

## 2. Reglertekniska grunder

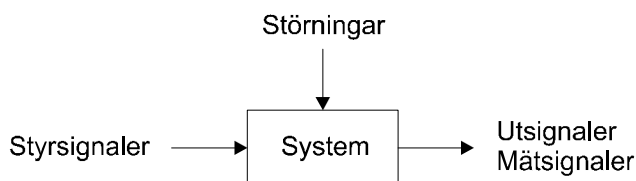
### 2.1 Signaler och system

Ett *system* växelverkar med sin omgivning via *insignaler*, som påverkar systemets beteende, och *utsignaler*, som beskriver dess beteende. Beroende på sammanhanget kan vi med ”signal” avse en *storhet* eller en *variabel* men ofta avser vi storleken eller *värdet* av en storhet. Med den senare tolkningen, dvs att en signal betecknar värdet av en storhet, kan vi säga att *utsignalerna beror av insignaler* till systemet. Signalbegreppet behandlas utförligare i avsnitt 2.3.

Om utsignalerna vid en viss tidpunkt endast beror på insignalernas värden vid samma tidpunkt är systemet *statiskt*. Detta betyder att utsignalerna reagerar ögonblickligen på förändringar i insignalerna så att de med en gång når sina nya, slutliga värden. Vanligare är dock att utsignalerna förändras gradvis. Detta betyder att utsignalerna i ett visst ögonblick även beror av tidigare insignaler och systemet sägs vara *dynamiskt*. Temperaturen i ett eluppvärmt hus är ett exempel på ett dynamiskt system; om värmeelementen slås av, förändras temperaturen inte omedelbart till ett nytt (konstant) värde, utan det tar en viss tid.

De insignaler som kan styras kallas *styrsignaler* och de utsignaler som kan observeras (mätas) kallas *mät-signaler*. Systemet påverkas även av *störningar* från omgivningen. Ibland är störningarna mätbara, men aldrig (definitions-mässigt) styrbara. I husuppvärmningsexemplet är temperaturen en mät-signal, uppvärmningseffekten styr-signal, och som störningar kan betraktas bl.a. utetemperatur och vindstyrkan.

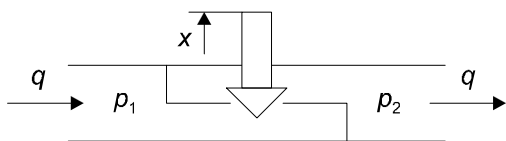
Ett allmänt system med tillhörande signaler kan åskådliggöras grafiskt med hjälp av ett *blockschema*, se figur 2.1.



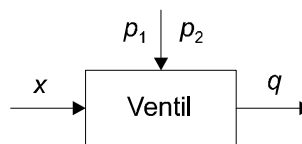
**Figur 2.1.** Blockschema för ett dynamiskt system.

#### ► Exempel 2.1. Blockschemabeskrivning av reglerventil.

Figur 2.2 illustrerar en reglerventil. Flödet  $q$  genom reglerventilen beror av ventilläget  $x$ , primärtrycket  $p_1$  och sekundärtrycket  $p_2$ . Den s.k. ventilkarakteristikan ger ett samband mellan dessa variabler, men detta samband gäller endast variablernas statiska (*stationära*) värden. I verkligheten beror flödet  $q$  av de övriga variablerna på ett dynamiskt sätt. Flödet  $q$  är då systemets utsignal, medan  $x$ ,  $p_1$  och  $p_2$  är dess insignaler. Av dessa kan  $x$  användas som styr-signal, medan  $p_1$  och  $p_2$  är störningar. Figur 2.3 visar ett blockschema för systemet. ◀



**Figur 2.2.** Principskiss av reglerventil.

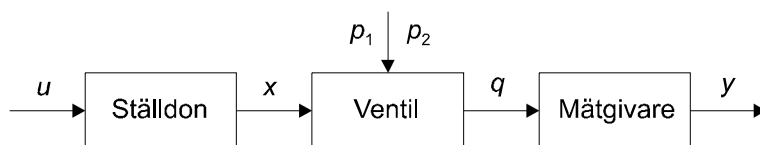


**Figur 2.3.** Blockschema för reglerventil.

## 2.2 Komponenter i ett enkelt reglersystem

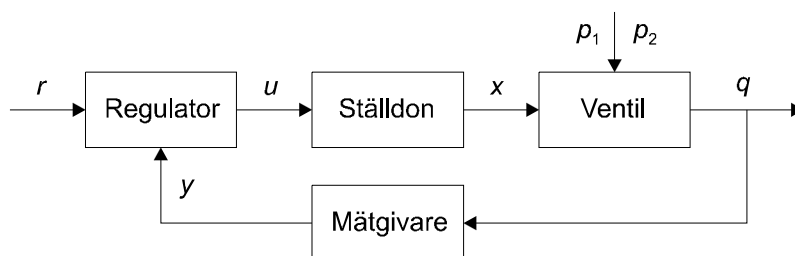
Ett *reglersystem* är sammansatt av flera delsystem. I ett komplett reglersystem för en industriell process är antalet delsystem vanligen mycket stort. Även en så enkel process som reglering av flöde med en reglerventil består av flera delsystem.

