

FRA: Finn Høyugen

Anvendt Reg. Tekn. (1992)

1.1 Innledning

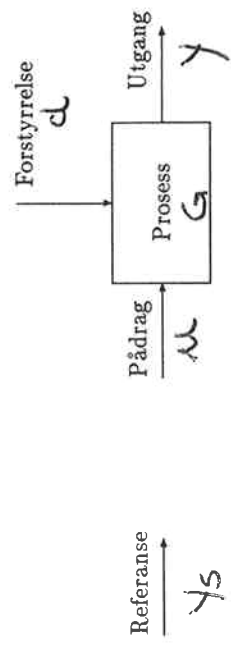
I dette kapitlet kan du lære mye om reguleringsteknikk. Det er min hensikt at kapitlet skal kunne fungere som et grunnkurs i faget, og det utgjør på en måte en bok i boken.

Jeg har valgt å introdusere de grunnleggende reguleringsmetodene foroverkopling og tilbakekopling via et eksempel på et reguleringsystem som vi kjenner godt, nemlig en dusj der vi skal oppnå en ønsket vanntemperatur. Så fortsetter vi med en analyse av et virkelig reguleringsystem. Det er et temperaturreguleringsystem for en fysisk modell av et varmlufttrør. Teoretiske og eksperimentelle resultater går der hånd i hånd. Videre skal vi se litt på hvordan reguleringsystemer "ser ut" i praksis, vi skal ta for oss eksperimentelle metoder for innstilling av parametrene i en regulator, og lære å utvikle praktiske regulatoralgoritmer klare for programmering.

Dusjen kommer som nevnt tidlig, men starten på kapitlet er heller tørr: Først kommer en definisjon av selve reguleringsproblemet. Deretter ser vi hvordan dette kan løses på to prinsipielt forskjellige måter.

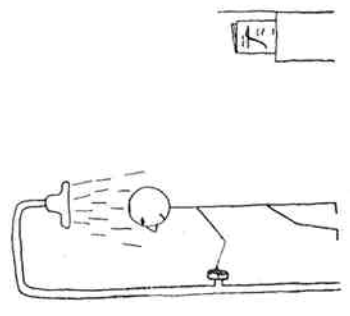
1.2 Reguleringsproblemet

Reguleringsproblemet: Gitt en prosess som vi kan påvirke med et pådrag og som dessuten er påvirket av en forstyrrelse. Prosessens utgang skal følge en gitt referanse best mulig, tross forstyrrelsens innvirkning, se figur 1.1.



Figur 1.1: Reguleringsproblemet: Prosessens utgang skal følge referansen, tross forstyrrelsens innvirkning.

Reguleringsteknikken viser hvordan vi kan lage reguleringsystemer for å løse reguleringsproblemet.



Figur 1.2: En velkjent prosess.

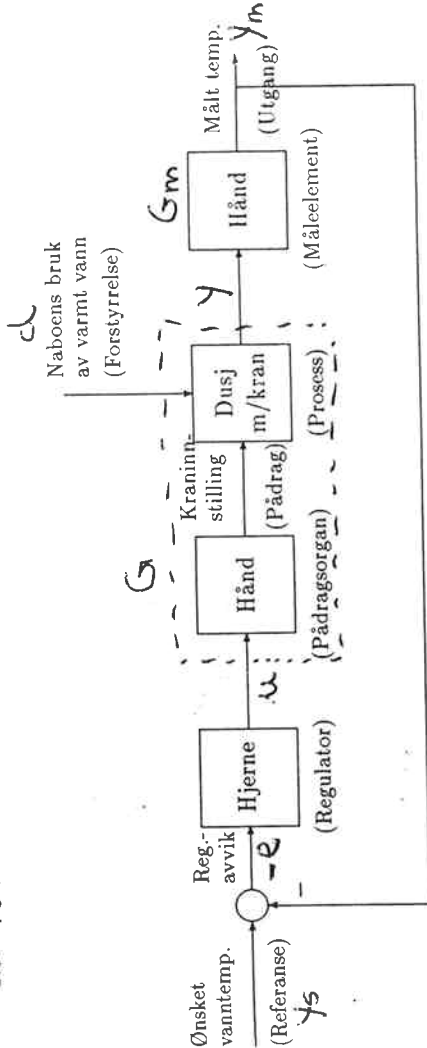
Det er naturlig å klassifisere et reguleringsystems egenskaper ut fra i hvilken grad det løser reguleringsproblemet. Et reguleringsystems *følgeegenskaper* er dets evne til å få utgangen til å følge referansen når vi ser bort fra forstyrrelsens virkning, mens *reguleringsegenskapene* uttrykker dets evne til å undertrykke forstyrrelsens virkning på utgangen. Der det passer, kan vi erstatte "følge- og reguleringsegenskaper" med *ytelse*. Senere i boken innføres størrelser eller funksjoner som gir uttrykk for følge- og reguleringsegenskapene (ytelsen).

