaire procesmodellen nader geanalyseerd worden en zal ingegaan worden op de mogelijkheden van terugkoppeling. Het inzicht in de regeltechnische eigenschappen van dergelijke elementaire procesmodellen en het fysisch inzicht in de mechanismen van een specifiek proces maken het veelal reeds mogelijk om een verantwoord ontwerp van regeling op te zetten. Een verdergaande uiteenzetting van deze gedachtengang is te vinden in [1].

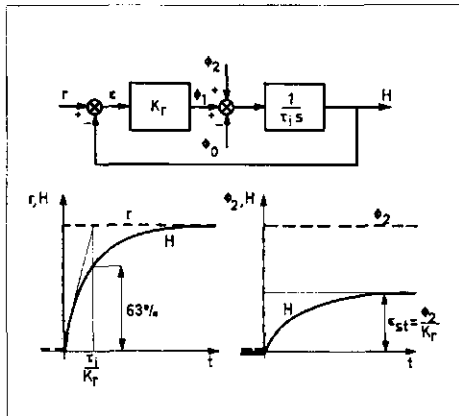
2. Enkele eenvoudige lineaire systemen

Indien op het mengproces van afb. 1 een massabalans toegepast wordt, ontstaat direct een uitdrukking voor het niveau H als functie van de drie massastromen:

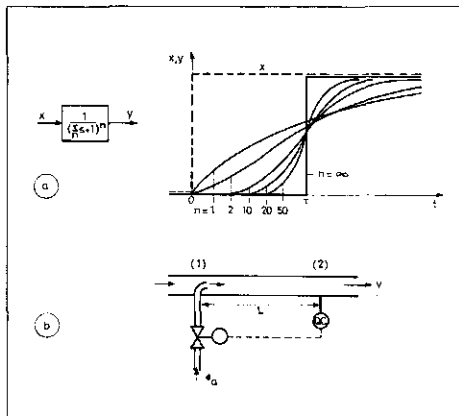
$$H(t) = H(0) + \frac{1}{\rho A} \int_0^t \{\Phi_1(\tau) + \Phi_2(\tau) - \Phi_0(\tau)\} d\tau$$

waarin ρ de dichtheid van de vloeistof en A het vloeistofoppervlak aangeeft. Merk op, dat het vat een integrator voorstelt met ingangssignaal

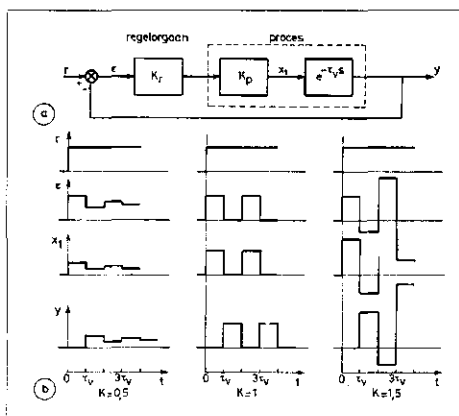
$\Phi_1(t) + \Phi_2(t) - \Phi_0(t)$
Na een blijvende verstoring van één van deze variabelen zal $H(t)$ alleen dan be-



Afb. 2 - Karakteristieke responsies van een eerste-orde systeem op sprongvormige verstoringen van de ingestelde waarde r en van de storing Φ_2 .



Afb. 3. a. Stapresponsies van n in serie geschakelde identieke eerste-orde systemen met tijdconstante τ/n . b. Kwaliteitsregeling van een mengproces als voorbeeld van een systeem met voortplantingstijd.



Afb. 4. a. Proportionele regeling van een systeem met voortplantingstijd. b. Regelgedrag bij verschillende waarden van de versterkingsfactor $K = K_r K_p$.

grensd blijven indien dit ingangssignaal op den duur naar nul gaat, zodat ontstaat $\Phi_1(t) + \Phi_2(t) - \Phi_0(t) = 0$.