Reglerventilen är nämligen inte speciellt användbar utan vissa andra komponenter. I ett automatiskt reglersystem kan ventilläget  $x$  i praktiken inte direkt justeras av regulatorn. Därför måste reglerventilen förses med ett *ställdon* som tar emot en styrsignal  $u$  (elektrisk, pneumatisk eller hydraulisk) och omvandlar den till en kraft som påverkar ventilläget. Det fysiska flödet  $q$  är inte heller direkt användbart i reglersystemet. Det måste mätas med en *mätgivare* som ger en mätsignal  $y$  som kan relateras till  $q$ . Figur 2.4 visar sambandet mellan dessa delsystem och deras signaler.



**Figur 2.4.** Blockschema för systemet ställdon-ventil-flödesgivare.

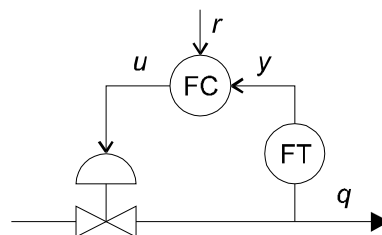
En regulator som reglerar flödet genom reglerventilen behöver som insignaler *mätsignalen*  $y$  och en *referenssignal*  $r$ , som är  $y$ :s *börvärde* eller *ledvärde*, dvs det önskade värdet på  $y$ . Regulatorns utsignal är *styrsignalen*  $u$ , som den bestämmer på basen av  $r$  och  $y$ ; vanligtvis är endast skillnaden mellan  $r$  och  $y$  av betydelse. Reglersystemets blockschema visas i figur 2.5.



**Figur 2.5.** Blockschema för reglering av flöde.

Hur detaljerat skall ett blockschema framställas? Det beror på vad som är ändamålsenligt. Vanligtvis sammanslås t.ex. reglerventilen och dess ställdon till ett delsystem, som har insignalen  $u$  som styrsignal. Eftersom det fortfarande är ventilläget som fysiskt påverkar flödet, säger man kanske i alla fall, något oegentligt, att man reglerar flödet genom att justera ventilläget  $x$ . Hela reglerkonfigurationen i figur 2.5 kan givetvis också betraktas som ett system. Detta system har referenssignalen  $r$  som styrsignal och flödet  $q$  som utsignal. I en typisk industriprocess existerar flera dylika flödesreglerkretsar. Vanligtvis är dock själva flödesregleringen inte det primära i processen, viktigare är förmodligen den verkan  $q$  har på resten av processen. Ofta underförstås därför sådana sekundära reglerkretsar och man säger kanske att man använder flödet  $q$  som en styrvariabel, trots att det i själva verket är referenssignalen  $r$ .

Figur 2.6 visar symboler för flödesreglering i ett processchema. I figuren står "FC" för flödesregulator (eng. flow controller) och "FT" för flödesgivare (eng. flow transmitter). Man kan också använda beteckningarna "FIC" och "FIT", där "I" anger att instrumentet är försett med "indikator" (analog eller digital visning av data, t.ex. mätdata). Andra vanliga beteckningar är "LC" för nivåregulator, "TC" för temperaturregulator, "PC" för tryckregulator, "QC" för koncentrationsregulator. Ett "I" som andra bokstav anger också här indikering. Beteckningarna för motsvarande mätgivare har som sista bokstav "T" i stället för "C".



**Figur 2.6.** Processchema för flödesreglering.

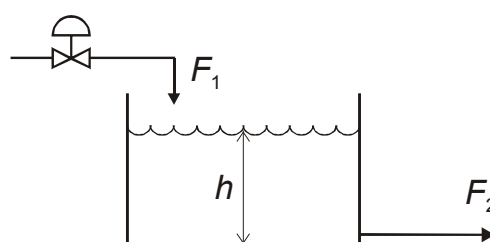
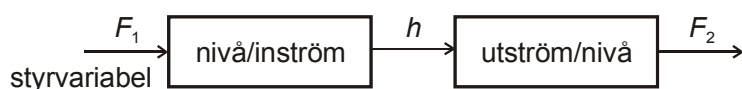
## 2.3 Från process- till blockschema

Det bör observeras att in- och utsignalerna i ett reglertekniskt blockschema inte är ekvivalenta med fysikaliska in- och utströmmar i ett flödesschema för processen. Insignalerna i ett reglertekniskt blockschema anger vilka storheter som påverkar systemets egenskaper medan utsignalerna ger information om dessa egenskaper. De reglertekniska in- och utsignalerna behöver således inte vara strömmar i egentlig mening, och även om de är det, behöver de inte sammanfalla med motsvarande fysikaliska strömmars riktning. Till exempel en fysikalisk utström kan mycket väl vara en reglerteknisk inström såsom illustreras i exempel 2.2. Utsignalerna i ett blockschema ger också en viss information om processens syfte, som inte direkt kan utläsas ur ett processchema. Vanligtvis framgår inte heller valet av styrsignaler och förekomsten av störningar entydigt ur processemat. Blockschemat ger m.a.o. reglerteknisk information utöver processemat.