1.3 To prinsipielt forskjellige løsninger

Reguleringsproblemet kan vi prøve å løse på to måter som i prinsippet er helt forskjellige, nemlig *foroverkopling* og *tilbakekopling*. La oss se hva hver av dem går ut på og få en forståelse av deres egenskaper.

Foroverkopling

Vi starter med en dusj, se figur 1.2. I dusjen ønsker vi at vanntemperaturen skal være lik en ønsket (behagelig) temperatur (referanse), også når naboens varmtvannsforbruk virker som en forstyrrelse på vår dusj. Vi kan betrakte dusjen som en prosess. La oss anta at vi vet *nøyaktig* hvordan vanntemperaturen avhenger av kraninnstillingen (pådrag) og at vi vet nøyaktig hvordan vanntemperaturen avhenger av naboens forbruk (forstyrrelsen), d.v.s. hvilken justering av kraninnstillingen som skal til for å kompensere for et visst forbruk hos naboene.

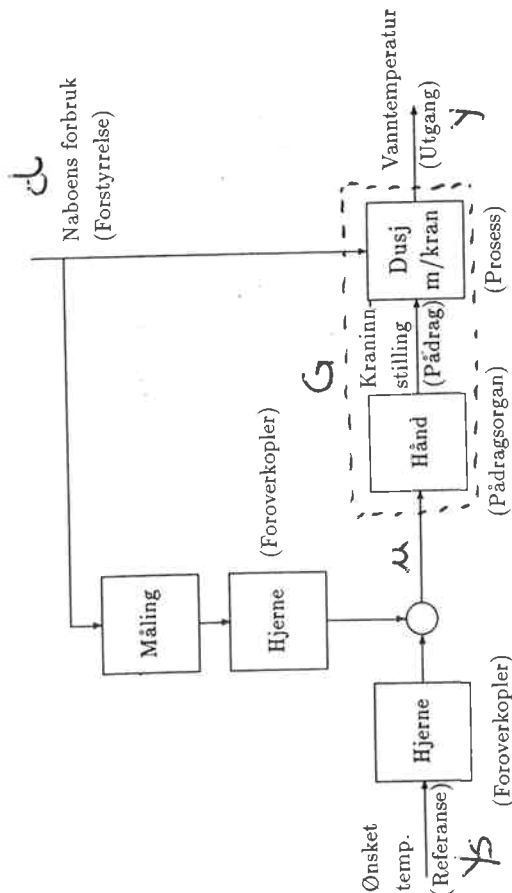


Figur 1.4: Blokkdiagram for reguleringsystemet vi lager når vi skal oppnå at vanntemperaturen er lik ønsket vanntemperatur. Reguleringsystemet er basert på tilbakekopling. (Det som står i parentes, er generelle reguleringsstekniske betegnelser.)

Tilbakekopling

For å være sikre på at vanntemperaturen blir riktig, tross slike forstyrrelser som vi ikke kan måle og tross at vår kunnskap om prosessen er mangelfull, kan vi måle temperaturen v.h.j.a. den ene hånden og justere pådraget med den andre inntil temperaturen blir som vi ønsker, d.v.s. inntil *reguleringsavviket* (avviket mellom referansen og utgangen) er null. Denne løsningen kalles *tilbakekopling* fordi vi kopler "tilbake" fra målingen (utgangen) til pådraget. I figur 1.4 er løsningen illustrert med et blokkdiagram. Den lukkede sløyfen som dannes ved tilbakekopling, kalles *reguleringsløyfen*. *Regulatoren* er den enheten som beregner hva pådraget skal være som funksjon av reguleringsavviket. Ofte inkluderer vi pådragsorganet i selve prosessen, og da betegner vi den variabelen som påvirker hele denne prosessen, som pådrag.

Regulering med tilbakekopling vil kunne gi tilfredsstillende regulering selv om vi ikke kjenner prosessens egenskaper godt og selv om vi ikke måler noen forstyrrelser i det hele tatt. Grunnen er at vi justerer pådraget ut fra hvordan prosessens utgang (måling) virkelig er. Ved foroverkopling innstilles pådraget bare ut fra hva vi antar er det beste, og det er ingen etterjustering hvis reguleringsavviket skulle være forskjellig fra null.



Figur 1.3: Regulering av vanntemperaturen i en dusj v.h.j.a. foroverkopling fra referansen og forstyrrelsen.

