

# Reguleringsteknikk

*Finn Aakre Haugen*

16. juni 2014



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning til reguleringsteknikk</b>	<b>15</b>
1.1	Grunnleggende begreper . . . . .	15
1.2	Hva er regulering godt for? . . . . .	17
1.3	Motivasjon for bokens kapitler . . . . .	19
1.4	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	22
1.5	<i>Oppgaver</i> . . . . .	24
1.6	<i>Løsninger</i> . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Regulering med tilbakekopling</b>	<b>27</b>
2.1	Prinsippet for tilbakekoplet regulering. Eksempel: Regulering av dusjtemperatur . . . . .	27
2.1.1	Temperaturreguleringens virkemåte . . . . .	27
2.1.2	Implementering med industrikomponenter . . . . .	29
2.1.3	Teknisk flytskjema . . . . .	30
2.1.4	Blokkdiagram . . . . .	31
2.2	Eksempler på tekniske reguleringsystemer . . . . .	33
2.2.1	Innledning . . . . .	33
2.2.2	Eksempel: Nivåregulering av flistank . . . . .	34
2.2.3	Eksempel: Temperaturregulering av væsketank . . . . .	38

2.2.4	Eksempel: Posisjonsregulering av skip (dynamisk posisjonering – DP) . . . . .	39
2.2.5	Eksempel: Temperaturregulering av varmluftprosess (laboratoriemodell) . . . . .	42
2.3	Hvordan evaluere regulerings-systemets ytelse kvantitativt . . . . .	44
2.4	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	47
2.5	<i>Oppgaver</i> . . . . .	49
2.6	<i>Løsninger</i> . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Teknisk flytskjema</b>	<b>59</b>
3.1	Innledning . . . . .	59
3.2	Instrumentkoder . . . . .	60
3.3	Koder for prosessutstyr . . . . .	62
3.4	Lokalisering . . . . .	62
3.5	Materialstrømmer . . . . .	63
3.6	Signaler . . . . .	64
3.7	Komponenter . . . . .	65
3.7.1	Ventiler . . . . .	65
3.7.2	Pumper . . . . .	65
3.7.3	Varmevekslere . . . . .	65
3.7.4	Tanker og kolonner . . . . .	66
3.8	Matematiske funksjoner . . . . .	66
3.9	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	68
3.10	<i>Oppgaver</i> . . . . .	70
3.11	<i>Løsninger</i> . . . . .	72

**4 Komponentene i et reguleringsystem 73**

4.1	Innledning . . . . .	73
4.2	Automatiseringsutstyr . . . . .	75
4.2.1	Prosessregulator . . . . .	76
4.2.2	PLS'er . . . . .	80
4.2.3	PAC'er . . . . .	81
4.2.4	Styresystemer . . . . .	82
4.2.5	PC-basert styre- og overvåkingssystem . . . . .	86
4.3	Signalbehandling i automatiseringsutstyr . . . . .	88
4.3.1	AD-omsetter . . . . .	89
4.3.2	Måleverdiomregning . . . . .	92
4.3.3	Målefilter . . . . .	94
4.3.4	Regulatorfunksjonen . . . . .	101
4.3.5	Pådragsomregning . . . . .	102
4.3.6	DA-omsetter . . . . .	103
4.3.7	Pulsbreddemodulering . . . . .	104
4.4	Aktuatorer . . . . .	107
4.4.1	Innledning . . . . .	107
4.4.2	Reguleringsventiler . . . . .	107
4.4.3	Pumper . . . . .	111
4.4.4	Motorer . . . . .	114
4.4.5	Varmeelementer og varmetråd . . . . .	115
4.5	Signalformer og nøyaktighet i prosessmålinger . . . . .	117
4.5.1	Ulike former av målesignalet. Strømsløyfe . . . . .	117

4.5.2	Målenøyaktighet . . . . .	119
4.5.3	Måleoppløsning . . . . .	120
4.5.4	Kalibrering og justering . . . . .	120
4.6	Sensorer . . . . .	121
4.6.1	Temperatursensorer . . . . .	122
4.6.2	Trykksensorer . . . . .	127
4.6.3	Nivåsensorer . . . . .	128
4.6.4	Sensorer for væske- og gasstrøm . . . . .	131
4.6.5	Sensorer for gasskonsentrasjon . . . . .	141
4.6.6	Posisjonssensor . . . . .	142
4.6.7	Hastighetssensorer . . . . .	143
4.7	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	146
4.8	<i>Oppgaver</i> . . . . .	151
4.9	<i>Løsninger</i> . . . . .	160
<b>5</b>	<b>Reguleringsstrukturer basert på tilbakekopling</b>	<b>171</b>
5.1	Kaskaderegulering . . . . .	171
5.2	Forholdsregulering . . . . .	179
5.3	Split range-regulering . . . . .	181
5.4	Reguleringsstruktur for en prosesslinje . . . . .	182
5.5	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	189
5.6	<i>Oppgaver</i> . . . . .	191
5.7	<i>Løsninger</i> . . . . .	198
<b>6</b>	<b>Matematisk prosessmodellering</b>	<b>205</b>

