

# Slik skal du tune dine PID-regulatorer

Ivar J. Halvorsen

SINTEF Elektronikk og kybernetikk,  
Reguleringsteknikk

**PROST temadag**  
**Tirsdag 22. januar 2002**  
**Granfos Konferansesenter, Oslo**

## Innhold

- Hva er regulering og tuning
- Enkle regler - eksempel med nivåregulering
- Viktige prinsipper - Stabilitetsmargin/Ytelse
- Verktøy for systematisk tuning - MultiTune

## Hvorfor har vi regulatorer med tilbakekobling ?

- Stabilisere prosessen
- Kompensere for modellusikkerhet
- Undertrykke effekten av ukjente forstyrrelser

## Hva er “tuning” i teorien?

Tuning er det siste elementet i en rekke av beslutninger:

- Prosessdesign
- Instrumentering (målinger og aktuatorer)
- Reguleringsstrukturdesign (hva som er pådrag og målinger, samt formålet med reguleringen)
- Regulatordesign (hvilke regulatorer, MPC, PID, FF)
- Tuning: Bestemme optimale regulatorparametre

## Tuning av PID regulatorer:

- Bestemme optimale parameterverdier (for PID:  $K_p$ ,  $T_i$  ..) som oppfyller:
  - tilstrekkelig stabilitetsmargin
  - holder avvik innefor spesifiserte grenser
  - for de forstyrrelser og modellusikkerheter som kan forekomme for de operasjonsregimer som er aktuelle
- Mulig resultat begrenses av:
  - Designbeslutninger som er gjort tidligere (f.eks instrumentering)
  - Tilgjengelig informasjon om prosessen, (modell, forstyrrelser)
  - Spesifikasjoner
  - Fundamentale egenskaper i prosessen, som f.eks tidsforsinkelser og nullpunkter i høyre halvplan

## Foroverkobling / Tilbakekobling (PID)

- |   |  |
|---|--|
| ↓ Kan ikke flytte poler, dvs  | ↑ Kan brukes til stabilisering, dvs  |
| ↓ Kan ikke endre dynamikk   | ↑ Kan endre dynamisk oppførsel   |
| ↓ Kan kun være tilstrekkelig alene med meget god prosessmodell          | ↑ Kan være tilstrekkelig alene   |
| ↑ Kan kompensere for målte forstyrrelser før noe har skjedd på utgangen | ↑ Krever ingen modell  |
| ↑ Påvirker ikke stabilitet  | ↓ Kan ikke begynne å kompensere for forstyrrelser før effekten er synlig på utgangen |
|   | ↓ Stabilitetsmarginen begrenser hvor mye forstyrrelser kan undertrykkes.             |

Bruk tilbakekobling for best mulig dynamisk oppførsel først.  
Bruk foroverkoblinger hvis det fortsatt er nødvendig.

## Hva er “tuning” ofte i praksis?

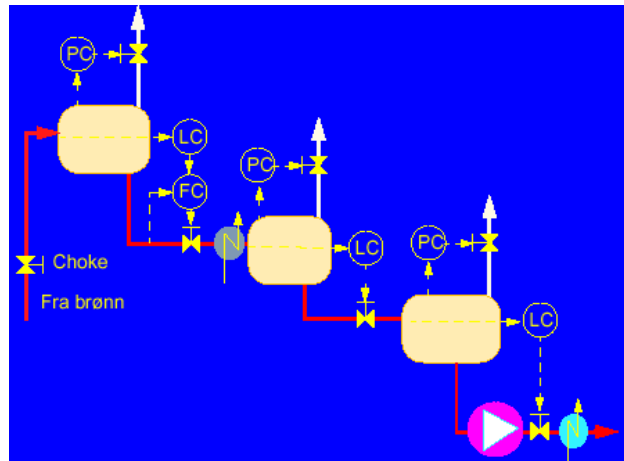
- Justere litt ved å skru opp og ned på regulatorparametre til det ser litt bedre ut.
- Noen tar fram læreboka og prøver f.eks Ziegler Nichols metode, eller andre litt mer moderne regler.
- Noen bruker autotuneren sin (som ofte også må tunes før den virker slik den er tiltenkt)

Normalt klarer alle å forbedre responsen litt, men takler vi produksjonsendringen som kommer neste uke?