Vi antar også at vi måler naboens forbruk (forstyrrelsen) på en eller annen måte. Ut fra vår nøyaktige kunnskap om dusjens virkemåte og naboens forbruk, skulle vi da straks kunne stille inn kranen slik at vanntemperaturen blir riktig. Denne løsningen kalles *foroverkopling*, fordi vi kopler "forover" fra inngangssignaler til pådraget, d.v.s. fra referansen og fra forstyrrelsen til pådraget. Foroverkopling innebærer altså en direkte kopling til pådraget. Temperaturreguleringsystemet er illustrert i figur 1.3, der det er påført generelle reguleringsstekniske betegnelser. Sirkelen er et summasjonspunkt.

Foroverkopling er en metode som kan gi god regulering når vi kjenner prosessen meget godt og når vi måler forstyrrelsen. Men i praksis kan vi få problemer. For det første kan det være at naboen rett og slett ikke finner seg i at vi måler forbruket, d.v.s. at vi ikke får målt forstyrrelsen. For det andre kan det jo tenkes at det fins forstyrrelser som vi ikke tenker på å måle, f.eks. romtemperaturen. For det tredje er det jo tvisomt at vi kjenner prosessens (dusjens) egenskaper spesielt godt m.h.t. sammenhengen mellom kranåpning og strømning. Alt dette kan resultere i at vannet blir for kaldt eller for varmt.

Det fins en uhyre effektiv måte å hanske med disse problemene på. Og alle som dusjer, vet løsningen.

Foroverkopling vs. tilbakekopling

Men hvorfor spandere så mye plass på foroverkopling når den i praksis har sine klare svakheter? En grunn er at foroverkopling sannsynligvis er den reguleringsmetoden vi først tenker på ("innstill pådraget som best vi kan ut fra vår kjennskap til prosessen"). En annen grunn er at foroverkopling kan brukes i tillegg til tilbakekopling og forbedre reguleringsystemets ytelse. Foroverkopling gir en rask innstilling av pådraget. Det reguleringsavviket som foroverkopling alene ville ha gitt, tar tilbakekoplingen seg av, d.v.s. reduserer eller eliminerer.

Definisjon av foroverkopling og tilbakekopling

Når vi skal identifisere hva som er foroverkopling og hva som er tilbakekopling, kan vi gå ut fra følgende definisjoner:

Foroverkopling er kopling fra en av systemets *inn ganger* (referansen eller forstyrrelsen) til en variabel (pådraget) i systemet.

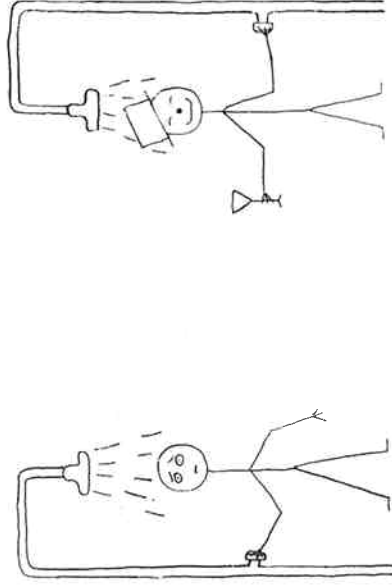
Tilbakekopling er kopling fra systemets *utgang* til en variabel i systemet.

Om betegnelsene

Det er praktisk å kunne bruke ett ord om "det å få en prosess til å oppføre seg slik vi ønsker", uten å måtte presisere at det skjer på den ene eller andre måten, d.v.s. uten å måtte presisere at det skjer med foroverkopling eller tilbakekopling. Det er strengt tatt ikke riktig å la "regulering" være ordet, fordi det pr. regulerings teknisk definisjon betyr å bruke tilbakekopling. I henhold til *Ordbok for automatiseringsteknikk* (Universitetsforlaget) er definisjonen som følger (utdrag): "Påvirkning av en prosess gjennom tilbakekopling...". Vi kan strengt tatt heller ikke bruke "styring", fordi det egentlig betyr å bruke foroverkopling. Definisjonen på styring er: "Påvirkning av en prosess etter et gitt program, uten bruk av tilbakekopling". Det har imidlertid blitt vanlig å se gjennom fingrene på definisjonene og bruke "regulering" som det generelle ordet, som altså egentlig savnes. Derfor tillater jeg meg å bruke betegnelsen "regulering med foroverkopling" enkelte steder i boken.

