

**AN-CNTL-13****PID-REGULERING OG JUSTERINGSTEKNIKKER**

Versjon 1

D. Mitchell Carr

23. april 1986

Norsk oversettelse

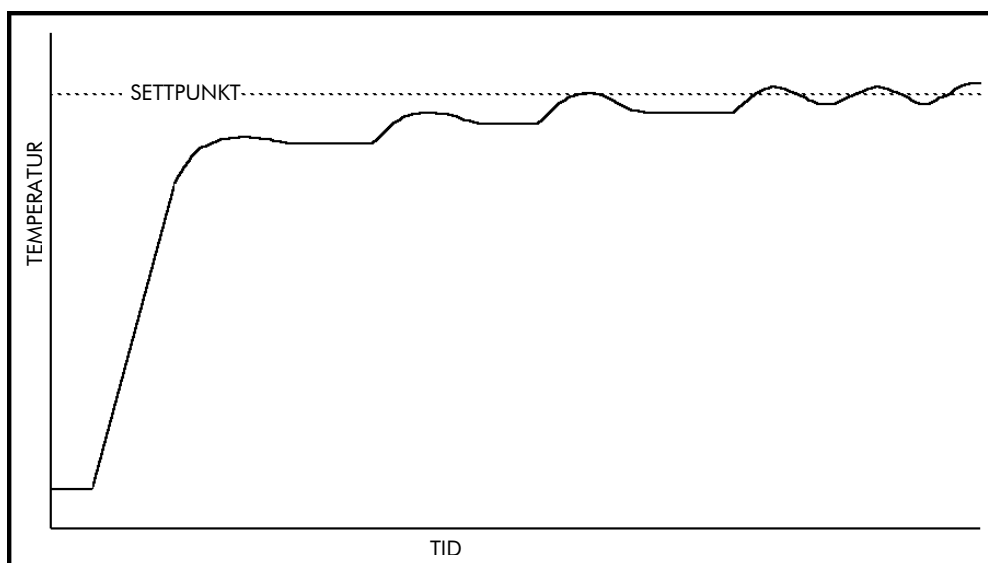
H. Slettvoll

31. januar 2012

Riktig justering av regulatorer er ikke bare avgjørende for riktig drift. Det gir også betraktelig bedre produktkvalitet, redusert vrak, kortere nedetid og penger spart. Prosedyrer for å justere konvensjonelle PID-regulatorer er vel etablerte og enkle å følge. Når en regulator erstattes må det nye instrumentet justeres inn på nytt. Noe som kan være vanskelig under visse driftsforhold. Nye regulatorer har digitale innstillinger for de tre reguleringsparameterne proporsjonalbånd, integral tidskonstant og derivativ tidskonstant. Dette gjør det enkelt å gjenskape riktige parameter-innstillingene når du bytter ut et instrument, men hjelper ikke om varmekilden er endret eller mekanikken i systemet er betydelig endret. I slike tilfeller må tilhørende regulator justeres inn på nytt for å sikre optimal ytelse.

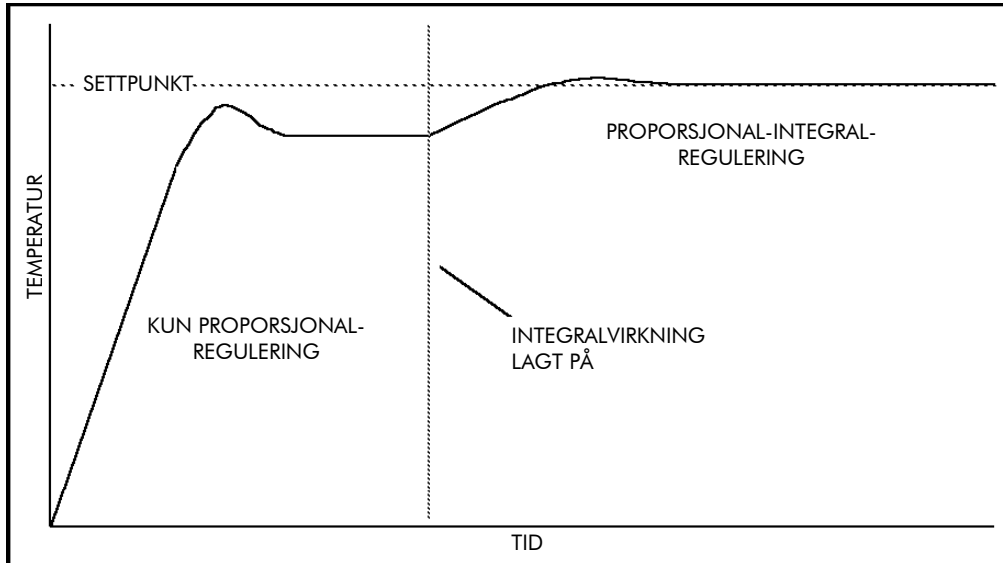
**PID-regulering**

De fleste konvensjonelle temperaturregulatorer, enten de er analoge eller mikroprosessor-basert, har tre justerbare parametere: P, I og D. Det vil si at reguleringsalgoritmen baserer seg på proporsjonal forsterkning, integrerende virkning og deriverende virkning. I noen tilfeller er en relativ kjøleforsterkning tilgjengelig, og mer raffinerte instrumenter kan også ha en parameter for å begrense oversving. Hva gjør disse parameterne?