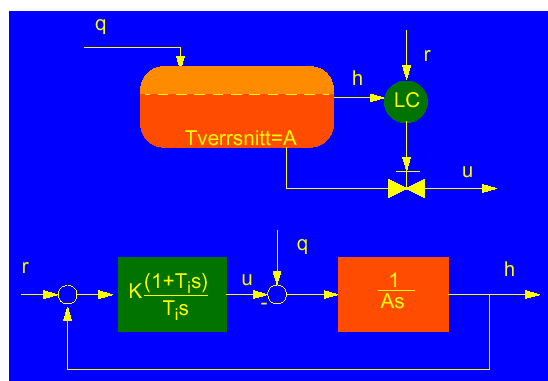
## Problemstillinger før tuning?

- Hvem har ansvaret for regulatorparametrene i bedriften?
- Er det egentlig et tuningsproblem eller et prosessproblem?
  - Hvordan er kravene til regulering spesifisert?
  - Kan vi kvantifisere mulige forstyrrelser?
  - Kjenner vi prosessen (modell)?
  - Er målingene gode nok ?
  - Har vi nok pådragseffekt ?
  - Er det sterke ulineariteter ?
  - Er det fornuftig med PID regulatorer her?
  - Er det forstyrrelsen det er noe galt med (f.eks en annen sløyfe)
  - Blir regulatoren riktig operert?
- Har vi de nødvendige verktøy for jobben ?

## Eksempel: Regulering i et oljetog



## Nivåregulering i en separator



## Problemstillinger

- Presist nivå eller demping av variasjoner i strømning?
- Hva er typiske forstyrrelser ?
- Hva er typiske måleproblemer ?
- Hvordan endrer prosessen seg ved ulike driftssituasjoner?
- Hva begrenser båndbredden?
- Hva skjer hvis forsterkningen reduseres i PI-regulatoren ?
- Hva kan vi gjøre for å unngå pendlinger i nivået?
- Hva med foroverkoblinger?
- Er ikke dette enkelt da ?

## Nivåregulering med P og PI-regulator, transferfunksjoner:

$$\text{PI: } \frac{h(s)}{q(s)} = \frac{\frac{T_i}{K}s}{\frac{T_i A}{K}s^2 + T_i s + 1} \quad \text{P: } \frac{h(s)}{q(s)} = \frac{\frac{1}{K}}{\frac{A}{K}s + 1}$$

Karakteristiske dynamiske egenskaper til 2. ordens systemet (PI):

$$\text{Resonansfrekvens: } \omega_0 = \sqrt{\frac{K}{AT_i}} \text{ og relativ demping: } \zeta = 0.5\sqrt{\frac{KT_i}{A}}$$

Merk **PRODUKTET** av K og  $T_i$  i uttrykket for relativ demping.  
Kritisk eller overkritisk demping ( $\zeta > 1$ ) krever at produktet av sløfeforsterkning ( $K/A$ ) og integraltid ( $T_i$ ) er over 4!  
Eller uttrykt som krav til integraltiden når A er gitt og K er valgt:

$$T_i \geq \frac{4A}{K} \text{ eller } T_i K \geq 4A$$

Eksempel på design av forsterkning ut fra maksimalt tillatt nivåavvik for et gitt step i forstyrrelse  $\Delta q$ :

For P-regulator har vi  $\Delta h_{maks} = \frac{\Delta q}{K}$

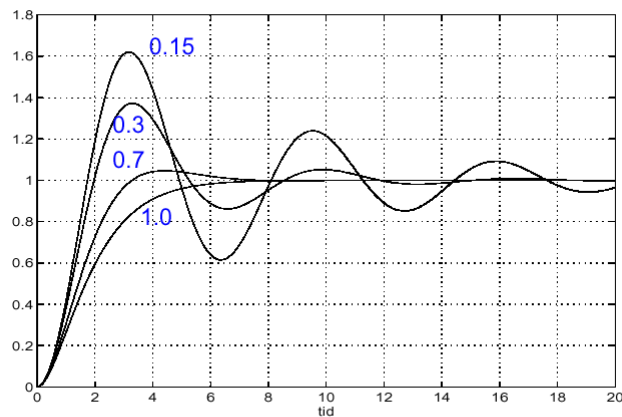
For PI-regulator er  $\Delta h_{maks} < \frac{\Delta q}{K}$

