Finn Aakre Haugen

Reguleringsteknikk

2. utgave



FAGBOKFORLAGET

Reguleringsteknikk

Finn Aakre Haugen

FAGBOKFORLAGET

Copyright © 2019 by
Vigmostad & Bjørke AS
All Rights Reserved

1. utgave 2012
2. utgave 2014 / 1. opplag 2014

ISBN: 978-82-450-3080-8
ISBN (trykt): 978-82-450-1684-0

Tilrettelagt for e-bok: John Grieg, Bergen

Forsidedesign ved forlaget
Sats: Forfatteren

Spørsmål om denne boken kan rettes til:
Fagbokforlaget
Kanalveien 51
5068 Bergen
Tlf.: 55 38 88 00 Faks: 55 38 88 01
e-post: fagbokforlaget@fagbokforlaget.no
www.fagbokforlaget.no

Materialet er vernet etter åndsverkloven.
Uten uttrykkelig samtykke er eksemplarfremstilling
bare tillatt når det er hjemlet i lov eller avtale med Kopinor.

Innhold

1 Innledning til reguleringsteknikk **15**

1.1 Grunnleggende begreper 15

1.2 Hva er regulering godt for? 17

1.3 Motivasjon for bokens kapitler 19

1.4 *Sjekkliste* 22

1.5 *Oppgaver* 24

1.6 *Løsninger* 25

2 Regulering med tilbakekopling **27**

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 reguleringssystemer 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 reguleringssystemets ytelse kvantitativt . . 44

2.4 *Sjekkliste* 47

2.5 *Oppgaver* 49

2.6 *Løsninger* 55

3 Teknisk flytskjema **59**

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 *Sjekkliste* 68

3.10 *Oppgaver* 70

3.11 *Løsninger* 72

4 Komponentene i et reguleringssystem 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 *Sjekkliste* 146
4.8 *Oppgaver* 151
4.9 *Løsninger* 160

5 Reguleringsstrukturer basert på tilbakekopling 171

5.1 Kaskaderegulering 171
5.2 Forholdsregulering 179
5.3 Split range-regulering 181
5.4 Reguleringsstruktur for en prosesslinje 182
5.5 *Sjekkliste* 189
5.6 *Oppgaver* 191
5.7 *Løsninger* 198

6 Matematisk prosessmodellering 205

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 *Sjekkliste* 220
6.8 *Oppgaver* 222
6.9 *Løsninger* 226

7 Regulering med foroverkopling 229

7.1 Prinsipp og virkemåte for foroverkopling 229
7.2 Eksperimentbasert foroverkopling 231
7.3 Modellbasert foroverkopling 237
7.4 *Sjekkliste* 242
7.5 *Oppgaver* 244
7.6 *Løsninger* 247

8 Prosessdynamikk 251

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 differensialliknings-modell 253

8.3 Tidskonstant 254

8.3.1 Hvordan finne tidskonstanten fra eksperimentell sprangrespons 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 *Sjekkliste* 266

8.8 *Oppgaver* 269

8.9 *Løsninger* 274

9 PID-regulatoren **279**

9.1 Innledning 279

9.2 Tidskontinuerlig PID-regulator 280

9.3 Tidsdiskret PID-regulator 282

9.3.1 Datamaskinbasert reguleringssystem 282

9.3.2 Utledning 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 *Sjekkliste* 303

9.9 *Oppgaver* 306

9.10 *Løsninger* 312

10 Innstilling av PID-regulatorer **317**

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 *Sjekkliste* 367

10.8 *Oppgaver* 370

10.9 *Løsninger* 379

11 Reguleringssløyfers stabilitet **389**

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 *Sjekkliste* 405

11.6 *Oppgaver* 407

11.7 *Løsninger* 409

12 Simulering av reguleringssystemer **411**

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 nivåreguleringssystemet 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 *Sjekkliste* 435

12.6 *Oppgaver* 438

12.7 *Løsninger* 443

A Noen matematiske prosessmodeller **445**

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 Reguleringsteknikkens historie **459**