### ► Exempel 2.2. Blockschema för tank med kontinuerlig genomströmning.

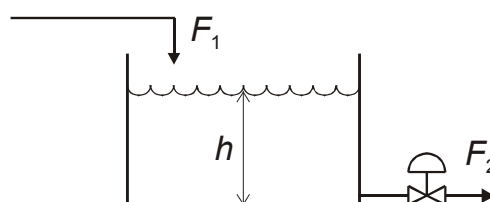
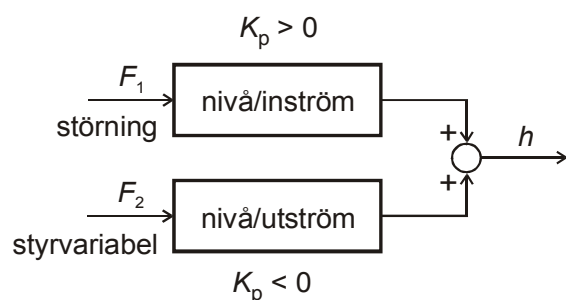
**Process A.** Vätskebehållare där vätskenivån  $h$  kan regleras med inströmmen  $F_1$ , medan utströmmen  $F_2$  beror av  $h$  (utströmning genom självtryck).

Blockschema:



**Process B.** Vätskebehållare där vätskenivån  $h$  kan regleras med utströmmen  $F_2$ , medan inströmmen  $F_1$  är en störvariabel.

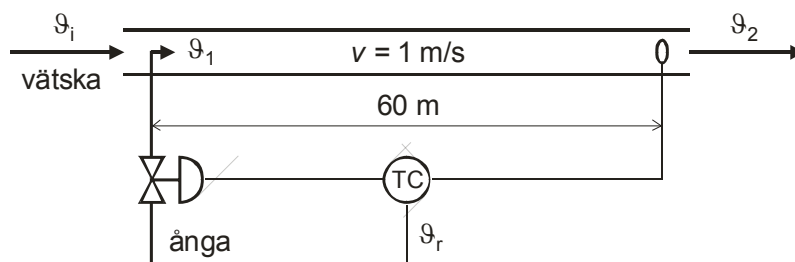
Blockschema:



Blockschemat illustreras också vad som menas med positiv och negativ förstärkning. Om en ökning av insignalen får utsignalen att öka är förstärkningen  $K_p > 0$  och vice versa. ◀

**Övning 2.1.**

Konstruera ett blockschema för nedanstående process, där en vätska strömmande i ett rör uppvärms och temperaturregleras genom tillförsel av ånga.

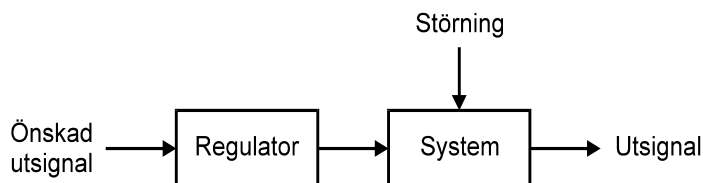
**2.4 Reglerstrategier**

I inledningen nämndes att återkoppling är en viktig reglerteknisk metod, men det finns också andra möjligheter att styra en process.

**2.4.1 Öppen styrning**

Vid *öppen styrning* används inga observationer av vad som sker i processen. Regulatorn baserar sina åtgärder på a priori information om processens egenskaper så att styrvariablerna följer något i förväg fastställt tidsförlopp. Man talar ofta om tidsstyrning eller programstyrning. I de flesta praktiska situationer har detta uppenbara nackdelar. Vilka?

Ett exempel på ett öppet styrsystem är en brödrost.

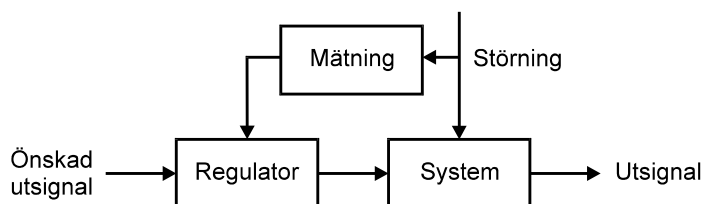


**Figur 2.7.** Öppen styrning.

**2.4.2 Framkoppling**

Man kan också tänka sig att mäta variabler som stör processen. Om man vet hur dessa störningar påverkar de utsignaler man vill reglera, kan man på basis av mätvärdena justera styrsignalerna så att störningarnas inverkan på utsignalerna elimineras. I princip kan det vara möjligt att eliminera dessa störningar innan de ens hunnit påverka utsignalerna. Denna typ av reglering kallas störvärdeskompensation, eller vanligare, *framkoppling*.

Trots att man i princip kan erhålla perfekt reglering med hjälp av framkoppling kombineras strategin vanligtvis med återkoppling. Varför?