**Figur 1: Kun proporsjonalregulering**

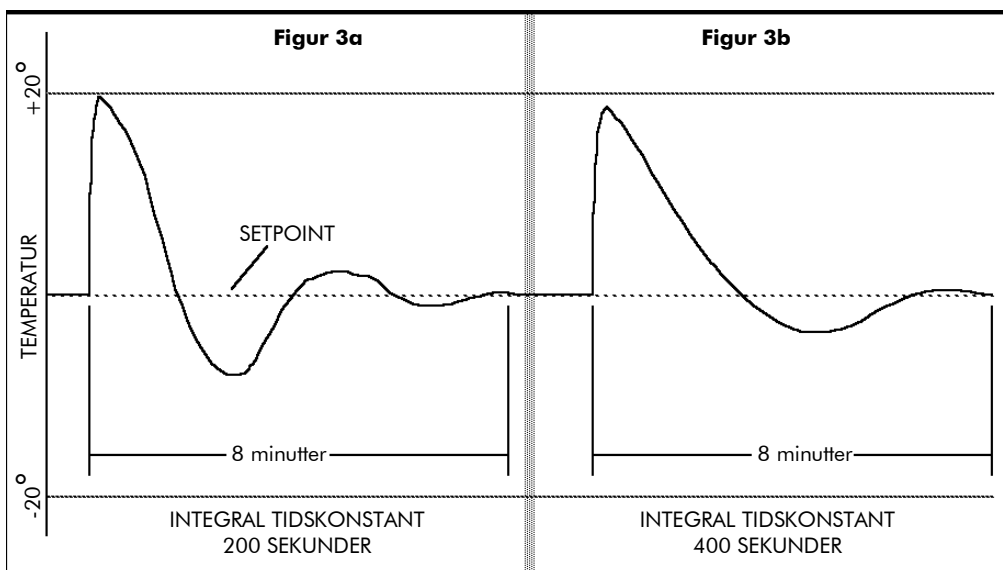
Forsterkning eller proporsjonalbånd som det ofte kalles, forsterker ganske enkelt avviket mellom settpunkt og målt verdi, for å etablere et utgangseffektnivå. Begrepet *proporsjonalbånd* uttrykker regulatorens forsterkning som prosentandel av instrumentets totale måleområde. 25 % PB tilsvarer forsterkningen 4; 10 % PB tilsvarer forsterkningen 10. Dersom man har en regulator med et måleområde på 1000 grader, så vil PB på 10 % definere et en reguleringsområde på 100 grader rundt settpunkt. Hvis den målte verdien er 25 grader lavere enn ønsket settpunktverdi, vil pådraget være 25 % varmeeffekt. Proporsjonalbåndet bestemmer størrelsen av responsen på et avvik. Hvis proporsjonalbåndet er for smalt, altså høy forsterkning, blir systemet over-følsomt, og begynner å oscillere. Et bredt proporsjonalbånd, lav forsterkning, gir et sløvt system hvor man kan få stor avdrift fra settpunktet. Den ideelle situasjonen oppnås når proporsjonalbåndet settes så smal som mulig uten å forårsake svingninger. Figur 1 viser effekten av å snevre inn proporsjonalbåndet helt til temperaturen begynner å oscillere. Denne reguleringssonen kommer opp i temperatur med 25 % PB, men da med et betydelig avvik mellom ønsket og faktisk temperatur. Etter som proporsjonalbåndet reduseres, vil temperaturen nærme seg settpunktet, til systemet til slutt ved PB 1,5 % blir ustabil og begynner å oscillere.

Integral, eller automatisk reset, er trolig den viktigste faktoren for god regulering rundt settpunkt. Integrasjonen påvirker sakte over tid pådraget fra regulatoren (utgangseffekt) som et resultat av avvik mellom settpunkt og målt verdi. Hvis målte verdi ligger under settpunkt, vil integrasjonsvirkningen gradvis øke pådraget i et forsøk på å rette denne feilen. Figur 2 viser virkningen av å introdusere integral. Først stiger temperaturen for så å flate ut like under settpunktet. Her er det brukt 6 % PB. Når temperaturen har stabilisert seg, innføres integral. Vi ser at temperaturen stiger ytterligere før den er på settpunkt. Justeringen av denne parameteren er vanligvis uttrykt på en av to måter; som en tidskonstant i enten minutter eller sekunder, eller, som en invers tidskonstant, uttrykt i 1/min. Dersom den er uttrykt som en tidskonstant, vil pådraget endres saktere jo lenger integral tidskonstant (jo færre repetisjoner/minutt, jo saktere respons). Dersom integralvirkningen settes til å være for rask kan det føre til at pådraget endres for fort, og dermed føre til oscillasjon ettersom regulatoren prøver å jobbe fortere enn lasten kan påvirkes. Omvendt vil en for lang integral-tidskonstant resultere i svært svak regulering. I figur 3a, gir et PB på 6 % og en integral-tidskonstant på 200 sekunder stabil stabil regulering ved settpunkt. En positiv 20-graders forstyrrelse resulterer i noen oversvingninger før den faller til ro. Figur 3b viser virkningen av en lignende forstyrrelse, men med en 400 sekunder integral tidskonstant. Forlenget integral tidskonstant gir betydelig tregere respons som vist.

