

Finn Aakre Haugen

Automatiserings- teknikk



FAGBOKFORLAGET

Finn Aakre Haugen

Automatiserings- teknikk



FAGBOKFORLAGET

Copyright © 2025 by
Vigmostad & Bjørke AS
All Rights Reserved

1. utgave 2025 / 1. versjon 2025

ISBN: 978-82-450-6014-0

E-utgaven er basert på 1. trykte utgave, 1. opplag, ISBN: 978-82-450-5251-0

Elektronisk tilrettelegging: John Grieg, Bergen

Forsidedesign: Endre Barstad

Sats ved Finn Aakre Haugen

Spørsmål om denne boken kan rettes til:

Fagbokforlaget

Kanalveien 51

5068 Bergen

Tlf.: 55 38 88 00

e-post: fagbokforlaget@fagbokforlaget.no

www.fagbokforlaget.no

Materialet er vernet etter åndsverkloven.

Uten uttrykkelig samtykke er eksemplarframstilling
bare tillatt når det er hjemlet i lov eller avtale med Kopinor.

Vigmostad & Bjørke AS er Miljøfyrtårn-sertifisert.



Miljøfyrtårn®

SERTIFISERT
VIRKSOMHET

Innhold

I	GRUNNLEGGENDE AUTOMATISERINGSTEKNIKK	7
1	Introduksjon til reguleringsteknikk	9
1.1	Generelt, hva kan oppnås med regulering?	9
1.2	Hvilke prosessvariabler er det vanlig å regulere?	11
1.3	Regulering med tilbakekopling	11
1.3.1	Manuell regulering	11
1.3.2	Automatisk regulering	14
1.3.3	Flere eksempler på reguleringssystemer	17
1.3.4	En fare lur: Ustabilitet!	20
1.3.5	Ytelsesmål for reguleringssystemer	21
1.4	Regulering med foroverkopling	23
1.5	<i>Oppgaver til kapittel 1</i>	28
1.6	<i>Løsninger til kapittel 1</i>	34
2	Teknisk flytskjema	39
2.1	Innledning	39
2.2	Instrumentkoder	39
2.2.1	Bokstavkoder	40
2.2.2	Tallkoder	41
2.2.3	Lokalisering	41
2.3	Signaler	42
2.4	Prosessutstyr	42
2.4.1	Bokstavkoder for prosessutstyr	42
2.4.2	Ventiler	42
2.4.3	Strømningsutstyr	43
2.4.4	Varmevekslere	43
2.4.5	Tanker	43
2.4.6	Matematiske funksjoner	44
2.4.7	Forriglinger	44
2.5	Norsk Standard NS 1438	46
2.6	Eksempel på industrielt teknisk flytskjema	46
2.7	Komponentkoder innen byggautomasjon	48
2.8	<i>Oppgaver til kapittel 2</i>	49
2.9	<i>Løsninger til kapittel 2</i>	50
3	Komponenter i reguleringssløyfer	53
3.1	Innledning	53
3.2	Automatiseringsutstyr	54
3.2.1	Innledning	54
3.2.2	Prosessregulatorer	55

3.2.3	Programmerbar logisk styringsenhet (PLS)	57
3.2.4	PAC-er	58
3.2.5	Distribuerte styresystemer (DCS)	58
3.2.6	Hjemmelagde automatiseringssystemer	62
3.2.6.1	PC med IO-enhet	62
3.2.6.2	Raspberry Pi	63
3.2.6.3	Arduino	64
3.3	Prosesser og prosessdynamikk	65
3.3.1	Prosesser	65
3.3.2	Prosessdynamikk	66
3.4	Sensorer	68
3.4.1	Innledning	68
3.4.2	Temperatursensorer	69
3.4.2.1	Motstandstermometer	69
3.4.3	Trykksensorer	71
3.4.4	Nivåsensorer	71
3.4.4.1	Ultrasonisk nivåsensor	72
3.4.4.2	Trykkbasert nivåmåling	72
3.4.5	Strømningssensorer	73
3.4.5.1	Strømningsmåling med måleblende og dp-celle	73
3.4.5.2	Ultrasonisk strømningssensor	75
3.4.5.3	Coriolis strømningssensor	75
3.4.5.4	Termisk strømningssensor	77
3.4.6	Posisjonssensorer	78
3.4.6.1	Kodeskive	78
3.4.7	Hastighetssensorer	80
3.5	Signalbehandling av målesignaler	81
3.5.1	Analoge målesignaler	81
3.5.2	Strømsløyfe	81
3.5.3	Analog-digitalomsetting	82
3.5.3.1	Prinsippet for AD-omsetting	82
3.5.3.2	Oppløsning	83
3.5.4	Skalering av målesignaler	85
3.5.5	Målefiltere	87
3.5.5.1	Innledning	87
3.5.5.2	Middelverdifilter	88
3.5.5.3	EWMA-filter	89
3.5.5.4	Tidskonstantfilter	92
3.5.5.5	Analogt filter	93
3.6	Pådragsorganer	93
3.6.1	Innledning	93
3.6.2	Ventiler	94
3.6.2.1	Oppbygning og virkemåte	94
3.6.2.2	Ventillikning og ventilkarakteristikk	95
3.6.3	Pumper	97
3.6.4	Elektriske motorer	98
3.6.4.1	AC-motor	98
3.6.4.2	DC-motorer	99
3.6.5	Varmeelementer	99
3.7	Signalbehandling av pådragssignal	101
3.7.1	Skalering av pådragssignal	101

3.7.2	Digital-analogomsetting	102
3.7.3	Pulsebreddemodulering	103
3.7.4	Strøm-spenningsomsetting	105
3.8	Regulatorer - oversikt	105
3.9	Av/på-regulator	106
3.9.1	Basis av/på-regulator	106
3.9.2	Av/på-regulator med dødbånd	108
3.10	PID-regulator	111
3.10.1	Tidskontinuerlig PID-regulator	111
3.10.2	PID-parametrene	112
3.10.3	Spesialtilfeller av PID-regulatoren (P, PI, PD)	112
3.10.4	Tidsdiskret PID-regulator og dens virkemåte	113
3.10.4.1	Overordnet algoritme	113
3.10.4.2	P-leddet, u_p	113
3.10.4.3	I-leddet, u_i	114
3.10.4.4	D-leddet, u_d	115
3.10.4.5	Det totale PID-pådragssignalet	116
3.10.4.6	PID-algoritme klar til programmering	116
3.10.5	Alternative parameteriseringer av PID-regulatoren	118
3.10.6	P-spark og D-spark	119
3.10.6.1	P-spark	120
3.10.6.2	D-spark	121
3.10.7	Integratorbegrensning (anti-windup)	122
3.10.8	Støtfri omkopling mellom manuell og automatisk modus	126
3.11	<i>Oppgaver til kapittel 3</i>	126
3.12	<i>Løsninger til kapittel 3</i>	134
4	Innstilling av PID-regulatorer	143
4.1	Innledning	143
4.2	Revers- og direktevirkning i regulatoren	144
4.2.1	Innledning	144
4.2.2	Hva er reversvirkning og direktevirkning?	144
4.2.3	Hvordan velge mellom revers- og direktevirkning	144
4.3	Ziegler-Nichols-metoden	147
4.3.1	Innledning	147
4.3.2	Ziegler-Nichols-eksperimentet og PID-formlene	148
4.3.3	Relaxed Ziegler-Nichols PI-innstilling	151
4.4	Kvasi Ziegler-Nichols-metode	153
4.5	Relémetoden	154
4.6	Good Gain-metoden	157
4.7	Prosessresponsmetoden	159
4.8	Ziegler-Nichols' åpne sløyfe-metode	164
4.9	Autotuning	165
4.10	PID-innstilling ved varierende prosessdynamikk	165
4.10.1	Innledning	165
4.10.2	PID-parameterstyring	166
4.10.3	Adaptiv regulering	170
4.11	<i>Oppgaver til kapittel 4</i>	171
4.12	<i>Løsninger til kapittel 4</i>	176
5	Reguleringsstrukturer	179
5.1	Kaskaderegulering	179