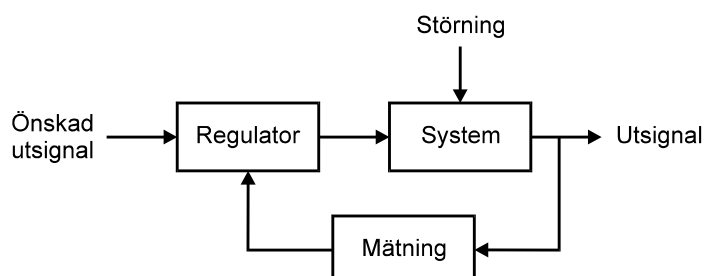


**Figur 2.8.** Framkoppling.

### 2.4.3 Återkopplad reglering

Framgångsrik styrning kräver i allmänhet observation av vad som händer i processen så att styråtgärderna kan modifieras på basen av gjorda mätningar. Vanligtvis mäter man de variabler man önskar reglera. Detta leder till ett slutet regelsystem med *återkoppling*.

I de exempel på regelsystem vi nämnt tidigare användes återkoppling.



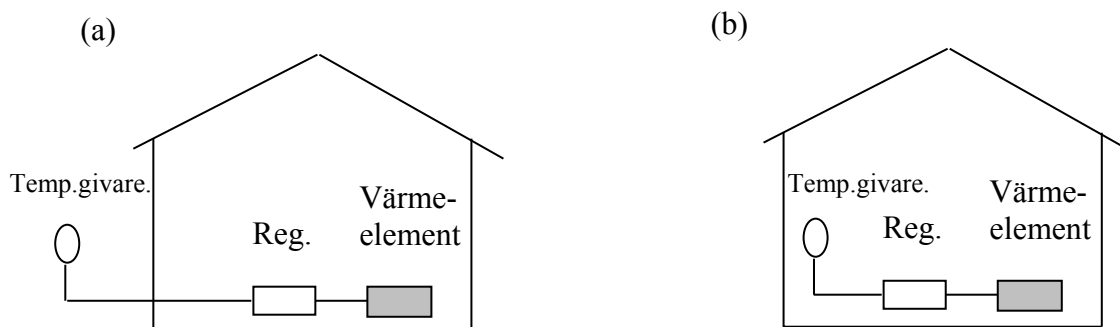
**Figur 2.9.** Återkoppling.

► **Exempel 2.3. Två olika reglerstrategier för husuppvärmning.**

Figur 2.10 illustrerar husuppvärmning genom (a) framkoppling, (b) återkoppling. Följande för- och nackdelar kan noteras:

- Framkoppling: snabb reglering, men kräver noggrann modell; beaktar inte andra störningar än den uppmätta utetemperaturen, t.ex. vindhastigheten.
- Återkoppling: långsammare reglering eftersom ingenting görs förrän innetemperaturen redan påverkats; mindre känsligt för modellfel och störningar.

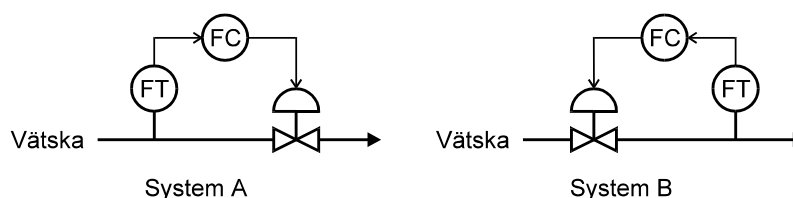
Hur skulle öppen styrning av innetemperaturen se ut?



**Figur 2.10.** Husuppvärmning genom (a) framkoppling, (b) återkoppling.

### Övning 2.2.

Betrakta de två flödesreglersystemen nedan. Ange reglerstrategin (återkoppling / framkoppling) i vardera fallet och motivera svaret. Det kan antas att avståndet mellan flödesgivaren FT och reglerventilen är litet.



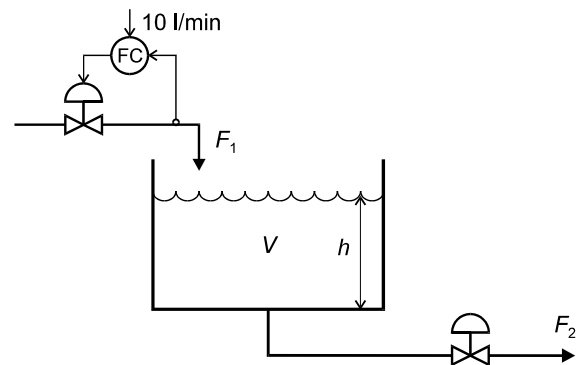
**Övning 2.3.**

Vätskebehållaren till höger har ett tillflöde  $F_1$  och ett utflöde  $F_2$ . Tillflödet regleras så att  $F_1 = 10$  l/min. Man önskar hålla vätskevolymen konstant vid  $V = 1000$  l. Vätskevolymen (eller vätskenivån) är således systemets utsignal, medan  $F_1$  och  $F_2$  är insignaler.