C Formelliste **463**

Forord

Velkommen inn i et fascinerende fagområde! Enkelt sagt dreier reguleringsteknikk 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: Reguleringsteknikken får temperaturen i en bioreaktor til å ligge på sin settpunktsverdi 35 ^{o}C tross forstyrrelser fra omgivelsene i form av bl.a. varierende omgivelsestemperatur. Reguleringsteknikken får oljenivået og vannivået i olje/vann/gass-separatorer til å ligge på sine nivåsettpunkter og gassen på sitt trykksettpunkt tross variasjoner i olje/vann/gasstrømmen fra reservoaret. Reguleringsteknikken får posisjonen til et forsyningsskip til å ligge på sin referanseposisjon til tross for varierende vind og strøm.

Som eksemplene antyder, kan reguleringsteknikk anvendes på ulike typer fysiske systemer. Reguleringsteknikk er viktig i industri, energiproduksjon, transport og på mange andre felter. Reguleringsteknikk 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 reguleringsteknikk som er tilstrekkelige for å forstå, utvikle og vedlikeholde praktiske reguleringssystemer. Det finnes reguleringssystemer 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 reguleringsteknikk, 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 reguleringsteknikk.

Til hvert kapittel er det oppgaver med detaljerte løsninger. Til hvert kapittel er det også en sjekkliste 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 reguleringsteknikk. 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 reguleringsteknikk ved NTH og mange høgskoler, holdt et stort antall industrikurs, utført diverse utviklingsoppdrag og arbeider stadig med reguleringstekniske problemstillinger. Jeg er ansatt som 1. am. ved Høgskolen i Telemark, der jeg underviser i reguleringsteknikk 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 reguleringssystem (nå nr. 4) har byttet plass. Temaet blokkdiagram for reguleringssystem 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 Skogestads 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 reguleringssystemers 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

Kapittel 1

Innledning til reguleringsteknikk

1.1 Grunnleggende begreper

Denne boken dreier seg om *teknikker for automatisk regulering av prosessvariable*.

Vanlige prosessvariable er

- Nivå
- Temperatur
- Strømning
- Trykk
- Sammensetning eller konsentrasjon
- Posisjon
- Hastighet

Et sentralt krav til et reguleringssystem er at prosessvariablene holdes tilstrekkelig nær sine spesifiserte verdier, som kalles *settpunkter* eller referanser eller skal-verdier. Anta at prosessvariabelen måles kontinuerlig med en egnet sensor (måleelement). Et krav til et reguleringssystem er da, med andre ord, at avviket mellom en prosessvariabels settpunkt og dens

måleverdi er tilstrekkelig lite. I reguleringsteknikken kalles dette avviket *reguleringsavviket*.

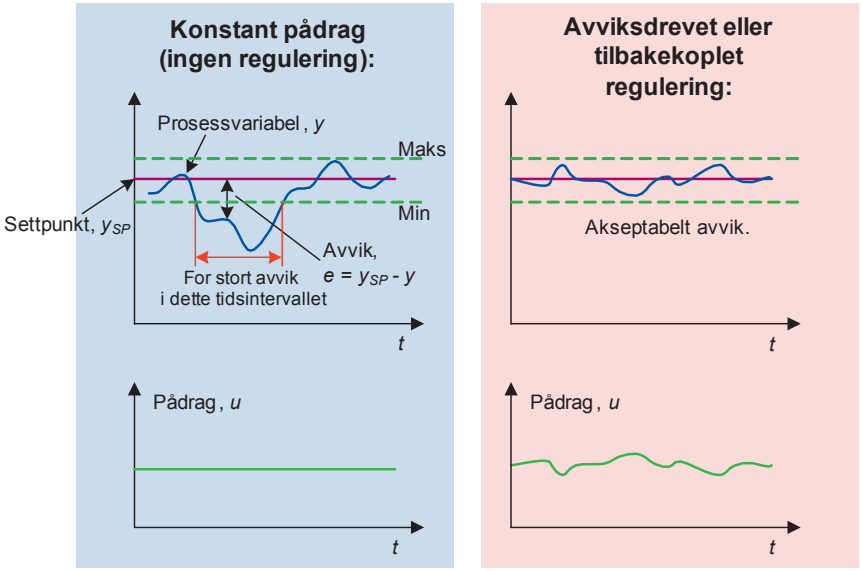
Alle praktiske prosesser i industrien, transportsektoren og energisektoren er påvirket av *prosessforstyrrelser* eller omgivelsesvariable. Eksempler: Utetemperaturen er en forstyrrelse som virker på et drivhus, reservoartrykket virker på en olje/vann/gass-separator, lastmomentet virker på en motor, vinden virker på et skip eller et fly. Prosessforstyrrelsene varierer mer eller mindre tilfeldig og kan gi en betydelig påvirkning på prosessvariabelen. For å holde prosessvariabelen tilstrekkelig nær sitt settpunkt til tross for forstyrrelsenes variasjoner, er det ofte nødvendig å justere eller manipulere styresignaler eller pådrag på aktuatorer (pådragsorganer) som ventiler, pumper, motorer, varmeelementer osv. for å motvirke forstyrrelsene. Det viktigste prinsipppet for en slik justering er å foreta justeringen på basis av reguleringsavviket: Jo større avvik, jo kraftigere justering av pådraget. Vi kan si at justeringen – eller *reguleringen* – er *avviksbasert* siden det er avviket som er basis for justeringen.