5.2	Forholdsregulering	185
5.3	Split-range-regulering	186
5.4	Midlende nivåregulering	188
5.4.1	Motivasjon og eksempler	188
5.4.2	Innstilling av PI-regulator for midlende nivåregulering	189
5.5	Reguleringsstruktur for en prosesslinje	192
5.6	<i>Oppgaver til kapittel 5</i>	196
5.7	<i>Løsninger til kapittel 5</i>	201
6	Logisk og sekvensiell styring	207
6.1	Innledning	207
6.2	Standarden IEC 61131-3 for PLS-programmering	207
6.2.1	PLS-programmeringsspråk	207
6.2.2	Programenheter	208
6.2.3	Identifikatorer	209
6.2.4	Dat typer	209
6.2.5	Navnerom	210
6.2.6	Codesys	210
6.3	Grunnleggende logikk	211
6.3.1	Logiske verdier	211
6.3.2	Logiske funksjoner	211
6.3.2.1	Innledning	211
6.3.2.2	AND-funksjonen	211
6.3.2.3	OR-funksjonen	213
6.3.2.4	NOT-funksjonen	214
6.3.3	Sammensatte logiske funksjoner	215
6.3.4	Utvalgte PLS-funksjonsblokker: Teller, timer og SR-vippe	216
6.3.4.1	Tellerfunksjonsblokk (counter)	216
6.3.4.2	Tidsfunksjonsblokk (timer)	217
6.3.4.3	Set/reset-funksjonsblokk	219
6.4	PID-regulering i PLS-er	220
6.5	Sekvensiell styring	221
6.6	<i>Oppgaver til kapittel 6.5</i>	226
6.7	<i>Løsninger til kapittel 6.5</i>	227

II MODELLERING OG SIMULERING AV DYNAMISKE SYSTEMER 231

7	Mekanistisk modellering av dynamiske systemer	233
7.1	Innledning	233
7.2	Modellering av materialsystemer	235
7.3	Modellering av termiske systemer	237
7.4	Modellering av bevegelsessystemer	239
7.4.1	Systemer med translatorisk bevegelse	239
7.4.2	Systemer med roterende bevegelse	241
7.4.3	Systemer med både translatorisk og roterende bevegelse	242
7.5	Elektriske systemer	244
7.5.1	Ohms lov	244
7.5.2	Effekt	245
7.6	<i>Oppgaver til kapittel 7</i>	246
7.7	<i>Løsninger til kapittel 7</i>	249

8	Modellblokkdiagrammer	253
8.1	Innledning	253
8.2	Modellblokker	253
8.3	Hvordan tegne modellblokkdiagrammer	253
8.4	Simulering av modellblokkdiagrammer	256
8.5	<i>Oppgaver til kapittel 8</i>	256
8.6	<i>Løsninger til kapittel 8</i>	257
9	Tilstandsrommodeller	259
9.1	Innledning	259
9.2	Tilstandsrommodellens standardform	259
9.3	Fra 2. ordens differensiallikning til 2. ordens tilstandsrommodell	260
9.4	Responser fra en tilstandsrommodell	262
9.4.1	Dynamisk respons	262
9.4.2	Statisk respons	262
9.4.3	Simulering av tilstandsrommodeller	264
9.5	Lineære tilstandsrommodeller	264
9.6	Simulering av lineære tilstandsrommodeller	265
9.7	Linearisering av ulineære modeller	266
9.7.1	Når er det behov for å linearisere?	266
9.7.2	Lineariseringsformler	266
9.8	<i>Oppgaver til kapittel 9</i>	270
9.9	<i>Løsninger til kapittel 9</i>	272
10	Simuleringsalgoritmer	275
10.1	Hvorfor simulere?	275
10.2	Simuleringsalgoritme for differensiallikninger	275
10.2.1	Innledning	275
10.2.2	Simuleringsalgoritme basert på Eulers forovermetode	276
10.2.3	Hvordan teste simulatoren?	286
10.2.3.1	Statisk test av simulatoren	286
10.2.3.2	Dynamisk test av simulatoren	287
10.2.4	Hvordan velge simulatorens tidskritt?	288
10.2.5	Simulering av 2. ordens differensiallikning	289
10.3	Simuleringsalgoritme for en tidsforsinkelse	291
10.4	<i>Oppgaver til kapittel 10</i>	293
10.5	<i>Løsninger til kapittel 10</i>	295
11	Transferfunksjoner	301
11.1	Innledning	301
11.2	Hvordan finne transferfunksjonen fra en differensiallikning	301
11.3	Karakterisering av transferfunksjoner	304
11.4	Kombinasjon av transferfunksjoner i blokkdiagrammer	304
11.5	Hvordan beregne responser for transferfunksjonsmodeller	305
11.6	Statisk transferfunksjon og statisk respons	307
11.7	Simulering av transferfunksjoner	307
11.8	Fra transferfunksjon til differensiallikning	308
11.9	Fra tilstandsrommodell til transferfunksjon	309
11.9.1	Beregning av transferfunksjonen fra differensiallikningene	309
11.9.2	En formel for transferfunksjonen	309
11.10	<i>Oppgaver til kapittel 11</i>	311
11.11	<i>Løsninger til kapittel 11</i>	313