På engelsk er det enklere. Der brukes ordet "control". Å bruke ordet "kontroll" på norsk er en mulighet og brukes noe, men det har ikke slått igjennom i det regulerings tekniske miljø, bl.a. fordi ordet har en snevrere betydning enn "control".¹

¹Gyldendals fremmedordbok: kontrollere = undersøke, prøve. Oxford's Dictionary: control = regulere.



Figur 1.5: To personer som dusjer.

Til slutt bør det nevnes at regulering med foroverkopling også betegnes "åpen-sløyfe-regulering", mens regulering med tilbakekopling betegnes "lukket-sløyfe-regulering".

Stabilitetsproblemet

Under visse forhold kan det oppstå stabilitetsproblemer i tilbakekoblede systemer, og står det riktig ille til, kan systemet være ustabil. Det betyr kort sagt at variable i systemet begynner å oscillere med stadig større amplitude. Det er to måter å forklare ustabilitet på. Den ene måten er at det er for stor forsterkning av signalene i den tilbakekoblede sløyfen, d.v.s. at *sløyfeforsterkningen* er for stor. Den andre måten er at det er for stor *tidsforsinkelse* av signalene i sløyfen. Vi kan få en god forståelse av dette ved å tenke på dusjen.

Figur 1.5 viser to personer som dusjer. Den ene er meget følsom, den andre er av visse årsaker sløv. Begge personene ønsker å stille inn en behagelig vanntemperatur. De bruker tilbakekopling, hvilket betyr at de justerer vanntemperaturen med varmtvannskranen ut fra målt vanntemperatur. Målingen utfører de med hånden.

Vi betrakter først den følsomme. Vannet er til å begynne med for kaldt. Han er meget følsom for differansen mellom den temperaturen han ønsker seg og den han måler med hånden, og skrur derfor voldsomt på kranen for å få vannet varmere. Vanntransporten tar en viss tid, og i løpet av denne tiden har han skrudd alt

for mye på varmtvannskranen. Vannet blir derfor for varmt. Så prøver han å skru ned i igjen, men med samme ubehagelige resultat, vannet blir for kaldt. Det hele resulterer i at temperaturen svinger mellom alt for varmt og alt for kaldt. Temperaturreguleringssystemet, der han selv er regulator, er ustabil. Grunnen er at regulatoren har for stor forsterkning, d.v.s. reagerer for følsomt eller for sterkt på avviket. Reguleringssløyfen får for stor sløyfeforsterkning.

Så til den sløve. Vannet er til å begynne med kaldt. Han vrir på varmtvannskranen, og vannet blir varmere. Han reagerer imidlertid meget sent på temperaturdifferansen mellom ønsket og virkelig temperatur. Når så vannet er blitt litt for varmt, skruer han derfor ikke ned i tide, og vannet blir enda varmere. Omsider bestemmer han seg for at kranen må skrues ned, og vannet blir kaldere. Men forløpet gjentar seg, og vannet blir nå alt for kaldt. Det hele resulterer i at temperaturen svinger mellom alt for kaldt og alt for varmt. Temperaturreguleringssystemet er ustabil. Grunnen er at det er for stor tidsforsinkelse i reguleringssløyfen.

Vi kan oppsummere slik: En forklaring på at et tilbakekoplet reguleringssystem har blitt ustabil, er at

- systemet mellom reguleringsavviket og prosessens utgang har for stor forsterkning, d.v.s. reagerer for kraftig på reguleringsavviket, eller at
- systemet reagerer på reguleringsavviket med for stor tidsforsinkelse.

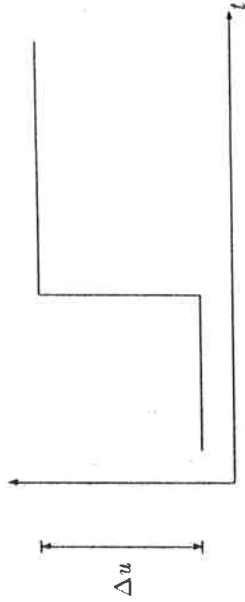
1.4 Eksempel: Temperaturregulering av et varmluftør

I dette underkapitlet skal vi studere et temperaturreguleringssystem. Det er svært viktige ting vi skal ta for oss:

- Prosessanalyse ut fra eksperimenter og matematiske modeller.
- Regulatorfunksjoner, nærmere bestemt foroverkopling (eller åpen-sløyfe-regulering) og tilbakekopling med vekt på standardregulatorer (d.v.s. PID-regulatoren og dens avledninger), men også av/på-regulator.
- Stabilitet.

Vi skal se på både teoretiske og eksperimentelle resultater.

Det er temperaturen i en fysisk modell av et varmluftør som skal reguleres. Figur 1.6 viser varmluftørret. En vifte med konstant hastighet blåser luft gjennom røret. Spjeldåpningen kan varieres manuelt. Luften kan oppvarmes av et



Figur 1.8: Sprangfunksjonen. Δu er sprangets høyde.