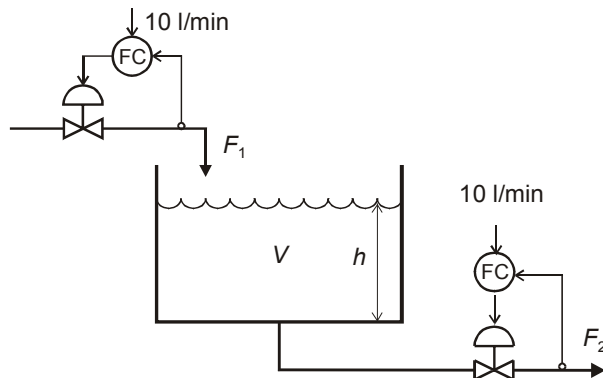
Följande reglerstrategier är tänkbara:

- Öppen styrning — utflödet mätes och regleras så att  $F_2 = 10$  l/min.
- Framkoppling — tillflödet mätes och utflödet regleras så att  $F_2 = F_1$ .
- Återkoppling — vätskenivån  $h$  mätes och regleras med hjälp av utflödet.

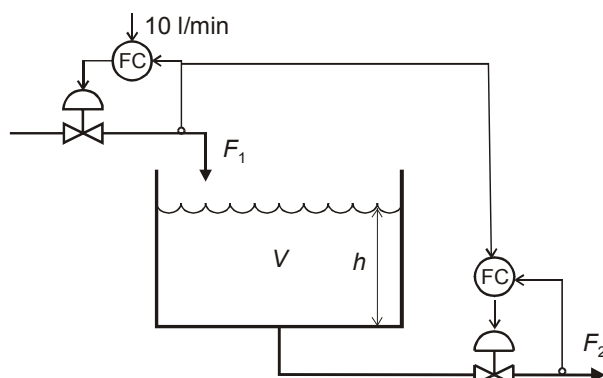
Diskutera skillnaderna mellan dessa strategier och föreslå lämplig strategi.



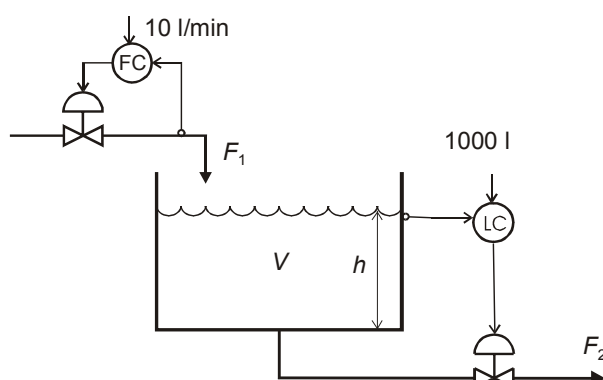
a)



b)



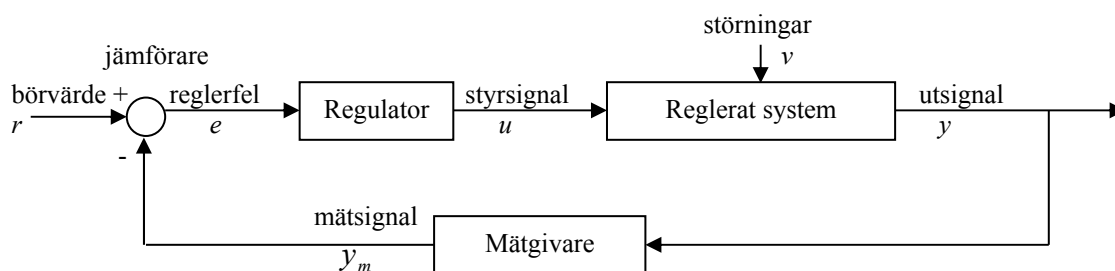
c)



## 2.5 Återkopplad reglering

### 2.5.1 Konstantreglering och följereglering

Figur 2.11 visar ett blockschema över en enkel återkopplad reglerkrets. Reglersystemets uppgift är att styra en viss variabel (utsignalen) hos det reglerade systemet till en önskad nivå given av *börvärdet*, även kallat *ledvärde* eller *referensvärde*. Vanligtvis opererar regulatoren direkt på skillnaden mellan börvärdet och utsignalens *mätvärde*, dvs på *regleravvikelsen* eller *reglerfelet*. Utsignalens värde (i ett visst ögonblick) kallas ibland *ärvärde*. Matematiska symboler som ofta kommer att användas för de olika signalerna har även införts i figuren.



Figur 2.11. Återkopplad reglerkrets.

Beroende på om börvärdet är konstant eller varierande skiljer man på två olika typer av reglering:

1. *Konstantreglering*. Börvärdet är oftast konstant och reglersystemets huvuduppgift är att hålla utsignalen lika med börvärdet, trots störningars inverkan. Ibland kallas detta för *regulatorproblemet*.
2. *Följereglering*. Börvärdet varierar och reglersystemets huvudfunktion är att få utsignalen att följa börvärdet med så små fel som möjligt. Ibland kallas detta för *servoproblemet*.

Dessa två typer av reglering kan långt behandlas parallellt; skillnader uppkommer närmast i valet av parametervärden för regulatoren (kapitel 8).