12 Prosessdynamikk	317
12.1 Innledning	317
12.2 Integratordynamikk	317
12.2.1 Integrallikning og differensiallikning	317
12.2.2 Blokkdiagram	317
12.2.3 Transferfunksjon	318
12.2.4 Sprangrespons	318
12.3 Tidskonstantdynamikk	321
12.3.1 Differensiallikning	321
12.3.2 Blokkdiagram	321
12.3.3 Transferfunksjon	321
12.3.4 Sprangrespons	322
12.3.5 Sprangrespons ut fra et annet arbeidspunkt enn null	325
12.4 Tidsforsinkelse	325
12.4.1 Modell	325
12.4.2 Respons	326
12.4.3 Transferfunksjon	327
12.4.4 Padéapproximasjon til tidsforsinkelse	327
12.5 Tidskonstant + tidsforsinkelse + prosessforstyrrelse	328
12.5.1 Modell	328
12.5.2 Sprangrespons	328
12.6 2. ordens systemer	330
12.6.1 Matematisk modell	330
12.6.2 Klassifisering av 2. ordens systemer	332
12.6.3 Overdempet system	332
12.6.4 Kritisk dempet system	332
12.6.5 Underdempet system	333
12.6.6 Udempet system	336
12.6.7 Ustabilt system	336
12.7 Seriekoblede dynamiske systemer	336
12.8 Oppgaver til kapittel 12	337
12.9 Løsninger til kapittel 12	341
13 Modelltilpassing av dynamiske modeller	347
13.1 Innledning	347
13.2 Modelltilpassing som optimeringsproblem	347
13.3 Hvis du skal velge beste modell blant flere modellkandidater	349
13.4 Husk god eksitasjon!	349
13.5 Modelltilpassing med brute force-metoden	351
13.5.1 Prinsippet for optimering med brute force-metoden	351
13.5.2 Implementering med brute-funksjonen i Python	353
13.6 Kontinuerlig parameterestimering	356
13.7 Modelltilpassing med nevral nettverk	357
13.7.1 Innledning	357
13.7.2 Hva er nevrale nettverk?	358
13.7.3 Modellering av dynamiske systemer med nevrale nettverk	360
13.8 Oppgaver til kapittel 13	362
13.9 Løsninger til kapittel 13	365

III	SIMULERING OG ANALYSE AV REGULERINGSYSTEMER	369
14	Simulering av reguleringssystemer	371
14.1	Innledning	371
14.2	Simulering med Python	372
14.3	Simulering med OpenModelica	373
14.4	Simulering med Codesys	375
14.5	<i>Oppgaver til kapittel 14</i>	378
14.6	<i>Løsninger til kapittel 14</i>	380
15	Beregning av statiske responser i reguleringssystemer	383
15.1	Innledning	383
15.2	Analyse under statiske forhold	383
15.3	Analyse ved rampeformet referanse	386
15.4	<i>Oppgaver til kapittel 15</i>	389
15.5	<i>Løsninger til kapittel 15</i>	389
16	Transferfunksjonsmodeller av reguleringssystemer	391
16.1	Innledning	391
16.2	Transferfunksjonsmodell av reguleringssystem	391
16.2.1	Modellblokkdiagram av reguleringssystemet	391
16.2.2	PID-regulatorens transferfunksjon	392
16.2.3	Prosesstransferfunksjoner	393
16.2.4	Følgetransferfunksjonen	393
16.2.5	Sensitivitetstransferfunksjonen	394
16.3	Simulering med transferfunksjonsmodeller av reguleringssystemer	397
16.4	<i>Oppgaver til kapittel 16</i>	397
16.5	<i>Løsninger til kapittel 16</i>	398
17	Frekvensresponsanalyse av reguleringssystemer	401
17.1	Innledning	401
17.2	Frekvensresponsanalyse av dynamiske systemer	402
17.2.1	Definisjon av frekvensresponsen	402
17.2.2	Bodediagram	403
17.2.3	Hvordan beregne frekvensresponse fra transferfunksjon	405
17.2.4	Filtere	407
17.2.4.1	Filtertyper	407
17.2.4.2	Første ordens lavpassfilter – tidskonstantfilter	409
17.3	Frekvensresponsanalyse av reguleringssystemer	410
17.3.1	Innledning	410
17.3.2	Frekvensresponsanalyse av referansefølging	411
17.3.3	Frekvensresponsanalyse av forstyrrelseskompensering	415
17.4	<i>Oppgaver til kapittel 17</i>	416
17.5	<i>Løsninger til kapittel 17</i>	420
18	Stabilitetsanalyse av dynamiske systemer og reguleringssystemer	425
18.1	Innledning	425
18.2	Eksperimentell stabilitetsanalyse av reguleringssløyfer	425
18.2.1	Stabilitetsegenskaper	425
18.2.2	Årsaker til stabilitetsproblemer - og botemidler	427
18.2.2.1	Innledning	427
18.2.2.2	Økning av sløyfeforsterkningen	428

18.2.2.3	Økning av tidsforsinkelsen i reguleringssløyfen	430
18.2.2.4	Økning av tidskonstanten i sløyfen	431
18.2.3	Eksperimentell forsterkningsmargin (GM) og fasemargin (PM)	431
18.3	Stabilitetsanalyse av dynamiske systemer basert på polplassering	435
18.3.1	Innledning	435
18.3.2	Stabilitetsegenskaper definert ut fra impulsrespons	435
18.3.3	Stabilitetsegenskaper og poler	436
18.3.3.1	Sammenhengen mellom impulsrespons og transferfunksjon	436
18.3.3.2	Stabilitetsanalyse av systemer med én pol	437
18.3.3.3	Stabilitetsanalyse av systemer med flere poler	439
18.3.4	Stabilitetsanalyse av tilstandsrommodeller	442
18.4	Stabilitetsanalyse av reguleringssløyfer basert på polplassering	443
18.5	Stabilitetsanalyse av reguleringssløyfer basert på frekvensrespons	446
18.5.1	Nyquists stabilitetskriterium	446
18.5.2	Stabilitetsmarginer	451
18.5.3	Stabilitetsanalyse i Bodediagram	453
18.6	<i>Oppgaver til kapittel 18</i>	456
18.7	<i>Løsninger til kapittel 18</i>	461
IV TIDSDISKRETE SYSTEMER		469
19	Tidsdiskrete modeller	471
19.1	Innledning	471
19.2	Differenslikninger	471
19.3	Beregning av responser fra differenslikninger	472
19.4	Tidsdiskrete tilstandsrommodeller	472
19.4.1	Ulineære tidsdiskrete tilstandsrommodeller	472
19.4.2	Lineære tidsdiskrete tilstandsrommodeller	473
19.4.3	Diskretisering av tidskontinuerlige tilstandsrommodeller	473
19.5	$\mathcal{Z}$ -transformasjonen	474
19.6	z -transferfunksjoner	474
19.6.1	Fra differenslikning til transferfunksjon	474
19.6.2	Poler og nullpunkter	475
19.6.3	Fra transferfunksjon til differenslikning	475
19.6.4	Hvordan beregne tidsresponser for transferfunksjon	476
19.6.5	Statisk transferfunksjon og statisk respons	476
19.6.6	Diskretisering av s -transferfunksjon	477
19.6.6.1	ZOH-diskretisering	478
19.6.6.2	Diskretisering basert på tilnærmelse til tidsderiverte i differenslikningen	479
19.7	<i>Oppgaver til kapittel 19</i>	480
19.8	<i>Løsninger til kapittel 19</i>	483
20	Stabilitetsanalyse av tidsdiskrete systemer	489
20.1	Innledning	489
20.2	Definisjon av stabilitetsegenskaper ut fra impulsrespons	489
20.3	Stabilitetsanalyse basert på polplassering	490
20.4	Stabilitetsanalyse av tidsdiskrete tilstandsrommodeller	492
20.5	Stabilitetsanalyse av tidsdiskrete tilbakemeldede systemer	494
20.5.1	Stabilitetsanalyse basert på polplassering	494
20.5.2	Stabilitetsanalyse basert på frekvensrespons	495