å utføre analyse av reguleringssystemer for prosessen. Prosessen inngår jo som en del av reguleringssystemet. Gjennom analysen kan vi forutsi reguleringssystemets egenskaper.

Sprangrespons

Hvis vi setter en sprangfunksjon, eller kortere: et sprang, på prosessens inngang eller pådrag, så utgjør responsen på utgangen *prosessens sprangrespons*. Figur 1.8 viser sprangfunksjonen. Sprang er svært mye brukt som testsignal. Grunnen er at sprangresponsen gir uttrykk for både

- prosessens *dynamiske* egenskaper, d.v.s. hvordan prosessen svarer på hurtige endringer i inngangssignalet og
- prosessens *statiske* egenskaper, d.v.s. hvordan utgangen svarer på statiske (konstante) signaler på inngangen.

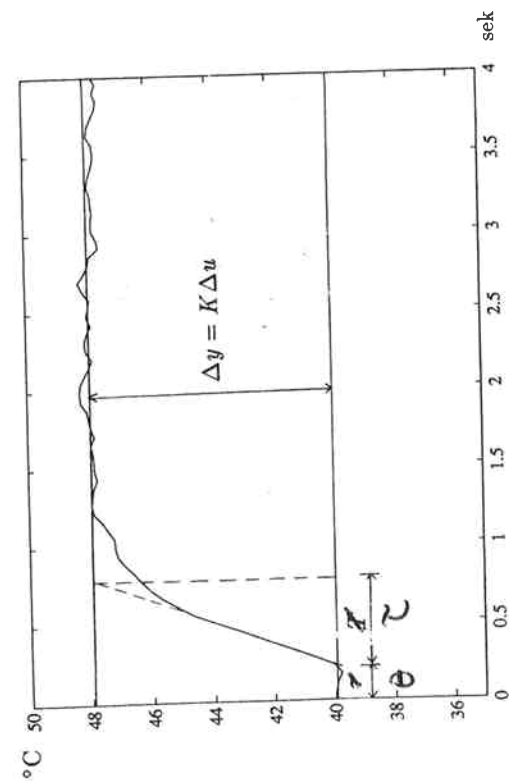
Figur 1.9 viser varmluftørrets sprangrespons, d.v.s. sprangresponsen i y . Det er et sprang i u med høyde $\Delta u = 2$ volt. På sprangresponsen er det angitt følgende størrelser som kan brukes for å karakterisere et systems egenskaper:

Forsterkningen K er definert som forholdet mellom den endringen av stasjonær verdien av prosessutgangen som spranget har forårsaket og sprangets høyde. Hvis sprangets høyde er Δu og den tilsvarende endringen av stasjonær verdien er Δy , så blir forsterkningen lik

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1.3)$$

Eller uttrykt på en annen måte:

$$\Delta y = K \Delta u \quad (1.4)$$



Figur 1.9: Prosessens sprangrespons $y(t)$ etter et sprang i u med høyde $\Delta u = 2$ volt. (Spjeldåpningen er 40 grader.)

Fra sprangresponsen vist i figur 1.9 finner vi

$$K = \frac{8,0^\circ\text{C}}{2V} = 4,0^\circ\text{C}/V$$

Tidskonstanten τ er tidsintervallet fra det tidspunktet der vendepunktets tangent krysser utgangens stasjonærverdi før spranget, til det tidspunktet der tangenten krysser sprangresponsens stasjonærverdi. Tidskonstanten er egentlig definert kun for 1. ordens systemer (som er systemer beskrevet ved en 1. ordens differensiallikning), og definisjonen her er en tillempning av den opprinnelige definisjonen. Vi skal komme inn på det litt senere i dette underkapitlet.

En annen definisjon av tidskonstanten er at den er 63%-stigetiden, regnet fra det tidspunktet der sprangresponsen begynner å stige, til den har nådd 63% av sin stasjonærverdi.⁴ For 1. ordens systemer gir de to definisjonene identiske τ , men for andre typer systemer kan det bli en forskjell.

For å understreke at vi mener det ene og ikke det andre, kan vi bruke betegnelsen *tangent-stigetiden* om den første definisjonen av tidskonstanten og *63%-stigetiden* om den andre.