Indien nu het niveau proportioneel gere-

geld wordt, door veranderingen in het niveau H om te zetten in evenredige veranderingen van de stand van de regelklep 1 en daardoor van de ingaande massastroom Φ_1 , ontstaat een regelkring zoals in afb. 2 is aangegeven. Φ_2 en Φ_0 zijn hierin storingen. K_r geeft hierin de proportionaliteitsfactor aan tussen niveauvariëaties en massastroomvariëaties; de integratietijdconstante is $\tau_i = \rho A$. Voor het regelgedrag van het teruggekoppelde systeem ontstaat:

$$\frac{H}{r} = \frac{K_r \cdot \frac{1}{\tau_i s}}{1 + K_r \cdot \frac{1}{\tau_i s}} = \frac{1}{\frac{\tau_i}{K_r} s + 1}$$

De variabele s is hierin de differentiaaloperator. Een proportioneel teruggekoppelde integrator gedraagt zich dus volgens een eerste-orde differentiaalvergelijking (eerste-orde systeem) met statische versterking 1 en tijdconstante τ_i/K_r . Afb. 2 geeft de voor een eerste-orde systeem karakteristieke responsie van H op een stapvormige verstoring van de ingestelde waarde r.

Het stoorgedrag voor variaties in Φ_2 wordt gegeven door

$$\frac{H}{\Phi_2} = \frac{1}{\tau_i s} = \frac{1}{K_r} \frac{1}{\frac{\tau_i}{K_r} s + 1}$$

Opmerkelijk is dat een blijvende verstoring in Φ_2 ook een blijvende afwijking van het niveau H veroorzaakt.

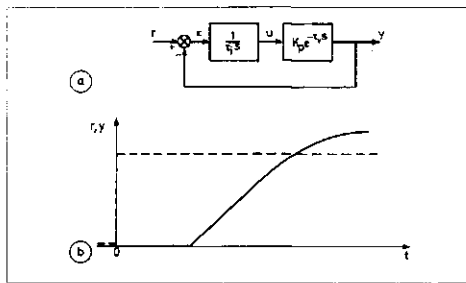
Indien een aantal eerste-orde systemen in serie geplaatst worden, op zodanige wijze dat een tijdconstante τ verdeeld wordt over n deelsystemen, ontstaat de overbrengingsverhouding

$$\frac{Y}{X} = \frac{1}{\left(\frac{\tau}{n} s + 1\right)^n}$$

Stapresponsies voor een dergelijk systeem zijn voor verschillende n gegeven in afb. 3 (a). Interessant is om na te gaan wat er gebeurt voor $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Y}{X} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(\frac{\tau}{n} s + 1\right)^n} = e^{-\tau s}$$

Dit limietgeval geeft een zuivere voortplantingstijd aan: het ingangssignaal $x(t)$ komt onvervormd, maar in de tijd over τ vertraagd, in het uitgangssignaal $Y(t)$ terug. Voortplantingstijden komen veel voor in systemen met stromende media als signaal-

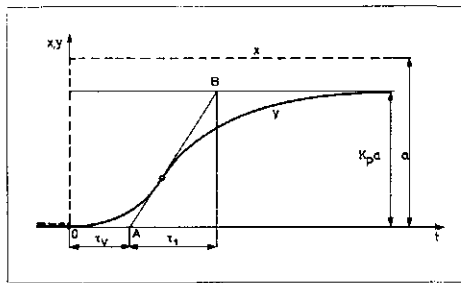


Afb. 5.
a. Integrerende regeling van een systeem met voortplantingstijd.
b. Responsie van de uitgangvariabele op een stap in de gewenste waarde voor $\tau_i = K_p \tau_v / 0,75$.

drager. In afb. 3(b) is een proces geschetst waarin aan een stromend medium continu een massa-stroom van een andere component wordt toegevoegd. Indien de mediumsnelheid V konstant is, bestaat tussen variaties in de concentratie ter plaatse van punt (2) en variaties in de toegevoegde massa-stroom Φ_a een verband, dat ongeveer beschreven zal kunnen worden door een proportionele factor en een voortplantingstijd $\tau = L/V$. Indien diffusieverschijnselen een belangrijke rol spelen, kan een model volgens afb. 3 (a) met $n > 10$ wellicht een betere beschrijving geven, maar een beschouwing gebaseerd op een zuivere voortplantingstijd levert reeds een goed inzicht op.

Proportionele terugkoppeling van een systeem met voortplantingstijd geeft slechte resultaten. Afb. 4 laat zien, dat slechts een geringe rondgaande versterkingsfactor $K = K_r K_p$ toegestaan is, om instabiliteit te voorkomen. Er blijft dan een aanzienlijke statische afwijking bestaan tussen variaties in gewenste waarde en variaties in uitgangssignaal. Een beter gedrag ontstaat bij gebruik van integrerende terugkoppeling (afb. 5).