### 2.5.2 Ett exempel på vad som kan uppnås med återkoppling

Låt oss, för att illustrera vissa fundamentala egenskaper för återkopplad reglering, betrakta det tidigare omtalade husuppvärmningsexemplet. Innetemperaturen  $\mathcal{Q}_i$  beror av utetemperaturen  $\mathcal{Q}_u$  och uppvärmningseffekten  $P$  enligt ett visst dynamiskt samband. Vi kan här dock för enkelhets skull nöja oss med att betrakta det *statiska* samband mellan dessa variabler som gäller vid *stationärtillstånd*, även kallat *fortfarighetstillstånd*. Om vi använder symbolerna  $\bar{\mathcal{Q}}_i$ ,  $\bar{\mathcal{Q}}_u$  resp.  $\bar{P}$  för att beteckna variablernas statiska värden kan vi skriva sambandet som

$$\bar{\mathcal{Q}}_i = K_p \bar{P} + \bar{\mathcal{Q}}_u \quad (2.1)$$

där  $K_p$  är systemets *förstärkning*, som här är en positiv parameter. Ur ekvationen framgår, som sig bör, att  $\bar{\mathcal{Q}}_i = \bar{\mathcal{Q}}_u$  om värmeeffekten  $\bar{P} = 0$  samt att en ökning av värmeeffekten ökar innetemperaturen.

Vi vill att innetemperaturen skall vara ungefär konstant och lika med en önskad referens-temperatur  $\mathcal{Q}_r$  trots variationer i utetemperaturen. En enkel reglerlag är att justera värmeeffekten

i proportion med skillnaden mellan den önskade innetemperaturen och den rådande innetemperaturen. När vi enbart beaktar stationärtillståndet, innebär detta

$$\bar{P} = K_c (\mathcal{G}_r - \bar{\mathcal{G}}_i) + P_0 \quad (2.2)$$

där  $K_c$  är regulatorns förstärkning och  $P_0$  en konstant grundeffect som vi kan ställa in manuellt. Detta samband beskriver en *proportionalregulator*, vanligare kallad en *P-regulator*. Som vi ser har regulatorn den egenskapen att värmeeffekten ökas när innetemperaturen är lägre än den önskade temperaturen, ifall  $K_c > 0$ .

Genom att kombinera ekvation (2.1) och (2.2) får vi mer explicit information om hur det reglerade systemet beter sig. Eliminering av styrsignalen  $\bar{P}$  ger

$$\bar{\mathcal{G}}_i = \frac{K_p K_c}{1 + K_p K_c} \mathcal{G}_r + \frac{1}{1 + K_p K_c} \bar{\mathcal{G}}_u + \frac{K_p}{1 + K_p K_c} P_0 \quad (2.3)$$

Ur denna ekvation kan vi bl.a. utläsa följande. Om den automatiska temperaturregleringen är avslagen så att  $K_c = 0$ , får vi  $\bar{\mathcal{G}}_i = \bar{\mathcal{G}}_u + K_p P_0$ , dvs innetemperaturen blir som väntat inte alls beroende av den önskade temperaturen  $\mathcal{G}_r$ . Om dessutom grundvärmen är avslagen så att  $P_0 = 0$ , blir innetemperaturen lika med utetemperaturen. Om vi ställer regleringen på automatik ( $K_c > 0$ ), får vi t.ex., om vi väljer  $K_c = 1/K_p$ ,  $\bar{\mathcal{G}}_i = 0,5\mathcal{G}_r + 0,5\bar{\mathcal{G}}_u + 0,5K_p P_0$ , dvs innetemperaturen kommer närmare den önskade temperaturen än utetemperaturen (ifall  $\mathcal{G}_r > \bar{\mathcal{G}}_u$ !). Beroende på hur vi ställt in  $P_0$  är det till och med möjligt att vi råkar få  $\bar{\mathcal{G}}_i = \mathcal{G}_r$ . Det är lätt att inse att ju högre  $K_c$  är, desto mer närmar sig  $\bar{\mathcal{G}}_i$  referensvärdet  $\mathcal{G}_r$  oberoende av  $\bar{\mathcal{G}}_u$  och  $P_0$ , dvs om  $K_c \rightarrow \infty$ , gäller att  $\bar{\mathcal{G}}_i \rightarrow \mathcal{G}_r$ .

Detta illustrerar en fundamental egenskap hos återkopplad reglering. Den kan så gott som helt eliminera störningars (här utetemperaturens  $\bar{\mathcal{G}}_u$ ) inverkan på det reglerade systemet och vi behöver vanligtvis inte heller känna till systemets egenskaper i detalj (här  $K_p$ ) för att ställa in regulatorn. Dessutom kan vi få utsignalen att anta eller följa ett önskat värde (här  $\bar{\mathcal{G}}_i \approx \mathcal{G}_r$ ).

### 2.5.3 Ett motexempel: begränsande faktorer

I exemplet ovan försummade vi systemets dynamik för att på ett enkelt sätt kunna illustrera fördelar som åtminstone i princip kan nås med återkopplad reglering. Det är klart att vi i praktiken inte t.ex. kan ha en regulatorförstärkning som närmar sig oändligheten. När systemets dynamik beaktas skulle detta enligt den dynamiska motsvarigheten till ekvation (2.2) kräva ett effektpådrag som närmar sig oändligheten om innetemperaturen avviker från referenstemperaturen. Dessutom ställer det reglerade systemets (dynamiska) egenskaper i allmänhet begränsningar, som följande exempel visar.