<i>F. Haugen: Reguleringssteknikk</i>	7
6.1 Innledning . . . . .	205
6.2 Framgangsmåte for matematisk modellering . . . . .	206
6.3 Massebalanse . . . . .	208
6.4 Energibalanse . . . . .	211
6.5 Bevegelsesmodellering . . . . .	213
6.5.1 Translatorisk bevegelse . . . . .	213
6.5.2 Roterende bevegelse . . . . .	215
6.6 Elektriske sammenhenger . . . . .	218
6.7 <i>Sjekkliste</i> . . . . .	220
6.8 <i>Oppgaver</i> . . . . .	222
6.9 <i>Løsninger</i> . . . . .	226
<b>7 Regulering med foroverkopling</b>	<b>229</b>
7.1 Prinsipp og virkemåte for foroverkopling . . . . .	229
7.2 Eksperimentbasert foroverkopling . . . . .	231
7.3 Modellbasert foroverkopling . . . . .	237
7.4 <i>Sjekkliste</i> . . . . .	242
7.5 <i>Oppgaver</i> . . . . .	244
7.6 <i>Løsninger</i> . . . . .	247
<b>8 Prosessdynamikk</b>	<b>251</b>
8.1 Innledning . . . . .	251
8.2 Forsterkning . . . . .	251
8.2.1 Hvordan finne forsterkningen fra et eksperiment . . .	252
8.2.2 Hvordan finne forsterkningen fra en differensiallikningsmodell . . . . .	253

8.3	Tidskonstant . . . . .	254
8.3.1	Hvordan finne tidskonstanten fra eksperimentell sprangresponns . . . . .	254
8.3.2	Hvordan finne tidskonstanten (og forsterkningen) fra en differensiallikningsmodell . . . . .	256
8.4	Integrator (akkumulator) . . . . .	260
8.5	Systemer med tidsforsinkelse . . . . .	263
8.6	Systemer med sammensatt dynamikk . . . . .	265
8.7	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	266
8.8	<i>Oppgaver</i> . . . . .	269
8.9	<i>Løsninger</i> . . . . .	274
<b>9</b>	<b>PID-regulatoren</b>	<b>279</b>
9.1	Innledning . . . . .	279
9.2	Tidskontinuerlig PID-regulator . . . . .	280
9.3	Tidsdiskret PID-regulator . . . . .	282
9.3.1	Datamaskinbasert reguleringsystem . . . . .	282
9.3.2	Utleddning av tidsdiskret PID-regulator . . . . .	283
9.3.3	Virkemåten for tidsdiskret PID-regulator . . . . .	287
9.4	Målestøy og målefilter . . . . .	291
9.5	Integratorbegrensning (anti windup) . . . . .	294
9.6	Revers- og direktevirkning i regulatoren . . . . .	298
9.7	Alternativ til PID-regulator: Av/på-regulator . . . . .	300
9.8	<i>Sjekkliste</i> . . . . .	303
9.9	<i>Oppgaver</i> . . . . .	306
9.10	<i>Løsninger</i> . . . . .	312