Selv om avviksbasert regulering er en dekkende betegnelse på reguleringens grunnprinsipp, er det vanligere å bruke betegnelsen *tilbakekoplet regulering* (eng.: feedback control). Denne betegnelsen stammer fra at det i et slikt reguleringssystem vil være en kopling fra prosessvariabelen, også kalt prosessutgangen, til pådraget, som også kan kalles prosessinngangen – altså en kopling fra prosessutgang tilbake til prosessinngang. Tilbakekoplingen skjer via regulatoren. Vi skal studere reguleringens grunnprinsipp nærmere og se på konkrete eksempler i kap. 2.

Det viktigste (og enkleste) alternativet til avviksdrevet eller tilbakekoplet regulering er å styre prosessen med et konstant (fast) pådrag[1]. Problemet med bruk av konstant pådrag er at avviket mellom settpunkt og prosessmåling kan bli for stort, pga. prosessforstyrrelsene.

Figur 1.1 illustrerer fordelen med tilbakekoplet (avviksbasert) regulering sammenliknet med prosesstyring med konstant pådrag. Til venstre i figuren er vist prosessvariabelen (øverst) og pådraget (nederst) ved konstant pådrag, og til høyre er vist prosessvariabelen og pådraget ved tilbakekoplet (avviksdrevet) regulering der pådraget er justert kontinuerlig i et forsøk på å motvirke prosessforstyrrelsene. Variasjonene i prosessvariabelen stammer fra variasjoner i prosessforstyrrelsene. Med konstant pådrag er avviket i et visst tidsintervall uakseptabelt stort, mens det har akseptabel (tilstrekkelig liten) verdi i hele det viste tidsintervallet

[1] Bruk av såkalt foroverkopling er også et alternativ. Foroverkopling bygger på prosesskunnskap i form av en matematisk prosessmodell. Foroverkopling beskrives i kap. 7.



Figur 1.1: Til venstre: Prosesstyring med konstant (fast) pådrag. Til høyre: Tilbakekoplet eller avviksbasert regulering.

med tilbakekoplet regulering. Tilbakekoplet (avviksbasert) regulering er altså fordelaktig!

I stedet for tilbakekoplet eller avviksbasert regulering kan vi bare si regulering. Reguleringen kan i prinsippet utføres av en operatør, hvilket betegnes *manuell regulering*, men oftest utføres reguleringen *automatisk* av en *regulator* som, med moderne teknologi, typisk er en spesialisert datamaskin.

1.2 Hva er regulering godt for?

Nedenfor er en liste over felter der regulering kan være meget nyttig:

- **Produktkvalitet**:
  - I fullgjødsel er pH-verdien én av prosessverdiene som uttrykker fullgjødselens kvalitet. Eksempelvis vil for lav pH-verdi skade jorden. Derfor må pH-verdien reguleres slik at den ligger tilstrekkelig nær en spesifisert referanseverdi.