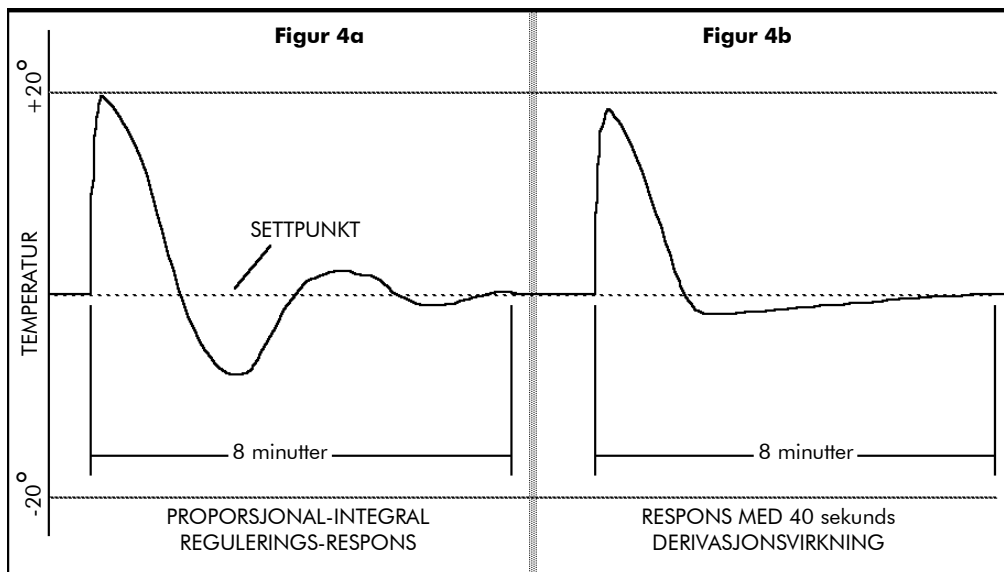


**Figure 2: Adding Integral action**

Derivasjon gir en rask endring i pådrag (utgangseffekt) som et resultat av brå endringer i målt verdi. Hvis den målte verdien synker raskt, vil derivasjonsvirkningen gi en stor økning av pådraget i et forsøk på å korrigere forstyrrelse før det går for langt. Derivasjonsfaktoren er trolig den mest misforståtte av de tre. Det er også den mest effektfulle for å gjenopprette fra små forstyrrelser. Den oscillasjonen som oppstår etter en forstyrrelse vist i Figur 4a er praktisk talt eliminert ved derivasjonsvirkning som vist i figur 4b. Der en 40 sekunders derivasjon lagt til de 6 % PB og 200 sekunders integral tidskonstant. Som med de to andre justeringsparametere, kan også denne feiljusteres. Derivatv oscillasjon er typisk svingninger som driver av fra settpunkt. Derivasjonstidskonstanten settes vanligvis til en verdi lik en sjettedel av integral-tidskonstanten.

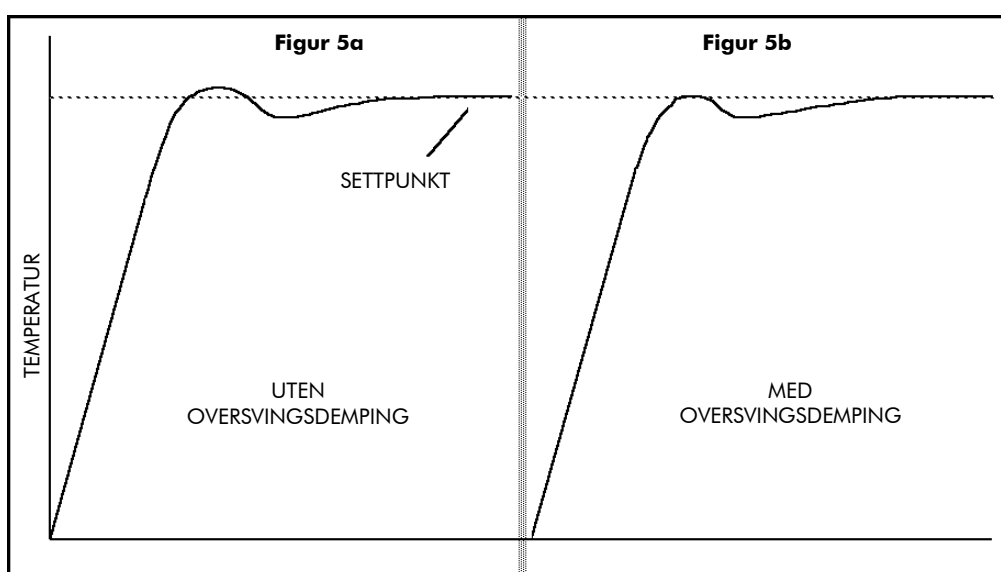


**Figur 3: Økning av integral tidskonstant**



**Figur 4: Derivasjonsvirkning**

Bruk av derivasjonsvirkning betraktes ofte feilaktig som oversvingsbegrensning snarere en transient-respons. Faktisk bør ikke derivasjon brukes til å dempe oversving ved oppstart. Dersom derivasjon skal brukes effektivt for å hindre oversving ved oppstart, vil det gå ut over ytelsen ellers. Enkelte nye mikroprosessor-baserte regulatorer har en separat parameter som kan justeres for å hindre oversving. Denne parameteren, ofte merket *Approach Control*, er uavhengig av de tre andre reguleringsparameterne og har ingen innvirkning på dem. Figur 5a og 5b viser registreringer av oppstartkurver for samme last. PID-justeringene er identiske i begge tilfeller, men *Approach Control*-parameteren er satt til en mer effektiv verdi i Figur 5b. Ved å bruke en variabel oversvingbegrensnings-parameter, kan systemet settes opp for optimal respons ved normal drift samtidig som oversving kan begrenses.