20.6	<i>Oppgaver til kapittel 20</i>	495
20.7	<i>Løsninger til kapittel 20</i>	497

V TILSTANDESESTIMERING 499

21	Stokastiske signaler	501
21.1	Innledning	501
21.2	Hvordan karakterisere stokastiske variabler	501
21.2.1	Symbolbruk	501
21.2.2	Realiseringer av stokastiske variabler	501
21.2.3	Sannsynlighetsfordeling til stokastiske variabler	502
21.2.4	Forventningsverdi og middelerdi	503
21.2.5	Varians og standardavvik	503
21.2.6	Autokovarians og krysskovarians	504
21.3	Hvit og farget støy	505
21.3.1	Hvit støy	505
21.3.2	Farget støy	506
21.4	Hvordan middelerdi og autokovarians endres gjennom systemer	507
21.4.1	Innledning	507
21.4.2	Endring av middelerdi og autokovarians gjennom statiske systemer	508
21.4.3	Endring av middelerdi og varians gjennom dynamiske systemer	509
21.5	<i>Oppgaver til kapittel 21</i>	510
21.6	<i>Løsninger til kapittel 21</i>	512
22	Kalmanfilter	517
22.1	Innledning	517
22.2	Prinsippet for Kalmanfilteret	518
22.3	Observerbarhet	519
22.4	Kalmanfilteret	522
22.4.1	Prosessmodellen	522
22.4.2	Kalmanfilteret gir et optimalt tilstandsestimat	523
22.4.3	Kalmanfilteralgoritmen	524
22.4.3.1	Blokkdiagram av Kalmanfilteret	524
22.4.3.2	Forenklet notasjon	524
22.4.3.3	Kalmanfilteralgoritmen trinn for trinn	525
22.4.4	Stasjonært Kalmanfilter	527
22.5	Justering av Kalmanfilteret	528
22.6	Estimering av parametre og prosessforstyrrelser med Kalmanfilter	529
22.7	Kalmanfiltrering hvis prosessmålingen har falt ut	535
22.8	<i>Oppgaver til kapittel 22</i>	536
22.9	<i>Løsninger til kapittel 22</i>	537

VI MODELLBASERT REGULERING 543

23	Hvordan teste et modellbasert reguleringsystems robusthet?	545
23.1	<i>Oppgaver til kapittel 23</i>	546
23.2	<i>Løsninger til kapittel 23</i>	548
24	Foroverkopling	549
24.1	Innledning	549
24.2	Strukturen til reguleringsystem med foroverkopling	549

24.3	Utvikling av foroverkopplere fra differensiallikningsmodeller	551
24.4	Utvikling av foroverkopplere fra transferfunksjonsmodeller	553
24.5	<i>Oppgaver til kapittel 24</i>	556
24.6	<i>Løsninger til kapittel 24</i>	559
25	Modellbasert PID-innstilling	563
25.1	Innledning	563
25.2	PID-innstilling med SIMC-metoden	563
25.2.1	Grunnlaget for SIMC-metoden	563
25.2.2	Innstilling av PI-regulator for «integrator med tidsforsinkelse»-prosess	565
25.2.2.1	Matematisk modell og prosessdynamikk	565
25.2.2.2	Regulatorinnstilling	566
25.2.3	Innstilling av PI-regulator for «integrator»-prosess	568
25.2.4	Innstilling av PI-regulator for «tidskonstant med tidsforsinkelse»-prosess	573
25.2.4.1	Matematisk modell og prosessdynamikk	573
25.2.4.2	Innstilling av PI-regulator	573
25.2.5	Innstilling av PID-regulator for «dobbelintegrator»-prosess	574
25.2.5.1	Matematisk prosessmodell	574
25.2.5.2	Regulatorinnstilling	575
25.3	<i>Oppgaver til kapittel 25</i>	577
25.4	<i>Løsninger til kapittel 25</i>	578
26	LQ-regulering	581
26.1	Innledning	581
26.2	LQ-regulatoren	582
26.3	LQ-regulator med integrator	591
26.4	LQ-regulering av ulineær prosess	593
26.5	<i>Oppgaver til kapittel 26</i>	594
26.6	<i>Løsninger til kapittel 26</i>	595
27	Modell-prediktiv regulering (MPC)	599
27.1	Innledning	599
27.2	MPC-reguleringssystemets struktur	600
27.3	MPC + PID	601
27.4	MPC-ens virkemåte	602
27.5	MPC-ens objektfunksjon og optimeringsproblem	604
27.6	Pådragsgruppering	606
27.7	Hvordan stille inn en MPC-regulator	606
27.8	<i>Oppgaver til kapittel 27</i>	611
27.9	<i>Løsninger til kapittel 27</i>	611
VII	VEDLEGG	613
A	En samling av enkle prosessmodeller	615
A.1	Innledning	615
A.2	Flistank	615
A.3	Buffertank	617
A.4	Vanntank med varmeelement	618
A.5	Luftvarmer	620
A.6	Vannkoker	622
A.7	Likestrømsmotor	625

A.8	Skip	626
A.9	Elbil	628
A.10	Pendel på vogn	631
A.11	Inneklimasystem	634
B	Laplacetransformasjonen	637
B.1	Definisjon av Laplacetransformasjonen	637
B.2	Laplacetransformpar	637
B.3	Egenskaper til Laplacetransformasjonen	638
C	$\mathcal{Z}$-transformasjonen	639
C.1	Definisjon av $\mathcal{Z}$ -transformasjonen	639
C.2	$\mathcal{Z}$ -transformpar	639
C.3	Egenskaper til $\mathcal{Z}$ -transformasjonen	639
D	Lynkurs i objekt-orientert programmering	641
D.1	Innledning	641
D.2	Hvordan programmere med OOP	642
D.3	Plassering av klassedefinisjonen i en modul	645
	Bibliografi	647
	Register	649

Forord

Denne boken dreier seg om grunnleggende automatiseringsteknikk. Automatiseringsteknikk går ut på å styre eller regulere mekaniske, termiske, kjemiske, biologiske eller elektriske prosesser automatisk slik at de oppfører seg som vi ønsker. Automatiseringsutstyret er typisk i form av spesialiserte datamaskiner og har ulike navn avhengig av anvendelsesområdet, som regulator eller PLS (programmerbar logisk styring). Noen sier kontroller (fra engelsk controller). Boken fokuserer på prinsipper, metoder og algoritmer som danner fundamentet for automatiseringsteknikken.