- **Driftsøkonomi**:
  - Det vil forverre driftsøkonomien for en virksomhet hvis deler av produksjonen må kasseres eller selges til lavere priser på grunn av dårlig kvalitet. Dette er en helt sentral problemstilling for alle produksjonsbedrifter. Reguleringsteknikken kan sikre at produktkvaliteten ligger innenfor spesifiserte grenser, og strenge spesifikasjoner kan tilfredsstilles med en god reguleringsteknisk løsning!

- **Sikkerhet**: For at det skal være trygt å oppholde seg i nærheten av prosessen og for at utstyr ikke skal bli ødelagt, må variable som trykk, temperatur, nivå, o.s.v., holdes innenfor visse grenser, det vil si de må reguleres. Eksempler:
  - Autopilot for fly (en autopilot er et posisjonsreguleringssystem).
  - Kjemisk reaktor der trykk og temperatur må reguleres, ellers kan utstyr bli ødelagt.

- **Miljøvern**: Det finnes lover for hvor mye av forskjellige avfallsstoffer en bedrift kan slippe ut. Reguleringsteknikken kan bidra til at grensene holdes. Eksempler:
  - I det såkalte vasketårnet i produksjon av fullgjødsel tilsettes salpetersyre for å nøytralisere avgasser av ammoniakk fra produksjonen. Nøytraliseringen skjer ved hjelp av pH-regulering. Reguleringssystemet sikrer at utslipp av ammoniakk til luft ligger innenfor spesifiserte grenser.

- **Komfort**:
  - Autopiloten holder flyet på en jevn kurs, hvilket kan bidra til en forhåpentligvis behagelig flyreise.

- **Teknisk gjennomførbarhet**: En rekke tekniske systemer ville ikke ha fungert eller vært mulige uten bruk av reguleringsteknikk. Eksempler:
  - Oppskyting av romfartøyer (stabilisering av kursen)
  - Dynamisk posisjonering av fartøyer, som er ankerfri posisjonering ved at et posisjonsreguleringssystem styrer propeller som virker i hver sine retninger, slik at fartøyet blir liggende i en spesifisert posisjon til tross for forstyrrelser som bølger, vind og strøm.

  - Drift av eksoterm reaktor i ustabilt (men optimalt) arbeidspunkt

- **Automatisering**: Eksempler:

  - Autopiloter, som gjør at piloten(e) kan gjøre andre ting, f.eks. slappe av, i stedet for å styre farkosten kontinuerlig.
  - Nivåregulering av flisnivået i en flistank i begunnelsen av en papirmassefabrikk, slik at operatøren slipper den kontinuerlige overvåkningen av nivået og styring av flisinnmatning for å holde nivået på den spesifiserte verdien.
  - Posisjoneringssystemer eller servomekanismer for lakkeringsroboter, slik at det ikke er nødvendig for mennesker å oppholde seg i helseskadelige omgivelser.

1.3 Motivasjon for bokens kapitler

Her er en motivasjon for de enkelte kapitlene i boken:

- *Kap. 2 Regulering med tilbakekopling*: Tilbakekopling innebærer måling av den prosessvariabelen som skal reguleres til et gitt settpunkt, og justering av pådraget på prosessen ut fra avviket mellom settpunktet og målingen. Tilbakekopling er det desidert viktigste reguleringsprinsippet i industrielle (og andre typer) reguleringssystemer.

- *Kap. 3 Teknisk flytskjema* (TFS) er en vanlig måte å dokumentere reguleringssystemer på i industrien. Engelsk betegnelse er Piping and Instrumentation Diagram (P&ID). Sentrale deler av standarden ISA 5.1 presenteres.

- *Kap. 4 Komponentene i et reguleringssystem*: Når du arbeider med reguleringsteknikk, er det nyttig å ha kunnskap om alle komponentene, bl.a. sensorer, regulatorer og aktuatorer, som inngår i reguleringssystemet og hvilke signaler som "flyter" mellom disse komponentene.

- *Kap. 5 Reguleringsstrukturer basert på tilbakekopling*: Her ser vi på reguleringsstrukturer som er vanlige i industrielle reguleringssystemer som bygger på den enkle tilbakekoplingen beskrevet i kap. 2.