**Figur 5: Damping av oversving**

Uansett hvor grundig man forklarer PID-regulering og funksjonen til hver av de tre parametrene, blir det alltid en viss forvirring over hvordan det hele henger sammen. Her er et par vanlige spørsmål som pleier å dukke opp:

*1. Hvorfor fortsetter regulatoren min i gi pådrag selv om den faktiske temperaturen er over settpunkt?*

En PID-regulator fungerer på en svært jevn og gradvis måte, ved å utføre små endringer for å håndtere små avvik, og store kortevarighet endringer for å korrigere for raske forstyrrelser. Det er IKKE en AV/PÅ-regulator. En person som kjører bil kan brukes som et eksempel på en PID-regulator. Dersom føreren innser at han er litt over fartsgrensen, vil han gradvis minske trykket på gasspedalen. Dette er et eksempel på integral-virkning som sakte endrer pådraget for å korrigere for små avvik. Hvis sjåføren derimot får øye på en politiradar samtidig som han merknader at han er over fartsgrensen, vil han trække på bremsen for å unngå bot. Dette er et eksempel derivativ hendelse, der en forstyrrelse fører til en stor endring i pådraget for å hindre at en plutselig endring fører til at en mister kontroll. I eksempelet med sjåføren i en bil som overskrider fartsgrensen, vil sjåføren gradvis senke hastigheten på bilen ved å lette litt på trykket på gasspedalen. Tilsvarende, hvis PID-regulatoren leser en over-temperatur tilstand, vil den redusere varmpådraget litt for å bringe temperaturen ned. I lys av det innledende spørsmålet, "Hvorfor fortsetter regulatoren min i gi pådrag selv om den faktiske temperaturen er over settpunkt?"; hvis regulatoren helt stenger varmpådraget, vil temperaturen falle mot omgivelsestemperaturen, akkurat som føreren av en bilen må holde et visst gasspådrag for å holde bilen i gang.

*2. Ved oppstart, hvorfor avtar pådraget før settpunktet er nådd?*

Dersom 100 % varmpådrag påføres lasten kontinuerlig helt til den målte verdien har nådd nominell verdi, vil temperaturen få et kraftig oversving. Effekt må reduseres før temperaturen når settpunkt, noen ganger i god tid, for å forhindre oversving. Tenk igjen på sjåføren i bilen; hvis bilen står stille og du ønsker å kjøre i 80 km/h, trenger du ikke trykke gassen i bann til du kommer til 80 før du letter på trykket. Det vil garantert føre til en makshastighet godt over 80 km/h. Mange varmelaster vil gjerne oversvinge ved oppstart, og for å dempe dette, må pådraget reduseres i tide.

PID algoritmene kan implementeres litt forskjellig. Små variasjoner i ulike regulatorers algoritme, elektronikk eller programmering gir ulike egenskaper. Noen regulatorer kan ha god oversving-begrensning, eller kanskje bedre respons på endringer i settpunkt. Dette er faktorer som kan gjøre én regulator bedre enn en annen. I tillegg har innføring av mikroprosessorer bidratt til å øke fleksibiliteten. Mens for eksempel oversving-begrensning tidligere kunne være bygget inn som fast elektronikk i en analog regulator, kan dette nå være en justerbar parameter. Det finnes imidlertid ingen standardisering her, og hver instrumentprodusent har sin egen metode for innstillingen av eventuell parameter for oversving-begrensning.

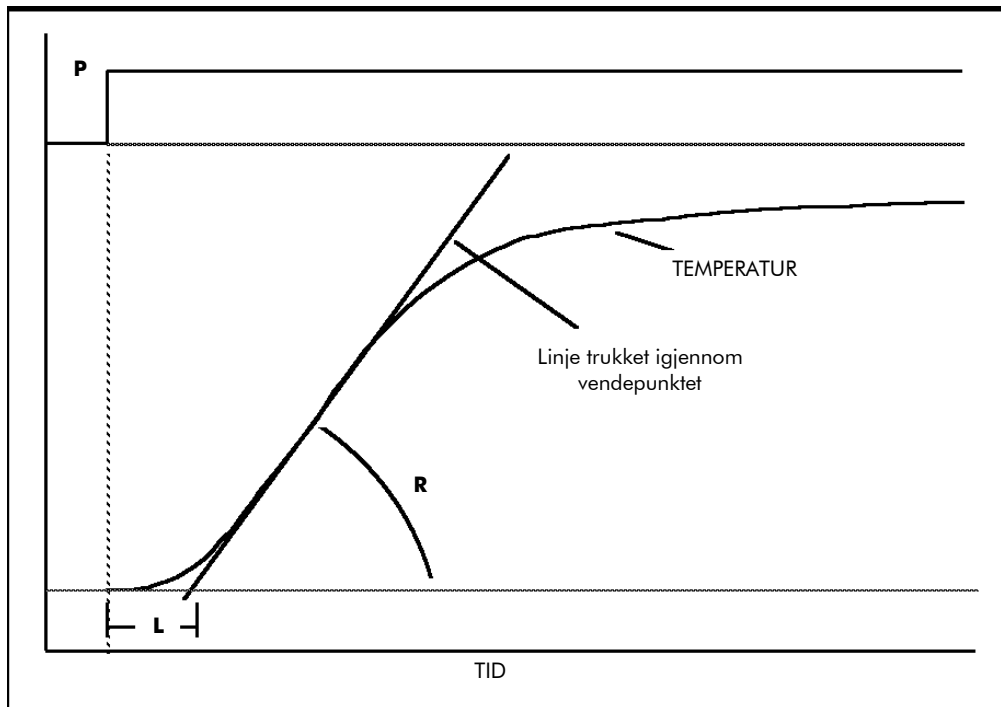
## **Klassiske justeringsmetoder**

Det finnes flere etablerte metoder for å justere inn reguleringsløyfer. De to vanligste er reaksjonskurvemetoden og den kalkulerende følsomhetsmetoden, eller Ziegler-Nichols metode, etter opphavsmennene J. G. Ziegler and N. B. Nichols som først formelt beskrev metodene i en artikkel i 1942. De to metodene ble opprinnelig foreslått som likeverdige, men den siste regnes altså som overlegen.

Optimal justering definert av J. G. Ziegler og N. B. Nichols som oppnådd når systemet reagerer på en forstyrrelse med et 4:1 (dempings)forhold for to etterfølgende amplituder. La oss si at det oppstår en forstyrrelse på +10 grader. Regulatoren får da følgelig et "undersving" på -10 grader etterfulgt av et "optimalt" oversving på +2,5 grader. Denne definisjonen av "optimal justering" kan ikke bestandig anvendes, så vurderinger må gjøres.