Her er noen eksempler på anvendelser av automatiseringsteknikk:

- Temperaturregulering av et rom: Regulatoren justerer oppvarmingen eller avkjølingen av luften i rommet automatisk for å få den målte romtemperaturen til å bli lik temperaturreferansen, f.eks. 22 °C, til tross for forstyrrelser som varierende utetemperatur, varierende ventilering, varierende solinnstråling og varierende antall personer i rommet.
- Nivåregulering av en flistank (flissilo) i innløpsavsnittet i en papirfabrikk: Regulatoren justerer innstrømningen av flis til tanken automatisk for å få det målte nivået av flisen i tanken til å bli lik nivåreferansen, f.eks. 10 meter i en 15 meter høy tank, til tross for varierende utmatning av flis som så går inn til kokeriet der flisen løses opp.
- Posisjonsregulering (dynamisk posisjonering) av skip: Regulatoren manipulerer propellene (engelsk: thruster) automatisk for å få den målte skipsposisjonen til å bli lik posisjonsreferansen, som kan være en gitt posisjon i forhold til en undervannsinstallasjon eller en plattform eller en varierende posisjon (trajektor), til tross for forstyrrelser som krefter fra vind og vannstrøm.
- Hastighetsregulering (cruisekontroll) av en bil: Regulatoren justerer kraften som virker på hjulene automatisk for å få den målte bilhastigheten til å bli lik hastighetsreferansen, f.eks. 80 km/t, til tross for varierende vei- og luftfriksjon og varierende veistigning (oppoverbakke, nedoverbakke).
- Logisk og sekvensiell styring av satsvis produksjon av legemidler i tanker iht. en resept, som er en oppskrift på mengden av tilsetningsstoffer og temperaturen i tanken. I slike anvendelser er det viktig at prosessen opereres i en bestemt sekvens, f.eks. påfylling – oppvarming til spesifisert temperatur – prosessering – tømming, før neste sats (engelsk: batch) skal produseres. Temperaturregulering inngår som en del av styringsoppgaven.

Ut fra disse eksemplene, og jeg kunne ha nevnt mange andre, er det klart at automatiseringsteknikk spiller en svært viktig rolle i ulike typer tekniske og industrielle systemer.

Bokens del I dekker grunnleggende automatiseringsteknikk og dekker både reguleringsteknikk og logisk og sekvensiell styring. Denne delen er som et praktisk rettet «grunnkurs» som gjør deg i stand til å løse praktiske automatiseringsoppgaver og arbeide med laboppgaver og/eller simulatorbaserte oppgaver tidlig i relevante emner (fag).

De påfølgende delene av boken er mer teoretiske og dekker tema som matematisk modellering, simulatorutvikling, prosessdynamikk, analyse av reguleringssystemer, tilstandsestimering, modellbasert regulering. Men selv om temaene er teoretiske, kan de ha stor praktisk nytte! Fra en matematisk modell av en prosess som skal reguleres, kan du utvikle og programmere en simulator – kall den gjerne en virtuell prosess eller digital tvilling. Med simulatoren kan du teste og analysere løsningene dine uten omfattende og kanskje farlig eksperimentering på det fysiske systemet; og det fysiske systemet er kanskje ennå ikke bygget ferdig ennå, eller er kun under planlegging. Med modeller kan du også utvikle avanserte, modellbaserte regulatorer, og du kan utføre modellbasert innstilling av regulatorer.

Boken inneholder simulerte plott fra Python-programmer, fra OpenModelica-modeller og fra SimView-simulatorer. Lenker til Python-programmer og OpenModelica-modeller og SimView-simulatorer er angitt i teksten, og filer kan lastes ned fra bokens hjemmeside angitt nedenfor. Boken inneholder eksempler på programkode i Codesys, som er et fritt tilgjengelig programmeringsmiljø for PLS-programmering. Python, OpenModelica, Codesys og SimView er fritt tilgjengelig. SimView er en samling av kjørbare filer (exe-filer) som jeg har utviklet i LabVIEW, men du trenger ikke LabVIEW for å kjøre simulatorene. SimViews hjemmeside fins på <https://techteach.no/simview>.

Bak i hvert kapittel fins oppgaver med detaljerte løsningsforslag.

Du kan finne supplerende stoff til boken på bokens hjemmeside på <https://techteach.no>, bl.a. introduksjoner til OpenModelica, Python Control Package og Codesys.

Jeg har benyttet enkel objekt-orientert programmering (OOP) i mange av bokens Python-programmer. Med OOP kan du lage programmer med en god og oversiktlig struktur ved at du lager objekter for f.eks. prosesssimulatoren, målefilteret og regulatoren i programmet og kopler dem sammen med bare noen få programlinjer. Du kan også lage objektklasser som du kan definere i egne Python-filer og importere i ulike Python-programmer (skript). Vedlegg D gir et lynkurs i OOP-programmering med Python.

I boken bruker jeg norske begreper og uttrykk, men noen steder engelsk der det faller naturlig. Mange av figurene inneholder engelsk tekst (jeg satser på at det er greit).

Jeg har brukt ChatGPT til hjelp med oversettelse av deler av et engelskspråklig kompendium som jeg har skrevet.

Ser du feil eller har forslag eller andre kommentarer til boken, er du velkommen til å sende dem til meg på epost (se nedenfor).

Noen ord om min bakgrunn: Jeg har en sivilingeniørgrad fra tidligere NTH (nå en del av NTNU) og doktorgrad fra tidligere Høgskolen i Telemark (nå en del av USN). Jeg har erfaring som lærer og forsker, lærebokforfatter og deltaker i industri- og forskningsprosjekter om modellering, simulering og regulering. Jeg jobber i mitt enmannsfirma TechTeach og har deltidsstillinger som dosent ved USN og ved OsloMet. Jeg underviser også i yrkesfaglig utdanning og holder kurs for industrien.

Jeg vil si takk til Tormod Drengstig og Anushka Perera for deres kommentarer til

manuskriptet. Takk også til mine kontakter ved Yara AS, Ineos AS, Kongsberg Maritime/Kongsberg Gruppen AS og VEAS AS teknisk informasjon og diskusjoner. Takk for Fagbokforlaget, spesielt redaktør Jannicke Bærheim, for støtte under skrivingen. Professor Jens G. Balchen ved NTH var selve drivkraften bak fagfeltet kybernetikk i Norge og var min lærer i reguleringsteknikk. Professor Gustaf Olsson ved Lund Universitet etablerte gjennom sine lærebøker et utvidet og praktisk perspektiv på automatiseringsteknikk. De har på hver sin måte indirekte påvirket boken, så takk til dem. En takk også til min familie, og spesielt min kone Hong, for støtte under skrivingen.

Jeg har siden studiedagene vært fascinert av matematisk modellering, simulering og automatisk regulering og syntes det er spennende å utvikle og programmere algoritmer som virker sammen med fysiske og/eller simulerte systemer. Jeg har også likt å skrive og undervise om slike teknikker og metoder. Denne gleden er drivkraften bak boken.