For sprangresponsen vist i figur 1.9 finner vi at tangent-stigetiden er

$$\tau = 0,57 \text{ sek}$$

⁴ Jeg skal senere forklare bakgrunnen for det merkelige tallet 63.

mens 63%-stigetiden er

$$\tau = 0,38 \text{ sek}$$

θ

Tidsforsinkelsen θ er tiden fra spranget ble satt på til responsen blir merkbar. Her er tidsforsinkelsen⁵ regnet frem til tidspunktet der vendepunktets tangent krysser tidsaksen. Fra figur 1.9 finner vi

$$\theta = 0,22 \text{ sek}$$

Det er noen ganger hensiktsmessig å snakke om *responsiden* T_r , som er tiden fra sprangets begynnelse til sprangresponsen har nådd 63 % av sin stasjonærverdi. For vår prosess blir responsiden lik summen av tidsforsinkelsen og 63%-stigetiden, d.v.s.

$$T_r = \tau + \theta = 0,22 + 0,38 = 0,60 \text{ sek} \quad (1.5)$$

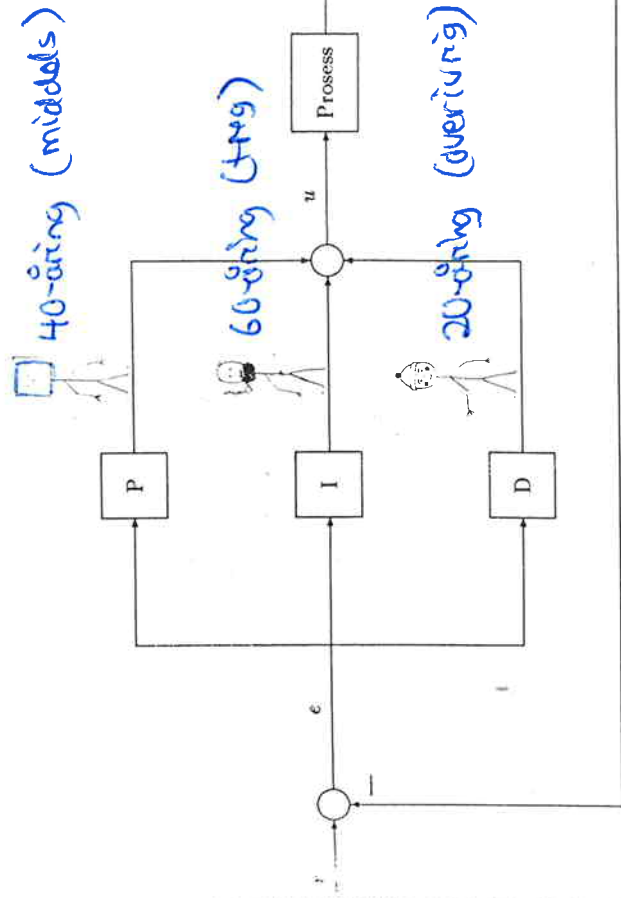
Det fine med varmlufttrøret er at det har de samme karakteristiske trekkene som mange andre virkelige prosesser har, og den sprangresponsen som er vist i figur 1.9 er nok så typisk m.h.t. formen. Kurven vist i figur 1.9 betegnes Σ -kurve (sigma-kurve) (p.g.a. kurveformen). Den kalles også prosessreaksjonskurve (process reaction curve).

I mange prosesser er det gjennomstrømming av væske eller gass, akkurat som i varmlufttrøret. Det viser seg at K , T og τ endrer seg hvis gjennomstrømmingen gjennom prosessen endrer seg. La oss se hva som skjer når (luft)gjennomstrømmingen blir mindre (spjeldåpningen mindre). Vi lar spjeldåpningen nå være 10 grader, mot tidligere 40 grader. Figur 1.10 viser den nye sprangresponsen. For sammenlikningens skyld er også sprangresponsen for 40 graders spjeldåpning vist. Fra figuren ser vi at den reduserte gjennomstrømmingen har medført at K , T (såvel tangent-stigetiden som 63%-stigetiden) og τ alle har fått en større verdi. (Dette skal vi snart se også ut fra prosessens matematiske modell.) Tabell 1.1 gir en oversikt over de forskjellige verdiene. Tabellen gir også opplysning om resonstiden for de to tilføtene. (Disse resultatene skal vi senere benytte for å forklare hvorfor reguleringsystemets stabilitetsegenskaper blir forverret når gjennomstrømmingen avtar.)

Matematisk modellering

Vi skal nå utvikle en matematisk modell for prosessen (varmlufttrøret). Modellen vil vi senere bruke bl.a. ved analyse av temperaturreguleringsystemer for prosessen.

⁵ Også kalt dødtid eller transportforsinkelse.



Figur 1.31: P-, I- og D-virkningen.

- PD-regulatoren ved å sette $T_i = \infty$ eller så stor som mulig.
- P-regulatoren ved å sette $T_d = 0$ og $T_i = \infty$.