## **Reaksjonskurve**

En reaksjonskurve får man ved å ta fjerne regulatoren fra reguleringsløyfen (manuell modus), og gi en hurtig endring (trinn) i pådraget. Pådrag kan være en hvilken som helst passende sikker størrelse, og innføres når systemet ellers er stabilt, for eksempel ved romtemperatur. En grafisk logger bør brukes for å få ut en graf over den målte verdi som vist i Figur 6.



**Figur 6: Prosessreaksjonskurve - enkel**

Tiden  $L$  er tidsforsinkelse (Lag Time) som anses nødvendig for å overvinne den termiske treghet i lasten. En rett linje som tangerer reaksjonskurven i vendepunktet, vil ha en stigning  $R$ . Ut ifra disse to begrepene kan PID-verdiene beregnes av ligningene nedenfor.

$Pb = \left(\frac{RL}{P}\right) \cdot 100\% / (\text{spenn})$  Proporsjonalbånd er uttrykt som prosent av instrumentets målespenn, mens  $TI$  (integral) og  $TD$  (derivat) er tidskonstanter uttrykt i minutter eller sekunder.

$TI = 2L$   $P$  er det prosentvise effektnivå som ble benyttet som stegvis pådrag, delt på 100 % (uttrykt som en brøk).

Videre arbeid av G. H. Cohen og G. A. Coon, ga en grundigere evaluering av prosess-reaksjonskurven (figur 7).

$T$  = Endelig oppnådd temperaturendring etter pådragsendring  $P$ , uttrykt som prosentandel av instrumentets måleområde (spenn).

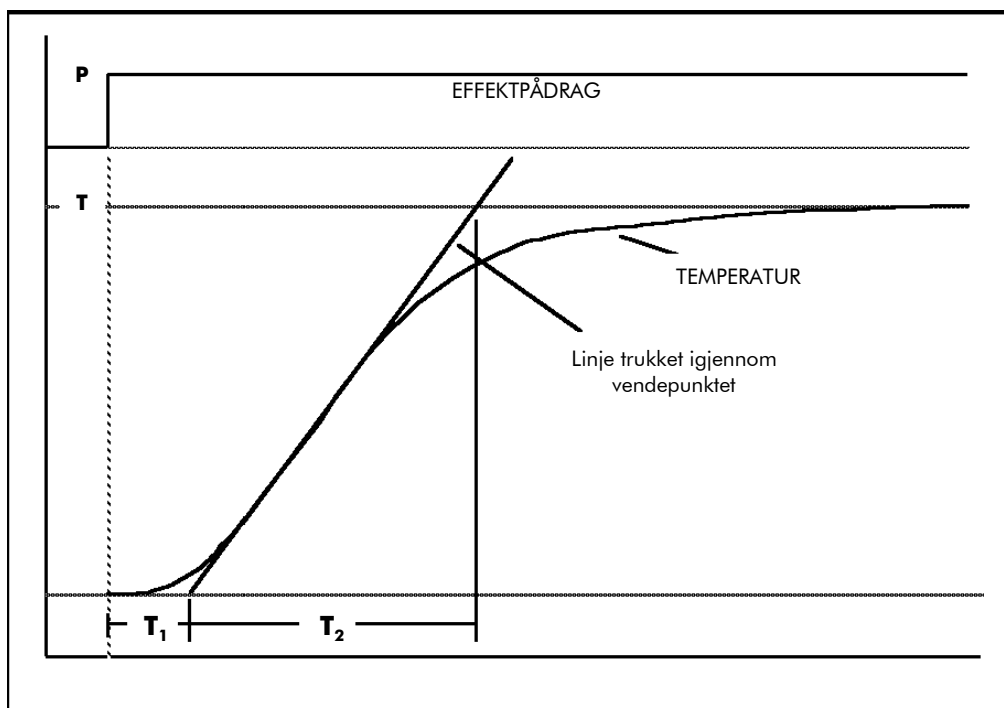
$P$  = Pådragsendring brukt for evalueringen, uttrykt som en prosentandel av maksimalt pådrag.

$$K = T/P$$

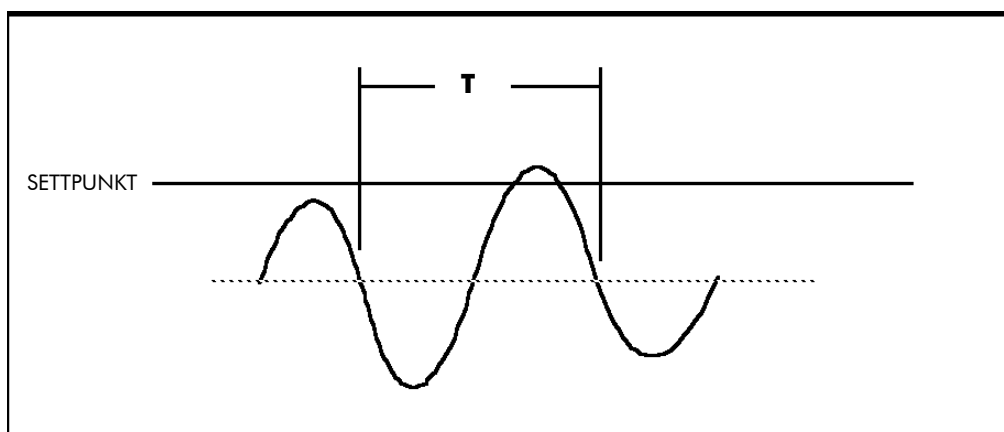
Igjen bør det bemerkes at målet her er å oppnå en 4:1 dempingsforhold, som kanskje ikke passer for alle applikasjoner. Øk proporsjonalbånd og Integral tidskonstanten for å redusere undersving og forlenge innsvingningstiden.