Finn Aakre Haugen
<https://techteach.no/fh>
finn@techteach.no

Terminologi

Forkortelser

AC = Alternate Current = Vekselstrøm

ADC = Analog Digital Converter = Analog-digital-omsetter

CFC = Continuous Function Chart = Kontinuerlig funksjonsdiagram

CL = Closed loop (lukket sløyfe)

DAC = Digital Analog Converter = Digital-analog-omsetter

DC = Direct Current = Likestrøm

EWMA = Exponentially Weighed Moving Average

FB = Function Block = Funksjonsblokk (i PLS-programmering)

FUN = Function = Funksjon (i PLS-programmering)

GM = Gain Margin = Forsterkningsmargin

GS = Gain Scheduling = PID-parameterstyring

HHP = Høyre halvplan

IAE = Integral of Absolute value of control Error

LSB = Least Significant Bit = Minst signifikante bit

MA = Moving Average = (Glidende) middelvei

MPC = Model-Predictive Control

MSB = Most Significant Bit = Mest signifikante bit

NN = Nevral nettverk

OL = Open Loop (åpen sløyfe)

PB = Proportional Band = Proporsjonalbånd

PID = Proportional Integral Derivative

PLC = Programmable Logical Control eller - Controller

PLS = Programmerbar logisk styring eller - styringsenhet

PM = Phase Margin = Fasemargin

POU = Program Organization Unit = Programorganiseringsenhet (i PLS-programmering)

PWM = Pulse Width Modulation = Pulsbreddemodulering

SFC = Sequential Function Chart = Sekvensielt flytskjema

SIMC = Simple Internal Model Control

ST = Structured Text = Strukturert tekst (i PLS-programmering)

TFS = Teknisk flytskjema

ZN = Ziegler-Nichols

VHP = Venstre halvplan

WRRF = Water Resource Recovery Facility (anlegg for vannressursgjenvinning; vannrenseanlegg)

Matematiske symboler

For tidsrelaterte størrelser bruker jeg symbolet t med passende underindeks, f.eks. t_f for filtertidskonstant. Unntakene er T_i for integraltid og T_d for derivattid i en PID-regulator, siden det er vanlig å bruke store bokstaver for akkurat disse parametrene.

Laplacetransformerte variabler angis med store bokstaver, for eksempel $F(s)$ som Laplacetransformen til tidsfunksjonen $f(t)$. Hvis tidsfunksjonen har stor bokstav som symbol, bruker jeg en stjerne på Laplacetransformen. F.eks. blir $X^*(s)$ symbolet på Laplacetransformen til $X(t)$.

Jeg bruker konsekvent symbolet $H(s)$ med passende underindeks for transferfunksjoner basert på Laplacetransformasjonen. $H(z)$ brukes som symbol for Z -transformbaserte transferfunksjoner.

Del I

**GRUNNLEGGENDE
AUTOMATISERINGSTEKNIKK**

Kapittel 1

Introduksjon til reguleringsteknikk

I dette kapittelet vil du lære om de grunnleggende prinsippene for automatisk regulering gjennom eksempler. Simulatorer brukes for å illustrere hvordan reguleringssystemer virker.

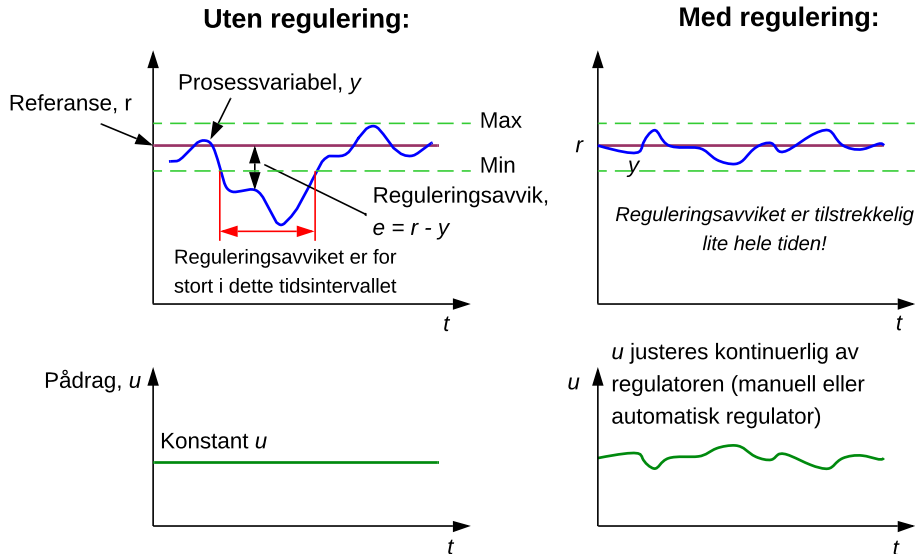
1.1 Generelt, hva kan oppnås med regulering?

Figur 1.1 illustrerer følgende:

- **Uten regulering** (til venstre). Pådragssignalet som virker på prosessen, holdes konstant. Med konstant pådrag kan reguleringsavviket bli for stort, dvs. gå utenfor akseptable grenser, grunnet forstyrrelser som virker på prosessen.
- **Med regulering** (til høyre). Pådragssignalet som virker på prosessen justeres aktivt, enten av et menneske, dvs. manuell regulering, eller av en *automatisk regulator*, som typisk er en spesialisert datamaskin der mikroprosessen kjører reguleringsalgoritmen. Med (aktiv) regulering kan reguleringsavviket holdes innenfor spesifiserte grenser siden regulatoren hele tiden justerer pådraget. Ideelt er reguleringsavviket null.

Automatisk regulering er viktig for en lang rekke praktiske industrielle og tekniske systemer. Med automatisk regulering kan vi oppnå:

- **God produktkvalitet:** Et produkt vil kun ha akseptabel kvalitet hvis visse prosessvariabler er tilstrekkelig nærme referansene deres. Et eksempel: I kunstgjødsel er pH-verdien og sammensetningen av nitrogen, fosfat og kalium faktorer som uttrykker kvaliteten på gjødselen (for lav pH-verdi er for eksempel ikke bra for jorda). Derfor må pH-verdien og sammensetningene reguleres.
- **God driftsøkonomi:** Driftsøkonomien vil bli dårligere dersom en del av produktene har uakseptabel kvalitet slik at den ikke kan selges eller selges til en lavere pris enn forventet. God regulering kan opprettholde den gode produktkvaliteten, og dermed bidra til god produksjonsøkonomi. Videre kan god regulering gjøre at kvaliteten varierer mindre.
- **Sikkerhet:** Med reguleringsteknikk kan kritiske variabler som f.eks. trykk, temperatur, nivå, hastighet og posisjon holdes innenfor sikre grenser. Noen eksempler:
 - Et fly med autopilot (en autopilot er et hastighets- eller posisjonsreguleringssystem).
 - En kjemisk reaktor der trykk og temperatur reguleres.



Figur 1.1: Illustrasjon av hva som kan oppnås med *regulering* av en prosess.