For kritisk dempet PI sløyfe  $\Delta h_{maks} = \frac{\Delta q}{\left(\frac{Ke}{2}\right)}$ , og går mot P for lang  $T_i$

Enkel regel for dette eksempelet:

1. Velg K ut fra kravet til forstyrrelsesundertrykking  $K > \frac{\Delta q}{\Delta h_{maks}}$
2. Hvis PI velges, Velg  $T_i$  slik at  $T_i \geq \frac{4A}{K}$

Steprespons ved ulik relativ demping. Obs: Her er  $\omega_0$  konstant !



Normalt vil begge størrelser variere når vi endrer PI parametre!

## Alternativ design

Velg transferfunksjon i regulator slik at vi får en ønsket transferfunksjon mellom flow inn,(q) og flow ut (=u).

$$\text{Anta vi ønsker følgende filtereffekt: } \frac{u(s)}{q(s)} = \frac{1}{(Ts+1)^2}$$

$$\text{Dette kan realiseres med følgende regulator: } \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_c}{T_f s + 1} \text{ (P+filter)}$$

$$\text{hvor } K_c = \frac{A}{2T} \text{ og } T_f = \frac{A}{4K_c} = \frac{T}{2}$$

**MERK: Ved betraktning av både PI og P + filter:**

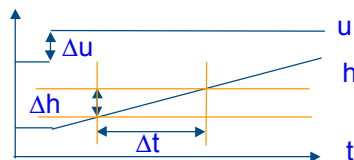
$$\frac{4A}{T_i} < K < \frac{A}{4T_f} \Rightarrow T_i > 16T_f$$

## Hvordan finner vi tverrsnittet A i praksis?

A er egentlig tverrsnittet i tanken i m<sup>2</sup>, men da må vi vanligvis beregne skaleringsfaktorer for h, og q for å få rett K<sub>p</sub>.

Eller, vi setter regulatoren i manuell (i steady-state) og setter på et step i pådraget ( $\Delta u$  f.eks 5 %) og tar tiden ( $\Delta t$ ) det tar for nivået ( $\Delta h$ ) å bevege seg tilsvarende antall %. Da er :

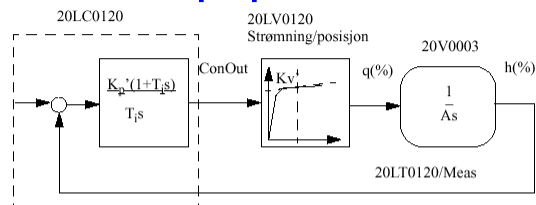
$$A = \Delta t \text{ [tidsenhet]} \quad (\text{eller egentlig } A = \Delta u / (\Delta h / \Delta t))$$



Da slipper vi å tenke på skalering, og kan bruke formlene direkte!



## Eksempel på ulineær effekt

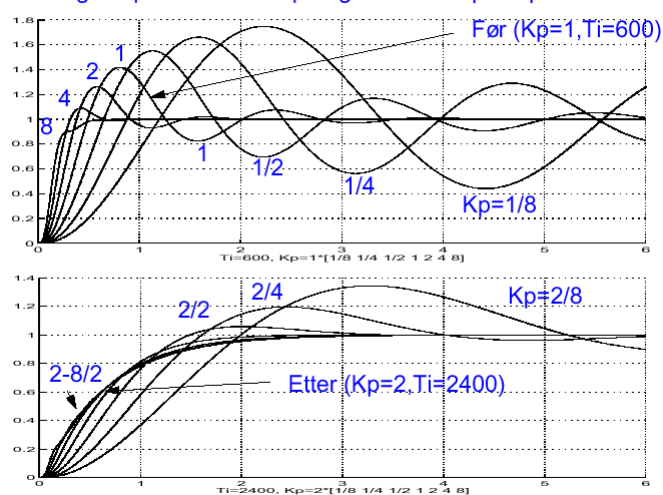


Får stor reduksjon i sløyfeforsterkning ved høy gjennomstrømming.