<b>10 Innstilling av PID-regulatorer</b>	<b>317</b>
10.1 Innledning . . . . .	317
10.2 Ziegler-Nichols' svingemetode . . . . .	318
10.2.1 Originalmetoden . . . . .	318
10.2.2 Relaxed Ziegler-Nichols' metode . . . . .	324
10.2.3 Repetert Ziegler-Nichols' metode . . . . .	325
10.2.4 Relémetoden for å oppnå Ziegler-Nichols-svingninger	327
10.3 Relébasert autotuner . . . . .	332
10.4 Good Gain-metoden . . . . .	333
10.5 Skogestads metode . . . . .	337
10.5.1 Innledning . . . . .	337
10.5.2 Innstilling av PI-regulator for "integrator med tidsforsinkelse" . . . . .	340
10.5.3 Innstilling av PI-regulator for prosesser som tilnærmes med "integrator med tidsforsinkelse" . . . . .	344
10.5.4 Innstilling av PI-regulator for "ren integrator" . . . . .	348
10.5.5 Bruke derivatleddet? . . . . .	352
10.5.6 Innstilling av PID-regulator for "dobbelintegrator" . . . . .	352
10.6 Hvordan tilpasse regulatorparametrene til varierende prosessdynamikk . . . . .	356
10.6.1 Innledning . . . . .	356
10.6.2 PID-parameterjustering med Skogestads formler . . . . .	357
10.6.3 Gain scheduling . . . . .	358
10.6.4 Adaptiv regulator . . . . .	365
10.7 <i>Sjekkliste</i> . . . . .	367
10.8 <i>Oppgaver</i> . . . . .	370

10.9	<i>Løsninger</i>	379
<b>11</b>	<b>Reguleringsløyfers stabilitet</b>	<b>389</b>
11.1	Innledning	389
11.2	Parameterendringer som skaper stabilitetsproblemer	390
11.3	Bruk av Skogestads formler til å rette opp dårlig stabilitet	397
11.4	Stabilitetsmarginer	400
11.5	<i>Sjekkliste</i>	405
11.6	<i>Oppgaver</i>	407
11.7	<i>Løsninger</i>	409
<b>12</b>	<b>Simulering av reguleringsystemer</b>	<b>411</b>
12.1	Hva kan simuleringer brukes til?	411
12.2	Er resultatene fra simuleringer holdbare i virkeligheten?	413
12.3	Simuleringsverktøy	415
12.4	Simulering med blokkdiagrambaserte simuleringsverktøy	417
12.4.1	Innledning	417
12.4.2	Hvordan sjekke at simulatoren er korrekt implementert?	419
12.4.3	Modell av nivåreguleringsystemet	420
12.4.4	Matematisk blokkdiagram klart for implementering	422
12.4.5	Implementering i SIMULINK	423
12.4.6	Implementering i LabVIEW	429
12.5	<i>Sjekkliste</i>	435
12.6	<i>Oppgaver</i>	438
12.7	<i>Løsninger</i>	443

<i>F. Haugen: Reguleringsteknikk</i>	11
<b>A Noen matematiske prosessmodeller</b>	<b>445</b>
A.1 Flistank . . . . .	446
A.1.1 Beskrivelse av prosessen . . . . .	446
A.1.2 Matematisk modell . . . . .	446
A.1.3 Parameterverdier . . . . .	447
A.2 Væsketank med oppvarming . . . . .	448
A.2.1 Beskrivelse av prosessen . . . . .	448
A.2.2 Matematisk modell . . . . .	449
A.2.3 Parameterverdier for vanntank . . . . .	450
A.2.4 Parameterverdier for en bioreaktor . . . . .	450
A.3 Skip . . . . .	452
A.3.1 Beskrivelse av skipet . . . . .	452
A.3.2 Matematisk modell . . . . .	452
A.3.3 Parameterverdier . . . . .	454
A.4 Varmluftprosess . . . . .	454
A.4.1 Beskrivelse av prosessen . . . . .	454
A.4.2 Matematisk modell . . . . .	456
A.4.3 Parameterverdier . . . . .	457
<b>B Reguleringsteknikkens historie</b>	<b>459</b>
<b>C Formelliste</b>	<b>463</b>



# Forord

Velkommen inn i et fascinerende fagområde! Enkelt sagt dreier reguleringssteknikk seg om hvordan prosessmålinger og prosesskunnskap kan brukes til styring av fysiske prosesser slik at de oppfører seg slik vi ønsker. Noen eksempler på anvendelser: Reguleringssteknikken får temperaturen i en bioreaktor til å ligge på sin settpunktverdi  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  tross forstyrrelser fra omgivelsene i form av bl.a. varierende omgivelsestemperatur. Reguleringssteknikken får oljenivået og vannivået i olje/vann/gass-separatorene til å ligge på sine nivåsettpunkter og gassen på sitt trykksettpunkt tross variasjoner i olje/vann/gasstrømmen fra reservoaret. Reguleringssteknikken får posisjonen til et forsyningskip til å ligge på sin referanseposisjon til tross for varierende vind og strøm.