Als de statische versterking van het proces de waarde K_p heeft, ontstaat een goede instelling van de integratietijd τ_i van de



Afb. 7 - Benadering van een stapresponsie door de parameters K_p , τ_v en τ_i .

regelaar als voldaan wordt aan de volgende relatie voor de rondgaande overbrengingsverhouding $\overset{0}{H}$:

$$\overset{0}{H} = \frac{K_p}{\tau_i s} e^{-\tau_v s} \approx 0,75 \frac{e^{-\tau_v s}}{\tau_v s}$$

$$\text{dus } \tau_i = \frac{K_p \tau_v}{0,75}$$

Het regelgedrag vertoont dan een stapresponsie met een vorm zoals in afb. 5 is getekend.

Bovenstaande voorbeelden kunnen generaliseerd worden. Regelaars met proportionele en integrerende werking worden zeer veel toegepast in de proces-industrie en zijn in de handel verkrijgbaar in bijv. pneumatische of elektronische uitvoering. Ook differentiërende werking kan veelal toegevoegd worden, maar zal hier buiten beschouwing worden gelaten.

Bij toepassing van een dergelijke proportionele- en integrerend (PI) werkende regelaar dient een instelling bepaald te worden voor de versterkingsfactor en integratietijdconstante, zodanig dat in samenhang met het te regelen proces een aanvaardbaar gedrag ontstaat. Indien het proces geen integrator bevat, zal bij proportionele regeling in statische toestand een blijvende afwijking kunnen ontstaan tussen gewenste en geregelde variabele.

Toevoeging van integrerende werking brengt een dergelijke statische afwijking terug tot nul. De P- en I-werking dient onderling zo ingesteld te worden, dat enerzijds bij een verstelling van de gewenste waarde de geregelde grootte zo snel mogelijk volgt; anderzijds dient de nieuwe evenwichtssituatie slechts via een gedempt oscillerend verloop bereikt te worden, zodat een gering doorschot (overshoot) ontstaat. Afb. 6 geeft een toelichting op deze punten.

Een verantwoorde methodiek om een goede regelaarinstelling te vinden maakt gebruik van grafische voorstellingen van de complexe overbrengingsverhoudingen van het proces en van de regelaar. Dergelijke frekwentiedomeinmethoden zijn beschreven in [1] en zullen hier niet behandeld worden. In veel gevallen kan echter gebruik gemaakt worden van eenvoudige praktijkinstelregels welke het karakter hebben van een vuistregel. Bekend zijn de klassieke regels van Ziegler en Nichols, welke toegepast kunnen worden bij processen waarvan het dynamisch gedrag gekarakteriseerd kan worden door een verloop van de stapresponsie zoals geschetst in afb. 7. Door een raaklijn te trekken in het buigpunt, kan een dergelijke stapresponsie worden gekarakteriseerd door de tijdconstanten τ_v en τ_i en de versterkingsfactor K_p . Dit kan opgevat worden als een benadering van het ongeregelde procesgedrag door een model met overbrengingsverhouding

$$H_p = K_p \frac{e^{-\tau_v s}}{(\tau_i s + 1)}$$

Bij gebruik van een PI-regelaar met overbrengingsverhouding

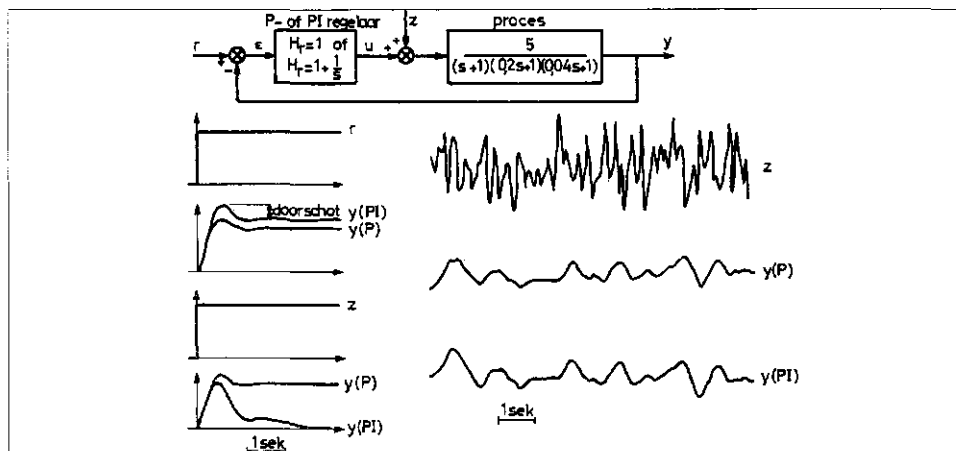
$$H_r = K_r \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

bevelen Ziegler en Nichols de volgende instelling voor K_r en τ_i aan:

P-regeling: $K_r K_p = \tau_i / \tau_v$

PI-regeling: $K_r K_p = 0,9 \tau_i / \tau_v, \tau_i = 3,3 \tau_v$

Afb. 6 - Het principiële gedrag van een P- en PI-geregeld systeem.