Kan aldri kompensere dette helt med ventilkarakteristikk.  
Størningskarakteristikken (ikke åpningskarakteristikken) vil alltid flate ut mot full åpning pga andre enheter i rørsystemet.

Problem-symptom: Langsomme pendlinger i nivåreguleringen

Strømningsresponser ut ved sprang i strøm inn på separatoren.



MORAL : Bruk laaaaang integraltid i PI regulatorer for nivåregulering

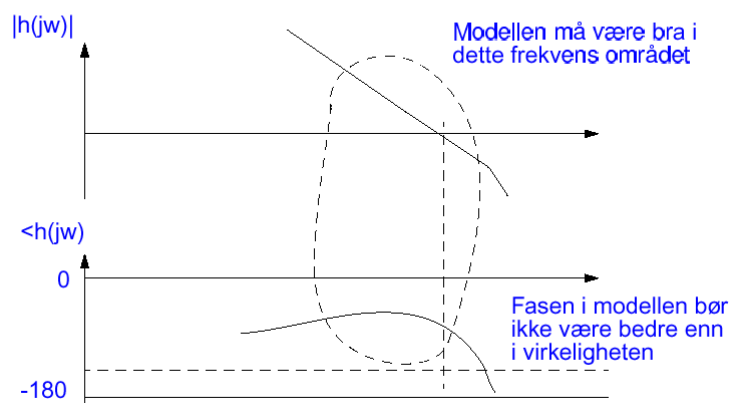
## Modellbasert design fra ønsket stabilitetsmargin

Fra Sigurds regler som gir ca 60° fasemargin (Basert på IMC)

|   | Modell g(s)   | P                                       | PI   | Kommentar                                   |
|---|---|---|--|---|
| 1 | $k \frac{e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$ (Flow)         | $K_c = \frac{0.5\tau}{k\theta}$         | $T_i = \min(\tau, 8\theta)$<br>Jfr 4 for stor $\tau$ | Ikke hjelp med D                            |
| 2 | $\frac{ke^{-\theta s}}{(\tau s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ | $K_c = \frac{0.5\tau}{k\theta}$         | $T_i = \tau$   | $T_d = \tau_2$<br>For 2. orden kan D hjelpe |
| 3 | $ke^{-\theta s}$                                    | Nei, ikke nok med bare P for ren dødtid | $K_c = \frac{0.25}{k}$<br>$T_i = \frac{\theta}{2}$   | Ikke hjelp med D                            |
| 4 | $k' \frac{e^{-\theta s}}{s}$ (Nivå)                 | $K_c = \frac{0.5}{k'\theta}$            | $T_i > 8\theta$<br>(Kan klare oss uten I)            | Jfr med $k' = \frac{k}{\tau}$ fra 1         |

Problem nr 1: Hvordan får vi tak i modellen for "vår" prosess?

## Viktige krav til modeller



## Robusthet

Ønsker at PID-innstillingen skal være gyldig i hele driftsområdet

Benytter prinsipper fra "Robust regulering"

Ved usikkerhet/ variasjon i både prosessforsterkning og dynamikk er det ikke tilstrekkelig å finne et "verste" arbeidspunkt og tune der.

Eksempel:

- Anta at både dominerende tidskonstant og forsterkning varierer i en 1. ordens prosess + dødtid
- Resultat fra tuning i to ytterpunkter gir ikke tilfredstillende regulering i det andre arbeidspunktet.
- En konservativ robust regulering benytter  $K_p$  fra den ene og  $T_i$  fra den andre.