Betrakta processen i övning 2.1, där vätska strömmande i ett välisolerat rör uppvärms och temperaturregleras genom direkt tillförsel av ånga. Vätskans temperatur  $\mathcal{G}_2$  mäts 60 m efter blandningspunkten, vilket med beaktande av strömningshastigheten  $v = 1$  m/s innebär att blandningspunktens temperatur  $\mathcal{G}_1$  når mätpunkten efter 1 minut. Om vätskans temperatur före blandningspunkten betecknas  $\mathcal{G}_1$  och masströmmen tillförd ånga betecknas  $\dot{m}$  gäller, då värmeförlusten från röret försummas,



$$\mathcal{G}_2(t+1) = \mathcal{G}_1(t) = \mathcal{G}_1(t) + K_p \dot{m}(t) \quad (2.4)$$

där  $t$  är tiden uttryckt i minuter och  $K_p$  är en positiv processförstärkning, vars värde vi inte här behöver bestämma närmare. Om vi använder en P-regulator för reglering av  $\mathcal{G}_2$  med  $\dot{m}$  (här försummar vi reglerventilen) är reglerlagen

$$\dot{m}(t) = K_c (\mathcal{G}_r - \mathcal{G}_2(t)) + \dot{m}_0 \quad (2.5)$$

där  $K_c$  är regulatorns förstärkning och  $\dot{m}_0$  är ångströmmens normalvärde, som vid stationärtillstånd ger  $\bar{\mathcal{G}}_2 = \mathcal{G}_r$ . Kombinerad av ekvation (2.4) och (2.5) ger

$$\mathcal{G}_2(t+1) = \mathcal{G}_1(t) + K_p K_c (\mathcal{G}_r - \mathcal{G}_2(t)) + K_p \dot{m}_0 \quad (2.6)$$

Betrakta ett stationärtillstånd  $(\bar{\mathcal{G}}_1, \bar{\mathcal{G}}_2)$ . Enligt ekvation (2.6) gäller då

$$\bar{\mathcal{G}}_2 = \bar{\mathcal{G}}_1 + K_p K_c (\mathcal{G}_r - \bar{\mathcal{G}}_2) + K_p \dot{m}_0 \quad (2.7)$$

Subtraktion av ekvation (2.7) från (2.6) ger med  $\Delta \mathcal{G}_1(t) \equiv \mathcal{G}_1(t) - \bar{\mathcal{G}}_1$  och  $\Delta \mathcal{G}_2(t) \equiv \mathcal{G}_2(t) - \bar{\mathcal{G}}_2$

$$\Delta \mathcal{G}_2(t+1) = \Delta \mathcal{G}_1(t) - K_p K_c \Delta \mathcal{G}_2(t) \quad (2.8)$$

Antag att stationärtillstånd råder fram till  $t = 0$  och att en stegformig förändring  $\Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$  sker i temperaturen  $\mathcal{G}_1$  vid denna tidpunkt. Enligt ekvation (2.8) får vi då  $\Delta \mathcal{G}_2(1) = \Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$ ,  $\Delta \mathcal{G}_2(2) = \Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}} - K_p K_c \Delta \mathcal{G}_2(1) = (1 - K_p K_c) \Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$  och allmänt får vi för  $t = k - 1$

$$\Delta \mathcal{G}_2(k) = \sum_{j=0}^{k-1} (-K_p K_c)^j \Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}} \quad (2.9)$$

Vi ser omedelbart att varje term i högra ledet till absoluta beloppet blir större än föregående term om  $|K_p K_c| > 1$ , vilket betyder att serien divergerar med instabilitet som följd. Om  $K_p K_c = 1$ , kommer  $\Delta \mathcal{G}_2$  att svänga mellan nivåerna  $-\Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$  och  $\Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$  ”för all framtid”. Om  $|K_p K_c| < 1$ , är termerna i summan en konvergerande geometrisk serie, och vi får

$$\Delta \mathcal{G}_2(k) \rightarrow \frac{\Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}}{1 + K_p K_c} \text{ när } k \rightarrow \infty, |K_p K_c| < 1 \quad (2.10)$$

Av (2.10) framgår att bästa reglering med en P-regulator ger  $\Delta \mathcal{G}_2(k) \approx 0,5 \Delta \mathcal{G}_{i,\text{steg}}$  när  $k \rightarrow \infty$ , trots att vi skulle önska  $\Delta \mathcal{G}_2 \approx 0$ .

I detta exempel erhöll vi *inte* de mycket positiva effekter vi erhöll i föregående exempel. Vi kan inte säga att processen i detta exempel är speciellt komplicerad, men den innehåller en ren transportfördröjning, eller mer allmänt en *tidsfördröjning*, även kallad *dödtid*. Dyliga transportfördröjningar är givetvis mycket vanliga i processindustrin, men även andra processer innehåller ofta dödtider. Vi kan rent allmänt konstatera att dödtider i en återkopplad reglerkrets är till skada för regleringen och äventyrar reglerkretsens stabilitet.