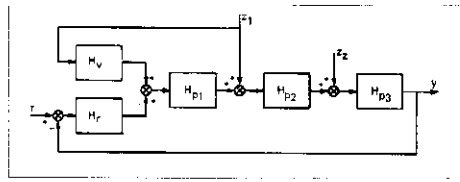
Een dergelijke instelling zal niet de best mogelijke zijn, maar geeft vaak zinvolle richtwaarden welke eventueel experimenteel nader aangepast kunnen worden. Vaak kan in de praktijk een stapresponsie, zoals in afb. 7 geschetst is, op eenvoudige wijze experimenteel bepaald worden door in ongeregelde toestand de ingangsvariabele stapvorming te verstellen. Een uitgebreide theoretische analyse van het dynamisch procesgedrag kan dan achterwege blijven, hoewel een elementair inzicht in de procesdynamika altijd gewenst is om het regelgedrag in de praktijk te kunnen evalueren. Opgemerkt dient te worden, dat in het

bovenstaande geen aandacht is besteed aan het karakter van de verstoringen, welke op het proces inwerken. Het ontwerpen van de terugkoppeling op grond van een verantwoord regel- en stoorgedrag leidt tot veel uitgebreidere beschouwingen waarbij een statistische benaderingswijze belangrijk kan zijn. Zie hiervoor bijv. [2].

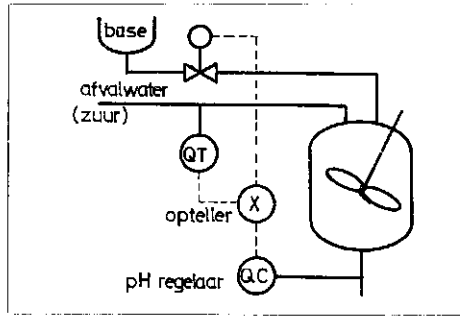
3. Samengestelde regelstructuren

Indien een goed inzicht bestaat in het functioneren van een proces kan in sommige gevallen een zinvol gebruik gemaakt worden van meer dan een gemeten signaal voor het regelen van een enkele variabele. Als bijv. bekend is hoe een belangrijke verstoring op een geregelde variabele inwerkt, en indien deze storing gemeten kan worden, is het soms mogelijk om de storing goeddeels te compenseren door voorwaartskoppeling. Het principe is aangegeven in afb. 8. Het proces is opgedeeld gedacht in drie delen H_{p1} , H_{p2} en H_{p3} ; er tussenin grijpen storingen aan. De hoofdstoring z_1 wordt snel weggeregeld door een keuze van de voorwaartskoppeling H_v , welke zo goed mogelijk voldoet aan $H_v H_{p1} = -1$. Een eventueel restant van z_1 en de andere storing z_2 worden via de terugkoppeling H_r weggeregeld. Merk op dat hierdoor het effect van z_1 weggeregeld kan worden, nog voordat de geregelde variabele beïnvloed is. Een voorbeeld van een dergelijke storingscompensatieschakeling geeft afb. 9. Kwaliteitsvariaties in het afvalwater worden gemeten en in de juiste verhouding door voortwaartskoppeling gekompenseerd. Hierbij wordt verondersteld dat de massaastroom te behandelen afvalwater min of meer constant is. Indien deze massaastroom wel belangrijk varieert, kan in principe ook deze variabele gemeten worden en kan zijn invloed door voortwaartskoppeling grotendeels geëlimineerd worden.