REGULATOR	PROPORTIONAL BAND <b>Pb</b>	INTEGRAL TIME CONSTANT <b>Ti</b>	DERIVATIVE TIME CONSTANT <b>Td</b>
PROPORSJONAL ( <b>P</b> )	$\frac{K \cdot T_1}{T_2(1 + T_1/3T_2)}$	1/T	1/T
PROPORSJONAL OG INTEGRAL ( <b>PI</b> )	$\frac{K \cdot T_1}{T_2(0.9 + T_1/2T_2)}$	$\frac{T_1(30 + 3T_1/T_2)}{9 + 20T_1/T_2}$	1/T
PROPORSJONAL OG DERIVAT ( <b>PD</b> )	$\frac{K \cdot T_1}{1.25T_2 + T_1/6}$	1/T	$\frac{T_1(6 - 2T_1/T_2)}{22 + 3T_1/T_2}$
PROPORSJONAL, INTEGRAL OG DERIVAT ( <b>PID</b> )	$\frac{K \cdot T_1}{T_2(1.3 + T_1/6T_2)}$	$\frac{T_1(32 + 6T_1/T_2)}{13 + 8T_1/T_2}$	$\frac{4T_1}{11 + 2T_1/T_2}$

**Table 1: Prosessreaksjonskurve justeringverdier**



**Figure 7: Prosessreaksjonskurve - utvidet**



**Figure 8: Selvsvingning**



## Selvsving – kalkulerende følsomhet

Ved å angi proporsjonalbånd til en svært liten verdi, kan man få en ren proporsjonalregulator (ingen integral- eller derivat-virkning) til å oscillere (egensvingninger) med en karakteristisk frekvens (Figur 8). Denne karakteristiske frekvensen gir en svært nøyaktig representasjon av systemets respons og derfor kan brukes til å utlede regulatorens tidskonstanter. Her er prosedyren skissert:

1. Koble bort integral- og derivatvirkningen på regulatoren.
2. Reduser Proporsjonalbåndet inntil reguleringsløyfen begynner å svinge. Mål svingetiden  $T$ .
3. Utvide Proporsjonalbåndet helt til prosessen er bare såvidt ustabil. Denne verdien av Proporsjonal Band er punktet for kritisk følsomhet.
4. Bruk Tabell 2 for å finne verdier for  $P_b$ ,  $T_I$  and  $T_D$ .

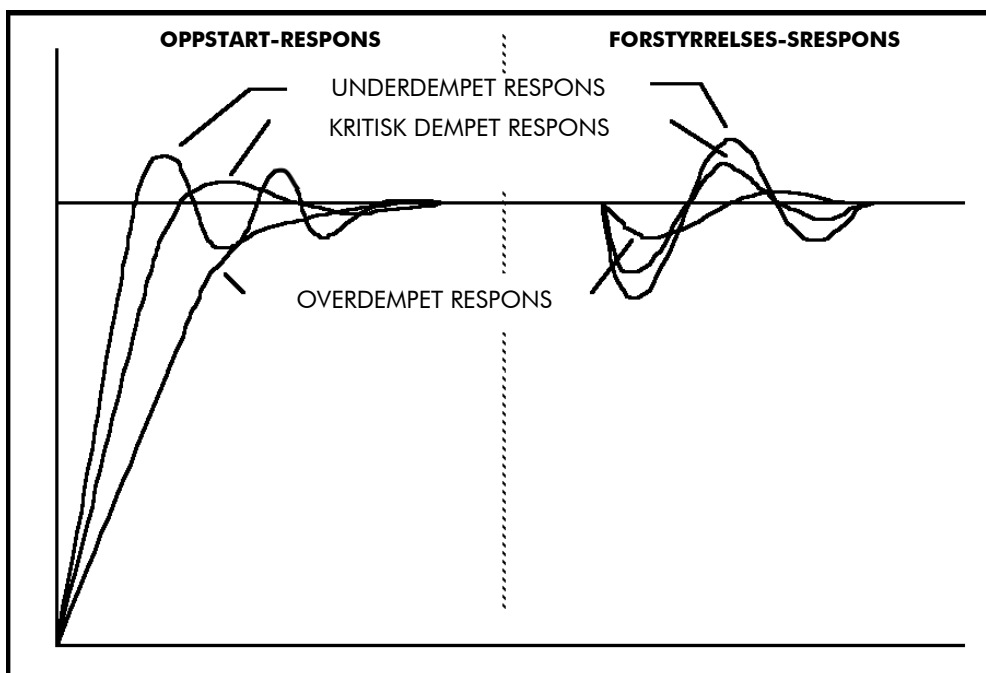
REGULATOR	PRPROORSJONAL- BÅND $P_b$	INTEGRAL TIDS- KONSTANT $T_I$	DERIVAT TIDS- KONSTANT $T_D$
PROPORSJONAL ( <b>P</b> )	$2P$	N/A	N/A
PROPORSJONAL OG INTEGRAL ( <b>PI</b> )	$2.2P$	$0.8T$	N/A
PROPORSJONAL, INTEGRAL OG DERIVAT ( <b>PID</b> )	$1.67P$	$0.5T$	$0.12T$

**Table 2: Kalkulerende følsomhet justeringsverdier**

Nok en gang bemerks at innstillingene gitt i tabellen gir regulering med 4:1 dempingsforhold, som kan gi for mye oversving for noen prosesser. Tabell 3 gir retningslinjer for å endre disse verdiene, ved bruk proporsjonal, integral og derivativ virkning.