## Kompromiss mellom ytelse og stabilitetsmargin

Typiske krav til sløyfeforsterkningen ( $K_0$ ) (Forenklet betraktning)

For tilstrekkelig ytelse:  $K_0 > K_{ytelse}$

For tilstrekkelig stabilitetsmargin  $K_0 < K_{stab}$

Sløyfeforsterkning  $K_0 = K_c K_{prosess}$

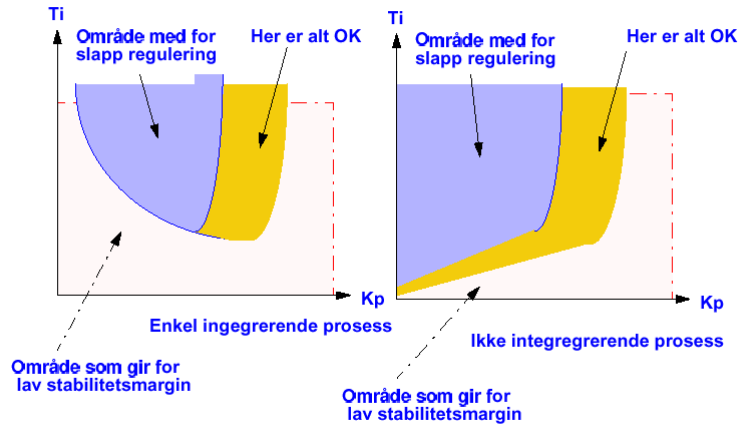
Anta prosessforsterkningen kan variere:  $K_{p, min} < K_{prosess} < K_{p, max}$

Det gir tillatt variasjonsområde for regulatorforsterkningen  $K_c$

$$\frac{K_{ytelse}}{K_{p, min}} < K_c < \frac{K_{stab}}{K_{p, max}}$$

*Kritisk situasjon hvis variasjonsområde for  $K_c$  er lite eller ikke finnes!*

## Mulig variasjonsområde for regulatorparametre



## Bruk av tuningsverktøy

- Autotunere er nyttige verktøy når de brukes riktig
- Alle styresystemer (nesten) har sin autotuner, men
  - Nesten alle tuner i et gitt arbeidspunkt
  - Tar ikke hensyn til ytelseskrav
  - Tar ikke hensyn til tidligere parametersett fra andre driftsområder

## SINTEF utviklet systematisk arbeidsmetodikk med MultiTune / MultiExcite

- **MultiExcite eksiterer reguleringsløyferne** på en måte som sikrer god informasjon om dynamikken i forskjellige driftssituasjoner.
- **MultiTune beregner optimale regulatorparametre** basert på alle data fra **MultiExcite**. Dette sikrer tilstrekkelig stabilitet, robusthet og ytelse for alle de **forskjellige driftssituasjonene**
- MultiTune kan også benyttes for å tune kaskader, foroverkoplinger, og dekoplinger.
- Anvendes både mot simulatorer og virkelige prosesser

## Hvilke resultater kan oppnås ved analyse/tuningsprosjekter?

- Systematisk gjennomgang av alle sløyfer
- Kartlegging av marginer for regulatorparametre
- **Avdekke mangler** og påpeke **potensielle problemer** med reguleringsystemet, f.eks:
  - mangler i logiske funksjoner, f. eks. nedstengnings-logikk,
  - valg av reguleringsstruktur,
  - plassering av reguleringsventiler og valg av karakterstikk.
- **Identifisere kritiske reguleringsløyfer** hvor det ikke er mulig å oppfylle alle krav til ytelse, stabilitet og robusthet
- Unngå unødig ekstra kompleksitet i reguleringsstrukturen
  - enkle standardsystemer er enklere å vedlikeholde

## Gevinstpotensiale (for direktøren)

- Rask og problemfri oppstart mot full produksjon
- Raskere omstillinger og mer fleksibel produksjon
- Reduserte behov for endringer i etter oppstart
- Høyere produksjonskapasitet og bedre produktkvaliteter (kan operere nærmere kritiske grenseverdier)
- Takler forstyrrelser bedre
- Bedre regularitet
- Færre alarmer og mindre belastning på operatører

## Konklusjon

- I praksis har PI-regulatorer alltid hatt liten oppmerksomhet fra ekspertene, på tross av suverene markedsandeler.
- Derfor er det ofte betydelig potensiale til bedre regulering med enkel tuning.
- Men, gjør mer ut av tuning enn bare å fikle litt
- Forstå hva som vil skje når du endrer parametrene, og bruk moderne verktøy som autotunere og simulatorer
- Forstå forskjell på stabil (polene pent plassert godt inne i venstre halvplan) og stasjonær drift (lite forstyrrelser)