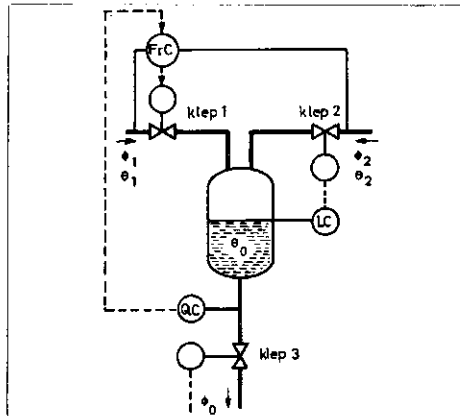
In de procesregeling worden verschillende andere samengestelde regelstructuren gebruikt, zoals kaskaderegeling, verhoudingsregeling en combinaties hiervan. Hierop wordt in [1] en [3] nader ingegaan. Een belangrijk aspect zal hier genoemd worden: het gedrag van twee (of meer) regelkringen welke elkaar beïnvloeden door een koppeling via het proces. Beschouw daartoe het mengproces van afb. 1. Veronderstel dat zowel het niveau H als de uitgangskwaliteit θ_0 geregeld dienen te worden. Door in te grijpen op een van beide kleppen worden beide variabelen H en θ_0 beïnvloed. Indien nu bijv. het niveau met klep 1 geregeld wordt en de kwaliteit θ_0 met klep 2, ontstaan niet alleen twee teruggekoppelde kringen, maar is ook een derde kring aan te wijzen. Ga daartoe uit van een denkbeeldige niveaustoring;



Afb. 8 - Storingscompensatieschakeling.



Afb. 9 - Storingscompensatie toegepast bij een proces voor neutralisatie van afvalwater.



Afb. 10 - Ontkoppelde regeling van een mengproces.

via de niveauregelaar wordt klep 1 versteld, deze beïnvloed θ_0 , en de kwaliteitsregelaar zal klep 2 verstellen. Deze heeft weer invloed op het niveau, zodat de derde kring gesloten is. Het is daardoor denkbaar, dat beide regelkringen afzonderlijk goed werken, maar dat hun gezamenlijke aanwezigheid een instabiele derde kring tot gevolg heeft. Dit kan leiden tot de noodzaak, om de versterking in de beide regelkringen belangrijk te verkleinen, zodat een minder goed regelgedrag ontstaat. Een dergelijke interactie tussen twee regelkringen kan echter beter weggewerkt worden, door de oorzaak hiervan weg te nemen en beide kringen te ontkoppelen. Dit is in afb. 10 uitgevoerd door de kwaliteitsregelkring niet meer te laten ingrijpen op een van beide massaastromen, maar op de verhouding tussen de beide massaastromen. Hiervoor wordt een verhoudingsregelaar gebruikt (FrC: flow ratio controller). Afwijkingen van het niveau kunnen nu gekorrigeerd worden door massaastroom-

variaties, zonder dat de verhouding tussen beide massaastromen belangrijk hoeft te variëren.

Het resultaat van de menging θ_0 zal hierbij niet of nauwelijks beïnvloed worden, zodat de niveauregeling van de kwaliteitsregeling ontkoppeld is. Het bovenstaande voorbeeld van een ontkoppelende regeling kan generaliseerd worden. Om in een specifiek geval de uitspraak te kunnen doen of koppeling mogelijk en wenselijk is, dient een uitgebreide analyse van het dynamisch gedrag van het proces gemaakt te worden. Uit deze analyse kan ook duidelijk worden, of eventueel van andere technieken voor meervoudig geregelde processen een goed gebruik gemaakt kan worden [4], [5].

4. Slotopmerkingen

De gedachtengang welke bij de toepassing van de regeltechniek gevolgd wordt, is gebaseerd op inzicht in de eigenschappen van dynamische systemen. Hierbij speelt met name een rol de vraag, hoe een dynamisch systeem zich gedraagt indien het via een regelaar wordt teruggekoppeld. Slechts enkele belangrijke aspecten zijn hier aan de orde gekomen. Wenst men een goed inzicht in de grondslagen van de regeltechniek te verkrijgen, dan is een verdere bestudering van relevante literatuur noodzakelijk. Enkele suggesties hiertoe zijn in de literatuurverwijzing opgenomen.

Literatuur

1. Cool, J. C., Schijff, F. J., Viersma, T. J. *Regeltechniek*. Agon Elsevier, Amsterdam 1972.
2. Grinten, P. M. E. M. van der, Lenoir, J. M. H. *Statistische procesbeheersing*. Het Spectrum, Utrecht 1973.
3. Grinten, P. M. E. M. van der. *Procesregelingen*. Het Spectrum, Utrecht 1970.
4. Takahashi, Y., Rabins, M. J., Auslander, D. M. *Control and dynamic systems*. Addison-Wesley Publ., Reading, Mass., 1970.
5. Rosenbrock, H. H. *Computer-aided control system design*. Academic Press, New York 1974.