- Automatisk styrte lakkeringsroboter gjør at mennesker slipper å arbeide i farlige områder.
- **Miljøbeskyttelse:** Mengden gift som skal slippes ut fra en fabrikk er regulert gjennom lover og retningslinjer. Reguleringsteknikk kan bidra til å holde grensene. Noen eksempler:
 - I en flistank i en papirmassefabrikk brukes varm damp og hydrogensulfidgass, som er avgasser fra det såkalte kokeriet, til å forvarme flisen. Hvis flisnivået i tanken er for lavt, slippes det ut for mye (stinkende) hydrogensulfidgass til atmosfæren. Med nivåregulering av flisen i tanken holdes nivået nær en ønsket verdi (referanse) der kun en liten mengde gass slipper ut fra flistanken.
 - I det såkalte vasketårnet i en fullgjødselabrikk tilsettes salpetersyre til mellomproduktet for å nøytralisere ammoniakk-avgass fra produksjonen. Dette oppnås ved å regulere pH-verdien til produktet ved hjelp av et pH-reguleringssystem. pH-reguleringssystemet sikrer at mengden avgitt ammoniakk holdes mellom spesifiserte grenser.
- **Komfort:**
 - Autopiloten i et fly driver automatisk posisjonsregulering av flyet. Autopiloten kompenserer for forstyrrelser i form av vind og variabelt trykk slik at flyet holder nokså stabil kurs. Dette bidrar positivt til reisens komfort.
 - Automatisk regulering av innetemperatur og innstrømming av friskluft til et rom bidrar til god komfort.

- **Gjennomførbarhet:** Mange tekniske systemer kan ikke fungere uten bruk av regulerings-teknikk. Noen eksempler:
 - En eksoterm reaktor som opererer i et ustabilt, men optimalt, arbeidspunkt. Regulerings-systemet holder reaktoren i arbeidspunktet.
 - Oppskyting og posisjonering av romfartøy (kursen stabiliseres).
 - Et dynamisk posisjoneringssystem (DP-system) holder et skip på eller tilstrekkelig nær en spesifisert posisjonsreferanse uten anker, til tross for påvirkning av bølger, vind og strøm på skipet. Hjertet i et dynamisk posisjoneringssystem er posisjonsregulerings-systemet som styrer thrusterne som kan bevege skipet i de aktuelle retningene.
- **Automatisering:** Automatisk regulering med spesialiserte datamaskiner kan utføre arbeid som kan være farlig å utføre for operatører. Generelt kan automatisering frigjøre menneskelig arbeidskraft. Automatisering kan også redusere driftskostnadene i en fabrikk og dermed indirekte redusere produktprisene – til fordel for kunden.

1.2 Hvilke prosessvariabler er det vanlig å regulere?

Nedenfor er en liste over prosessvariabler som vanligvis reguleres for å følge sine referanser (settpunkter):

- **Nivå** (i en lagertank)
- **Temperatur** (i et rom; i væsken som passerer en varmeveksler; i en reaktor; i et drivhus)
- **Strømning** (av føde inn i en reaktor)
- **Trykk** (av gass i en olje-vann-gass separator)
- **Sammensetning og konsentrasjon** (salpetersyre; gjødsel; biola)
- **Posisjon** (skip; robotarm; verktøyet til en skjæremaskin; en rakett)
- **Hastighet** (motor; bil; vifte)

1.3 Regulering med tilbakekopling

1.3.1 Manuell regulering

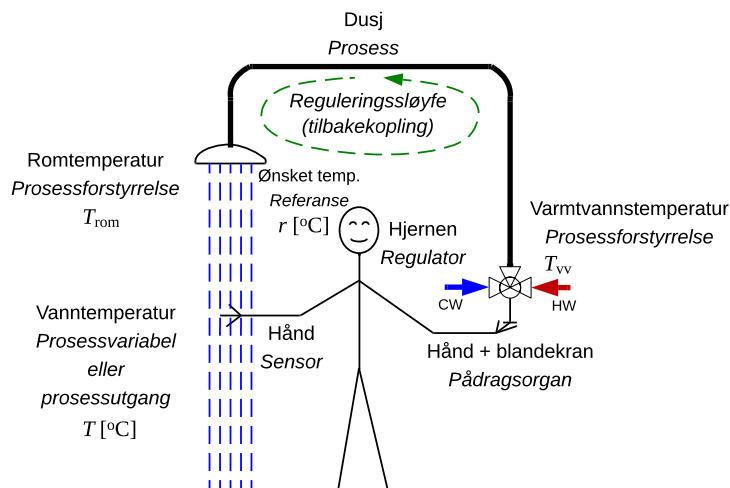
La oss starte med en dusj!

Regulerings-teknisk problemstilling

Når du skal dusje, se figur 1.2, vil du selvsagt at temperaturen i dusjvannet skal være slik du ønsker. Anta at du ønsker en varm dusj, som vi nå sier tilsvarer en temperatur på 40 °C, som er noe høyere enn kroppstemperaturen.¹ Med andre ord: Du ønsker at dusjtemperaturen skal være lik sin referanse.

I praksis ønsker du å regulere også dusjvannets strømning, altså «vannmengden». Vi skal her kun studere temperaturreguleringen, men i oppgave 1.1 skal du regulere også strømningen!

¹Jeg har målt selv, og jeg synes at 40 °C er en temmelig varm dusj.



Figur 1.2: Manuell regulering av dusjtemperaturen. (HW = Hot Water. CW = Cold Water.)

Reguleringsteknisk terminologi

Dusjen er her *prosessen*. Vanntemperaturen, T , er *prosessvariabelen* eller *prosessutgangen* som vi ønsker skal bli lik ønsket temperatur, som vi kaller *referansen* r . Referanse kalles også skal-verdi eller settpunkt, men i boken kommer jeg stort sett til å skrive referanse. Romtemperaturen, T_{rom} , påvirker T , og er en *prosessforstyrrelse*. Også varmtvannstemperaturen, T_{vv} , er en *prosessforstyrrelse*. Variasjoner av disse prosessforstyrrelsene gir en uheldig påvirkning på dusjtemperaturen, i hvert fall hvis dusjtemperaturen i utgangspunktet er lik sin referanse.

For å regulere T kan du bruke hånden til å manipulere en blandekran som bestemmer forholdet mellom varmt og kaldt vann. Hånden og kranen utgjør *pådragsorganet*. u er styresignalet på pådragsorganet, men kan også betraktes som pådragsorganets innstilling (kraninnstillingen). u kan omtales også som pådragssignalet eller bare *pådraget*. I noen sammenhenger er det hensiktsmessig å skille mellom styresignalet (som genereres av regulatoren og påvirker pådragsorganet) og pådragsorganets innstilling, men vanligvis kan vi betrakte styresignal og pådrag som en og samme variabel.