REGULATOR	PRPROORSJONAL- BÅND $P_b$	INTEGRAL TIDS- KONSTANT $T_I$	DERIVAT TIDS- KONSTANT $T_D$
UNDERDEMPET	$P$	$0.5T$	$0.125T$
KRITISK DEMPET	$1.5P$	$T$	$0.167T$
OVERDEMPET	$2P$	$1.5T$	$0.167T$

**Table 3: Justering for ulike respons**



**Figure 9: Typiske responskurver**

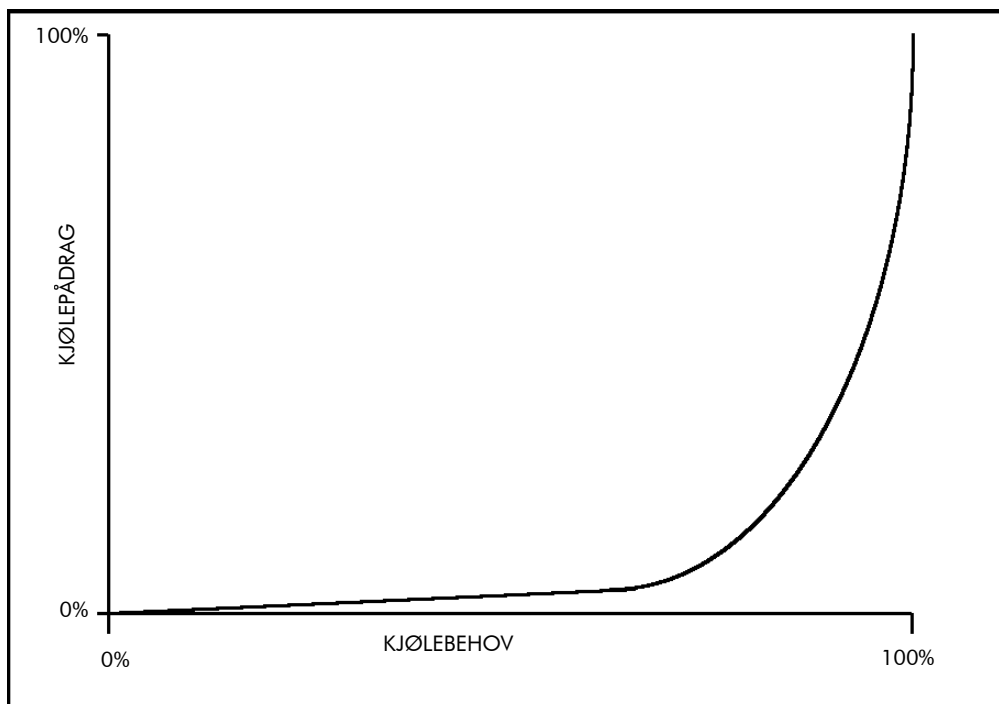
## Tvungen kjøling

Visse laster krever tvungen kjøling, enten for å overvinne den generert varme fra en eksoterm prosess, eller for å bringe temperaturen på lasten under omgivelses-temperaturen. I slike tilfeller kan kjøling oppnås enten ved syklisk drift en vifte eller ved å pulse en avkjølede væske, som olje eller vann, gjennom systemet. To ting må tas i betraktning for å sikre tilstrekkelig kjøling; at kjølingskilden drives korrekt, og at reguleringsløyfen er justert riktig for et system med kjøling.

## Lineær kontra ikke-lineære kjøling

Systemer som benytter tvunget luft for kjøling har en svært lineær respons. Ytterligere kjøling oppnås ved å la viften stå på lengre tid om gangen (større andel av syklustiden). Det finnes en rekke systemer som bruker pulserende vann til kjøling en last med arbeidstemperatur over kokepunktet. Et slikt system har en svært ikke-lineær karakteristikk. Dersom kun litt kjøling påtrykkes som korte pulser av vann, vil vannet straks fordampe og dermed trekke mye varme fra lasten på grunn av den latente varmen ved fordampingen. Den minste økningen i kjølevannstrømmen vil føre til en drastisk endring i kjølingen. Derfor bør forsterkningen i systemet være svært lav ved denne tilstanden. Etter som kjølebehovet i systemet øker, vil vannstrømmen øke til et punkt der vannet ikke lenger fordampes, men flyter. I denne tilstanden har ikke endring i kjølepådraget (vannstrømmen) så stor effekt lenger og dermed må forsterkningen i regulatoren økes for å kompensere for endringen i kjølesystemet

karakteristikk. Det finnes regulatorer med ikke-lineære kjøleutgang spesielt utviklet for å kompensere for dette problemet. (Se Figur 10).



**Figure 10: Ikke-lineær kjølekarakteristikk**

## Relativ kjøleforsterkning

Ettersom kjøling og varming utføres med to ulike pådragsystemer, vil de som regel ha helt ulik virkning og størrelsesforhold. Det vil for eksempel si at det kan være 10 kW tilgjengelig for oppvarming, og 20 kW til kjøling. Hvis regulatoren er innstilt for korrekt varming (som vanligvis er tilfellet), vil dette gi feil forsterkning for kjølefunksjonen. Siden kjøling og oppvarming vanligvis skjer på samme sted, vil lastens tidskonstanter være de samme, men siden størrelsesforholdet er ulikt, vil forsterkningen bli feil. Derfor har varme-/kjøleregulatorer en justering for relativ kjøleforsterkning. Den relative kjøleforsterkningen er en multiplikasjonsfaktor av proporsjonalbåndet, og brukes når regulatoren leverer kjøleeffekt. I eksempelet ovenfor, hvor det er 10 kW tilgjengelig til oppvarming og 20 kW til kjøling, vil proporsjonalbånd for oppvarmingen være upassende for kjøling. Regulatoren vil oscillere på grunn av for mye kjøling. I dette tilfellet må den relative kjøleforsterkningen settes til en verdi på 0,5, som altså reduserer forsterkningen med en faktor på to (utvide proporsjonalbåndet), og slik balansere kjøling og varming.