Tabellen viser *ideelle* regulatorfunksjoner. I praksis bør integralleddet og derivatleddet modifiseres ved at det innføres såkalt integratorbegrensning hhv. begrenset derivasjon. Dette beskrives i underkapitlet *Praktiske regulatoralgoritmer*.

I engelskspråklige håndbøker kalles PID-regulatoren *3-mode controller*, mens PI- og P-regulatoren kalles hhv. *2-mode-* og *1-mode controller*. Vi kan også se at *3-term-* brukes i stedet for *3-mode-*, o.s.v.

Proporsjonal-, integral- og derivatvirkningens natur. Figur 1.31 gir en illustrasjon. Proporsjonalvirkningen tas hånd om av en person som har fått beskjed om å sende ut like mye (pådrag) som det han mottar (reguleringsavvik), dog forsterket eller forminsknet. Han legger ikke inn noe ekstra pådrag selv om han ser at avviket holder seg konstant og forskjellig fra null. Han holder seg strengt til det han har fått beskjed om, og nekter å vurdere om det kanskje hadde vært bedre med litt mer eller litt mindre pådrag i visse situasjoner. Han er litt firkantet.

60 KAPITTEL 1. GRUNNKURS I REGULERINGSTEKNIKK

PID-regulatorer

- Tilbakekopling med proporsjonalvirkning gir et statisk reguleringsavvik forskjellig fra null ved statisk modellfeil, men avviket blir mindre enn med bruk av foroverkopling alene.
- Tilbakekopling med integralvirkning gir null statisk reguleringsavvik ved statisk modellfeil.
- Derivatvirkningen gir bedre dynamisk ytelse, men har ingen betydning for den statiske ytelsen.

Kort sagt: Integralvirkningen forbedrer den statiske ytelsen, mens derivatvirkningen forbedrer den dynamiske ytelsen.

Oversikt over standardregulatorene. P-, PI-, PID- og PD-regulatoren kalles *standardregulatorer*. Tabell 1.7 viser regulatorfunksjonene.

Betegnelse	Regulatorfunksjon
P-regulator	$u = u_0 + K_p e$
PI-regulator	$u = u_0 + K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e d\tau$
PD-regulator	$u = u_0 + K_p e + K_p T_d \dot{e}$
PID-regulator	$u = u_0 + K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e d\tau + K_p T_d \dot{e}$

54-75

Tabell 1.7: Standard regulatorfunksjoner. e er reguleringsavviket. u er pådraget. u_0 er det nominelle pådraget (utelates ofte når de forskjellige regulatorfunksjonene oppgis). K_p er forsterkningen. T_i er integraltiden. T_d er derivattiden.

I alle kommersielle regulatorer er det implementert en PID-regulator. Fra PID-regulatoren får vi

- PI-regulatoren ved å sette $T_d = 0$.

Integralvirkningen tas hånd om av en rolig, sindig kar. Han reagerer ikke så brått dersom reguleringsavviket skulle øke, men justerer allikevel pådraget inntil han ser at avviket er blitt null. Det at han ikke handler så raskt, kan medføre at han ikke skrur pådraget ned i tide når avviket nærmer seg null. Det kan gi oversving på prosessutgangen.

Derivatvirkningen tas hånd om av en som er av den ivrige typen. Straks han ser at reguleringsavviket øker, skrur han pådraget kraftig opp. Og når avviket avtar, skrur han det kraftig ned. Det gjør at prosessutgangen reagerer både raskt og dempet når det er en endring i avviket (hvilket kan skyldes en endring i referansen eller forstyrrelsen). Han handler imidlertid bare når avviket øker eller avtar og tror ellers at alt er såre vel, d.v.s. at avviket er null, men det trenger det jo ikke å være.

Hver for seg har nok de tre karene sine svakheter, men når de jobber sammen, som i PID-regulatoren, utfyller de hverandre godt.

Av/på-regulator

Standardregulatorne har kontinuerlige regulatorfunksjoner. I primitive reguleringsystemer brukes ofte en *av/på-regulator*, som har en diskontinuerlig regulatorfunksjon. Den virker slik:

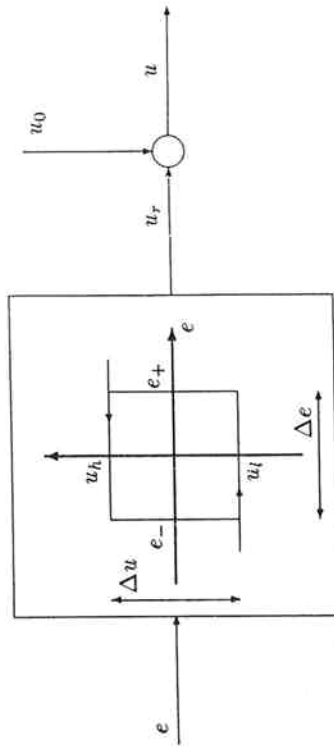
- Sett $u = u_h$ (høy) når reguleringsavviket er mindre enn null.
- Sett $u = u_l$ (lav) når reguleringsavviket er større enn null.