Som eksemplene antyder, kan reguleringssteknikk anvendes på ulike typer fysiske systemer. Reguleringssteknikk er viktig i industri, energiproduksjon, transport og på mange andre felter. Reguleringssteknikk er et utfordrende fag fordi det krever tverrfaglige kunnskaper – om måleteknikk, signalbehandling, matematiske reguleringsfunksjoner, pådragsteknikk, datateknikk, og kunnskap om de kjemiske, mekaniske eller biologiske prosessene som skal reguleres.

Målet med boken er å formidle kunnskaper om reguleringssteknikk som er tilstrekkelige for å forstå, utvikle og vedlikeholde praktiske reguleringsystemer. Det finnes reguleringsystemer som bygger på avansert teori, men de fleste systemene bygger på de relativt enkle prinsippene som beskrives i boken.

Bokens målgruppe er studenter og elever som skal lære grunnleggende reguleringssteknikk, samt praktiserende ingeniører.

Jeg har funnet det tilstrekkelig å bruke differensiallikninger som teoriverktøy i boken. I boken brukes differensiallikninger for representasjon av matematiske modeller (f.eks. energibalanse, massebalanse og bevegelseslikninger), ved analyse av prosessdynamikk (bl.a. definisjon av tidskonstant), ved beskrivelse av målefiltere og som grunnlag for implementering av simulatorer. Mine egne erfaringer fra praktiske reguleringsoppgaver tilsier at differensiallikninger utgjør et tilstrekkelig teorigrunnlag for å arbeide med praktisk reguleringssteknikk.

Til hvert kapittel er det oppgaver med detaljerte løsninger. Til hvert kapittel er det også en sjekklister som består av enkle spørsmål med svar.

Simulatorer i SimView-biblioteket og undervisningsvideoer i TechVids-biblioteket er fritt tilgjengelige på <http://techteach.no>. Simulatorer som er brukt i eksempler i boken, er angitt i fotnoter på de aktuelle stedene i teksten.

Jeg vil takke lærerkolleger, studenter og fagfolk som i forskjellige sammenhenger har gitt uttrykk hva de mener er viktige tema innen praktisk regulerings-teknikk. Disse synspunktene, sammen med mine egne erfaringer, har vært nyttige når jeg skulle bestemme innholdet og omfanget av denne boken.

Takk også til min familie for god støtte mens jeg har arbeidet med boken.

Boken er skrevet med dokumentverktøyet Scientific Word (MacKichan Software). Tegninger er tegnet med Visio (Microsoft), og simuleringer og beregninger er utført med LabVIEW (National Instruments) og MATLAB og SIMULINK (MathWorks). Bilder er gjengitt med tillatelse.

Litt om min bakgrunn: Jeg er utdannet sivilingeniør fra institutt for teknisk kybernetikk ved NTH (nå NTNU) og har en PhD-grad fra Høgskolen i Telemark. Jeg har undervist i regulerings-teknikk ved NTH og mange høgskoler, holdt et stort antall industrikurs, utført diverse utviklingsoppdrag og arbeider stadig med regulerings-tekniske problemstillinger. Jeg er ansatt som 1. am. ved Høgskolen i Telemark, der jeg underviser i regulerings-teknikk i bachelor- og masterutdanningene. Jeg er også engasjert i forskning på bl.a. matematisk modellering, optimalisering og regulering av bioreaktorer. I tillegg driver jeg enkeltmannsforetaket TechTeach.

De viktigste endringene i 2. utgave sammenliknet med 1. utgave er: Kapitlet Reguleringsstrukturer basert på tilbakekopling (nå nr. 5) og kapitlet Komponentene i et regulerings-system (nå nr. 4) har byttet plass. Temaet blokkdiagram for regulerings-system er flyttet fra kap. 3 til kap. 2. I kap. 10 inngår nå en ny metode for innstilling av PI-regulatorer kalt Relaxed Ziegler-Nichols' metode. I kap. 10 inngår nå en beskrivelse av hvordan Skogestad's formler for innstilling av en PI-regulator for prosesser med "integrator med tidsforsinkelse"-dynamikk kan brukes også på prosesser med "tidskonstant med tidsforsinkelse"-dynamikk. Temaet regulerings-systemers stabilitet utgjør nå et eget kapittel (nr. 11), som inkluderer bl.a. stabilitetsanalyse basert på stabilitetsmarginer som kan finnes eksperimentelt (uten den tradisjonelle frekvensresponsanalysen). Kjente feil i 1. utgave er selvsagt rettet opp.

Finn Aakre Haugen  
Skien, 2014