## Justering av kjøling

Hvis det ikke er nok kjøling fordi relativ kjøleforsterkning er for liten, vil temperaturen holde seg over settpunkt over lang tid, og vil være svært treg med å falle tilbake til settpunkt. I dette tilfellet, bør den relative kjøleforsterkningen økes. Kjølesvingninger gjenkjennes lett med sin forutsigbare oppførsel. Som vist i figur 11, vil temperaturen sakte stige over innstillingsverdi ettersom pådraget fra regulatoren gradvis minker. Etter hvert vil kjølingen føre til en rask nedgang i temperaturen, som igjen resulterer i en kraftig økning i effektbehovet tilbake til varmeområdet. Denne klassiske sykling mellom oppvarming og kjøling med sin karakteristiske sagtannbølgeform, vil kunne reduseres ved å senke relativ kjøleforsterkning.

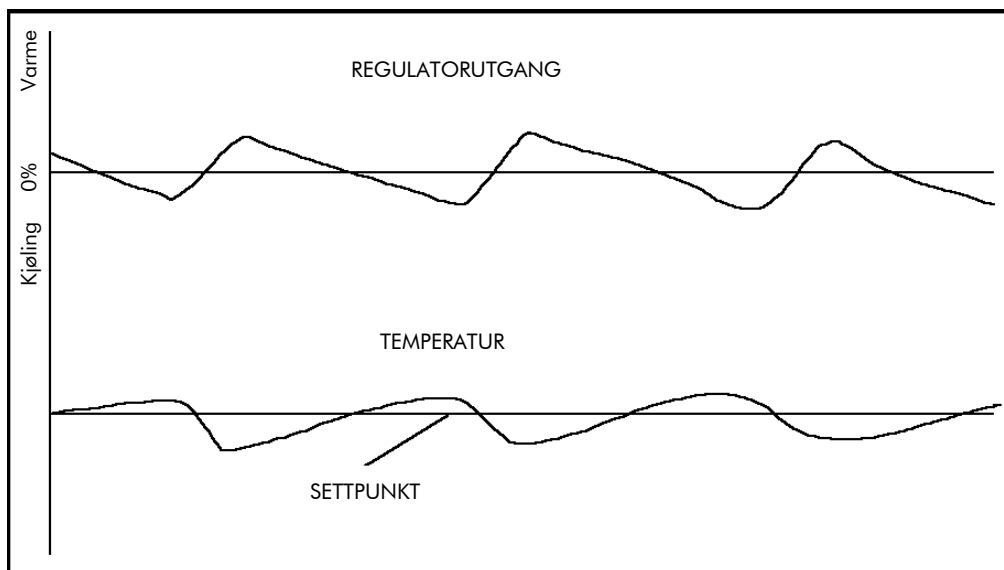


Figure 11: Kjølesvingninger

## Feilsøke PID-innstillinger

En kontroll sløyfe vil uansett kunne være litt ustabil og svinge litt. Dette kan skyldes det faktum at sløyfen aldri har blitt riktig innstilt eller at justeringsprosedyrene skissert ovenfor ikke helt egnede seg for denne aktuelle lasten. I slike tilfeller er det ikke nødvendigvis ønskelig å gjenta de noe omfattende prosedyrene. For raskt å "reparere" justeringen av regulatorsløyfen, kan man forsøke flere ting. Det første man bør gjøre er å sammenligne svingeperioden (referanse figur 8) med innstillingen for integral-tidskonstant. Integral-tidskonstanten bør være minst like lang som den svingeperioden. Dersom integral-tidskonstanten er kortere enn svingeperioden, bør den økes til minst denne verdien. Dersom sløyfen fortsetter å svinge, selv med en passende integralverdi bør proporsjonalbåndet økes for å eliminere oscillasjonen. Pass på at sonen ikke har kjølesvingninger (Figur 11).

Noen regulatorsoner har visse fysiske egenskaper som hindrer bruk av derivasjonsleddet. Selv om derivasjonsleddet er en stabiliserende faktor for de fleste varmelaster, så har laster transporttid som ikke kan stabiliseres med derivasjon. Dette vil for eksempel forekomme i et system der varmen blir transportert til lasten ved hjelp av en luftstrøm. Dersom man ikke oppnår stabil regulering med integrasjon og proporsjonalbånd som vist ovenfor, kan man prøve å minke eller fjerne derivasjonsleddet.

## **Kommentarer**

Begge de beskrevne teknikkene er vel etablerte og har vært brukt i mange år, men som med alt annet, det finnes ulemper knyttet til hver av dem. Selvsving-metoden eller kalkulerende følsomhet, ofte referert til som Ziegler-Nichols metode, innebærer å sette reguleringsløyfen i svingninger. Dette i seg selv kan være skadelig ettersom pendlingen innebærer gjentatte over- og undersving som i mange tilfeller kan bli for store. Cohen og Coons prosessreaksjonskurve-metode evaluerer prosessen nær omgivelsestemperaturen og vil derfor kunne gi et galt bilde av prosesseresponsen ved settpunkt. En prosess endrer ofte karakteristikk betraktelig når varmen stiger. For eksempel går noen ovner over fra konveksjonsvarming til strålevarming ved høyere temperaturer. Plastmaskiner oppfører seg på en helt annen måte når de er kalde enn ved driftstemperatur, full av materiale. Derfor er det ønskelig, om ikke nødvendig å justere en reguleringsløyfe ved driftstemperatur.