- *Kap. 6 Matematisk prosessmodellering*: En matematisk modell av et system som eksisterer i virkeligheten eller bare (foreløpig?) bare i teorien, består av likninger som beskriver systemets oppførsel. En modell kan være svært nyttig for å forstå et fysisk system, dvs. for å utføre analyse av systemet. En modell kan også være nyttig ved design, f.eks. som grunnlag for innstilling av regulatorer. Modeller er også et nødvendig grunnlag for utvikling av simulatorer.

- *Kap. 7 Regulering med foroverkopling*: Foroverkopling er et prinsipp for regulering eller styring som er vesensforskjellig fra tilbakekopling. Foroverkopling er basert på måling av prosessforstyrrelser eller omgivelsesvariable som påvirker prosessen og justering av pådraget på prosessen ut fra disse målingene. I praksis brukes foroverkopling som supplement til tilbakekopling og kan gi stor forbedring av reguleringen. Foroverkopling er allikevel ikke spesielt mye brukt, bl.a. fordi foroverkoplingsfunksjonen er krevende å utforme og dessuten kreves det ekstra sensorer.

- *Kap. 8 Prosessdynamikk*: En innsikt i prosessers dynamiske egenskaper, dvs. hvordan prosessvariablene utvikler når tiden løper, er nyttig når en studerer reguleringsteknikk. Kunnskap om prosessdynamikken kan også brukes direkte til innstilling av regulator for prosessen.

- *Kap. 9 PID-regulatoren*: PID-regulatoren (proporsjonal pluss integral pluss derivat) er den klart mest brukte regulatorfunksjonen i industrisammenheng. Du kan ikke si at du har god peiling på reguleringsteknikk hvis du ikke har kunnskaper om PID-regulatoren.

- *Kap. 10 Innstilling av PID-regulatorer*: En PID-regulator som skal *virke*, må være tilpasset de dynamiske egenskapene til prosessen som skal reguleres. PID-regulatorer har tre parametre som må stilles inn. Det finnes svært mange ulike metoder for regulatorinnstilling, men jeg antar at de metodene som er beskrevet i kap. 10, vil dekke de aller fleste tilfellene. Metodene innebærer eksperimentering på den virkelige prosessen eller reguleringssystemet, men metodene kan selvsagt brukes også brukes "eksperimentelt" på simulatorer.

- *Kap. 11 Reguleringssløyfers stabilitet*: En reguleringssystem kan bli ustabilt dersom det oppstår endringer i noen av reguleringssløyfens parametre, f.eks. økning av en tidsforsinkelse. Ved ustabilitet vil reguleringssystemet begynne å svinge, og det kan oppstå farlige situasjoner. I kapitlet gjennomgås typiske eksempler parameterendringer som kan skape dårlig stabilitet eller i verste fall ustabilitet, hvordan dårlig stabilitet kan rettes opp, samt analyse av reguleringssystemers stabilitetsmargin. Stabilitetsmarginene finnes

her fra simuleringer eller fra eksperimenter på et virkelig reguleringssystem.[2]

- *Kap. 12 Simulering av reguleringssystemer*: Simulatorer kan være svært nyttige for analyse, design, testing og opplæring innen reguleringsteknikken. Det finnes mange gode verktøy for simulatorutvikling, f.eks. SIMULINK og LabVIEW. Kapitlet beskriver, gjennom et konkret eksempel, hvordan simulatorer av reguleringssystemer kan implementeres i SIMULINK og i LabVIEW, som nok er de mest aktuelle verktøyene når en skal utvikle simulatorer fra scratch. Jeg har alltid utviklet simulatorer i de prosjektene jeg har arbeidet med. Den uunngåelige prøvingen og feilingen har jeg gjort unna på simulatoren, og igangkjøringen av reguleringssystemet mot den virkelige prosessen har vært så å si feilfri. Bruk av simulatorer for testing m.m. er en arbeidsmetodikk som jeg anbefaler på det sterkeste.

[2] Den tradisjonelle teoretiske stabilitetsanalysen basert på frekvensrespons beskrives ikke. Analysen baseres i stedet på simuleringer eller eksperimenter.