Pådraget vil "stå og slå" mellom u_h og u_l . Oscillasjoner i prosessutgangen er vanligvis ikke til å unngå, men det kan tenkes at amplituden er så liten at oscillasjonene kan tolereres. For bl.a. å redusere frekvensen på oscillasjonene, kan det legges inn et dødbånd i regulatorfunksjonen. Regulatorfunksjonen realiserer da en *hysterese-funksjon*, mens det er en *reléfunksjon* hvis dødbåndet er null. Se figur 1.32.

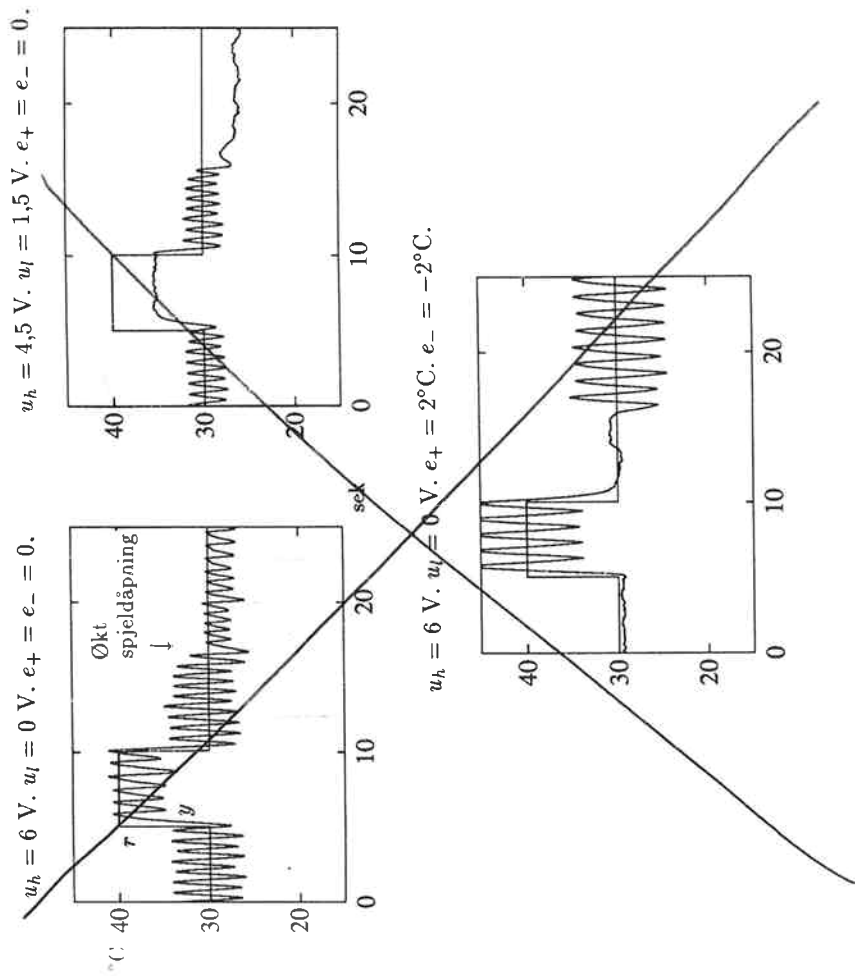
Vi kjenner igjen av/på-regulatoren fra visse temperaturreguleringsystemer der kravet til ytelse ikke er så stort. Tenk bare på termostatregulering av kjølevæsken i en bilmotor eller på termostatregulering av romtemperaturen. Termostaten er en av/på-regulator.

~~Jeg har prøvd av/på-regulatoren på varmlufttrøret. Betingelsene var de samme som for de andre regulatorene. Figur 1.33 viser temperaturen y for forskjellige parameterverdier. De viktigste resultatene er som følger.~~

- ~~Det typiske er at prosessutgangen (temperaturen) oscillerer uten demping.~~



Figur 1.32: Regulatorfunksjonen for en av/på-regulator. Δe er dødbåndet. u_0 er det nominelle pådrag.



Figur 1.33: Eksperimenter med bruk av en av/på-regulator. (Det nominelle pådraget u_0 er 3 volt.)