Dödtider är besvärliga processgenskaper, men processer kan vara svårreglerade också av andra orsaker. Till exempel processer, vars beteende beskrivs av (linjära) differentialekvationer av tredje eller högre ordning, medför begränsningar av liknande typ som dödtider gör.

### 2.5.4 PID-regulatorn

I de två illustrationsexemplen ovan använde vi P-regulatorer och vi kunde konstatera följande egenskaper:

- En hög regulatorförstärkning är önskvärd för *eliminering av störningars inverkan* på det reglerade systemet samt *reducering av känsligheten för osäkerhet* rörande processparametrar.
- En hög förstärkning kan leda till *instabilitet* och situationen förvärras av processosäkerheter; man kan säga att risken är överhängande *när man litar för mycket på för gammal information*.
- En *stationär regleravvikelse* (ett bestående reglerfel) erhålles efter en belastningsförändring (dvs en *laststörning*); ju mindre regulatorförstärkningen är, desto större blir regleravvikelsen.

Man kan säga att de två första punkterna gäller för återkopplad reglering i allmänhet. Eftersom de är sinsemellan motstridiga antyder de att *kompromisser måste göras för att hitta en optimal regulatorinställning*. Det är också troligt att en mer komplicerad regulator än en P-regulator vanligtvis är att föredra. Detta är t.ex. nödvändigt för *eliminering av stationär regleravvikelse*.

Den så kallade *PID-regulatorn* är en ”universalregulator”, som förutom en ren förstärkning, också innehåller integrerande och deriverande verkan. Reglerlagen för en ideal PID-regulator — i praktiken används ofta dock modifieringar — ges av

$$u(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) + u_0 \quad (2.11)$$

där  $u(t)$  är regulatorns utsignal och  $e(t)$  är skillnaden mellan referensvärde och mätvärde, dvs reglerfelet; se figur 2.11. Regulatorns justerbara parametrar är, förutom *styrsignalens normalvärde*  $u_0$  (ofta = 0), *förstärkningen*  $K_c$ , *integrationstiden*  $T_i$  och *deriveringstiden*  $T_d$ .

Genom lämpligt val av regulatorparametrar kan man koppla bort de delar man inte behöver. En s.k. PI-regulator erhålles genom att sätta  $T_d = 0$  och en P-regulator erhålles genom att formellt ytterligare välja  $T_i = \infty$  (obs. inte  $T_i = 0$ !). Ibland används också PD-regulatorer. Man vill så gott som alltid ha med P-verkan, och som reglerlagen i (2.11) är skriven kan man inte heller koppla bort den utan att koppla bort hela regulatorn. Man kan dock avlägsna denna begränsning genom att skriva reglerlagen på formen

$$u(t) = K_c e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} + u_0 \quad (2.12)$$

PI-regulatorn är utan tvekan den vanligaste regulatorformen i (process)industrin, där den speciellt används för flödesreglering. Sammanfattningsvis kan sägas att PI-regulatorn har

- goda statiska egenskaper, den *elimineras stationär regleravvikelse*;
- tendens att förorsaka *oscillerande beteende*, vilket reducerar stabiliteten (integralen samlar på gammal information!).

D-verkan inkluderas ofta (PD eller PID) vid reglering av processer med långsam dynamik, speciellt temperatur och ångtryck. D-verkan ger

- goda dynamiska egenskaper och *god stabilitet* (derivatan ”predikterar” framtiden!);
- *känslighet för mätbrus*.

**Övning 2.4.**

Betrakta en PI-regulator och antag att stationärtillstånd råder vid tiden  $t = t_s$ . Detta innebär att  $u(t)$  och  $e(t)$  är konstanta för  $t \geq t_s$ . Förklara varför detta måste innebära att  $e(t_s) = 0$ , dvs att regleravvikelsen måste vara noll vid stationärtillstånd.

**Övning 2.5.**

Vilken stationär egenskap har en dubbelintegrerande regulator (PII-regulator)

$$u(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t x(\tau) d\tau \right) + u_0, \quad x(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dvs vad kan man säga om  $e(t)$  och/eller  $x(t)$  vid stationärtillstånd?

**2.5.5 Negativ och positiv återkoppling**

Det är viktigt att skilja på *negativ* återkoppling och *positiv* återkoppling.

- Negativ återkoppling innebär att styrsignalen *motverkar* reglerfelet.
- Positiv återkoppling innebär att styrsignalen *förstärker* reglerfelet.

**Övning 2.6.**

1. Vilken typ av återkoppling vill man ha i ett reglersystem?
2. Hur vet man vilken typ av återkoppling man har i ett reglersystem?
3. Kan man alltid välja rätt typ av återkoppling?
4. Vad händer ifall man har fel typ av återkoppling?

Man ser ofta andra definitioner på negativ (och positiv) återkoppling än den ovan givna, t.ex.:

- Negativ återkoppling innebär att styrsignalen ökar när utsignalen minskar och tvärtom.
  - Negativ återkoppling erhålls när utsignalens mätvärde subtraheras från ledvärdet.
5. Är dessa definitioner i överensstämmelse med den först givna?
  6. Om inte, vad förutsätter de av processen och/eller regulatorns egenskaper?