Reguleringsavviket, e , er referansen minus prosessutgangen, altså ønsket temperatur minus faktisk temperatur. Med variabelnavn (symboler):

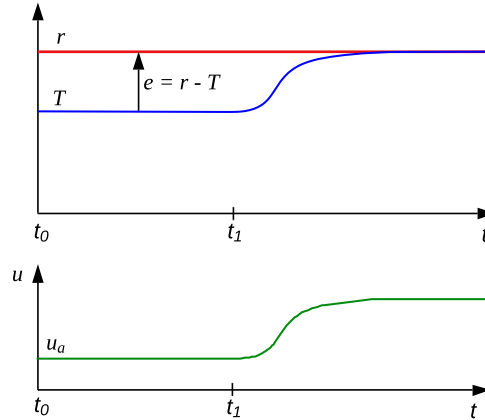
$$e = r - T \quad (1.1)$$

I de fleste anvendelser er målet for regulering $e = 0$, eller $e \approx 0$ i praksis siden det er sikkert at e vil variere noe på grunn av prosessforstyrrelser som påvirker prosessutgangen T .

Reguleringsstrategier

La oss se nærmere på to alternative strategier for regulering av dusjtemperaturen.

- **Uten regulering:** Anta at du dusjet i går og at dusjtemperaturen da var som du ønsket, dvs. $T = r$, og at u da hadde verdi u_0 . Ved tidspunkt t_0 (i dag) går du inn i dusjen, se



Figur 1.3: Manuell regulering av dusjtemperaturen.

figur 1.3. Det er naturlig at du prøver den vellykkede kraninnstillingen $u = u_0$ også i dag. Hvis T_{rom} er som i går, vil $u = u_0$ gi $T = r$ også i dag. Men anta at T_{rom} faktisk er lavere i dag enn i går, kanskje fordi du dusjer med åpent vindu i dag mens vinduet var lukket i går. Da vil $u = u_0$ gi en dusjtemperatur som er lavere enn r , eller med andre ord: reguleringsavviket e er større enn 0. Anta at å beholde $u = u_0$ gjør at du fryser. Du konkluderer da sikkert med at konstant pådrag u ikke er en god reguleringsstrategi. Du går ut av dusjen en stund for å tenke på en bedre strategi for å oppnå ønsket dusjtemperatur.

- **Med regulering:** Hvordan kan du oppnå ønsket temperatur, altså $e = 0$? Jeg tipper at du bestemmer deg for å *måle* temperaturen med la oss si høyre hånd, som da er en *temperatursensor*. Denne målingen registreres i hjernen din. Hjernen – *regulatoren* – justerer deretter pådraget, dvs. nervesignalet til venstre hånd og dermed innstillingen av blande Kranen, så lenge $e \neq 0$, altså så lenge det er for kaldt (eller for varmt) – helt til $e \approx 0$, og da er du klar til å ta dusjen – nå med ønsket temperatur! Siden det er reguleringsavviket som «driver» reguleringen, kan vi betegne denne reguleringsstrategien som *avviksdrevet regulering*. Et mer vanlig begrep er imidlertid *tilbakerekoplet regulering*, som jeg skal forklare nærmere nedenfor.

Dette temperaturreguleringssystemet fungerer utmerket, ikke sant? Det er et *manuelt* reguleringssystem siden du (et menneske) er regulatoren. I et *automatisk* reguleringssystem er din hjerne erstattet av en datamaskin som kan generere f.eks. et elektrisk pådragssignal til ventilen, og sensoren er erstattet med en industriell temperatursensor, for eksempel en Pt100-sensor, som sender et elektrisk målesignal til regulatoren. Flere detaljer om automatisk regulering av dusjen er beskrevet i kap. 1.3.2.

I figur 1.2, har jeg angitt *reguleringssløyfen*. Den består av følgende tre hovedkomponenter, som alle trengs for å regulere prosessen (dusjen):

- Sensor
- Regulator

- Pådragsorgan

Disse komponentene er hovedkomponentene også i tekniske reguleringsløyper. Ofte inngår også et *målefilter*, som demper målestøy i målesignalet fra sensoren. Filteret kan betraktes som en del av (inkludert i) sensoren.

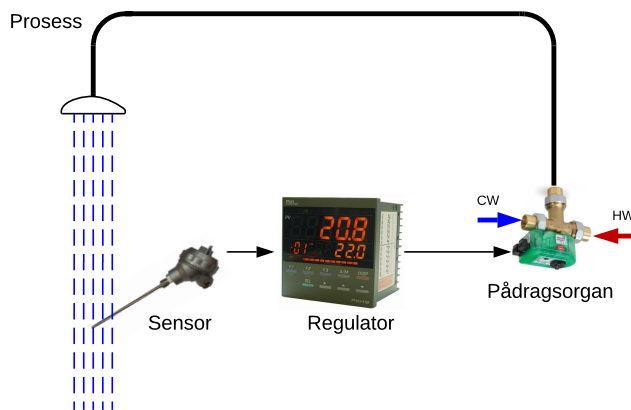
Som jeg nevnte ovenfor, er reguleringsløyper også betegnet *tilbakekoplede* reguleringsystemer. Grunnen til begrepet tilbakekopling (feedback) er at det er en kopling fra prosessutgangen (vanntemperaturen) *tilbake* til prosessinngangen (pådragssignalet til blandeventilen) via sensoren og regulatoren.

Det er fristende å bruke begrepet «målebasert regulering» om tilbakekoplet regulering. Men dette begrepet er tvetydig fordi også regulering basert på foroverkopling, jf. kap. 1.4, er basert på målinger. Og foroverkopling er vesensforskjellig fra tilbakekopling!

1.3.2 Automatisk regulering

En drøm av et system

I et automatisk temperaturreguleringssystem for dusjen trenger du bare å spesifisere temperaturreferansen for dusjvannets temperatur, og så vil regulatoren justere blandeventilen automatisk inntil den faktiske (reelle) temperaturen er lik referansen. Høres ut som en drøm, ikke sant? Figur 1.4 viser en mulig implementering av et slikt automatisk temperaturreguleringssystem.



Figur 1.4: Temperaturreguleringssystem for dusjen implementert med tekniske komponenter. (Sensor: Autek. Regulator: Fuji Electric. Ventil: Taco.)

La oss se litt nærmere på komponentene vist i figur 1.4.

Pådragsorgan

Pådragsorganet er en elektronisk styrt treveisventil med to innløp med hhv. varmt vann og kaldt vann, og ett utløp med blandet vann. I industrielle reguleringsystemer er det vanlig at pådragsorganet manipuleres av regulatoren med et pådragssignal eller styresignal i form av elektrisk strøm i området 0-20 mA.

Sensor

I figur 1.4 er temperatursensoren, som måler vanntemperaturen ut av dusjen, en Pt100-sensor. Måleprinsippet til en Pt100-sensor er at motstandsverdien til den elektriske motstanden, som er laget av platina, varierer på kjent måte med temperaturen. Ved 0 °C er motstandsverdien 100 Ω , og så øker motstandsverdien med temperaturen på en kjent måte. Inkludert i sensoren er en temperaturtransmitter. Transmitterens oppgave er å generere et målesignal på en standard form, typisk en elektrisk strøm i området 4-20 mA, eller en spenning, f.eks. i området 1-5 V. Transmitteren kan være justert f.eks. slik at et målesignal i området 4-20 mA representerer en temperatur i området 0-100 °C med en lineær sammenheng mellom mA-verdi og °C-verdi.

Regulator

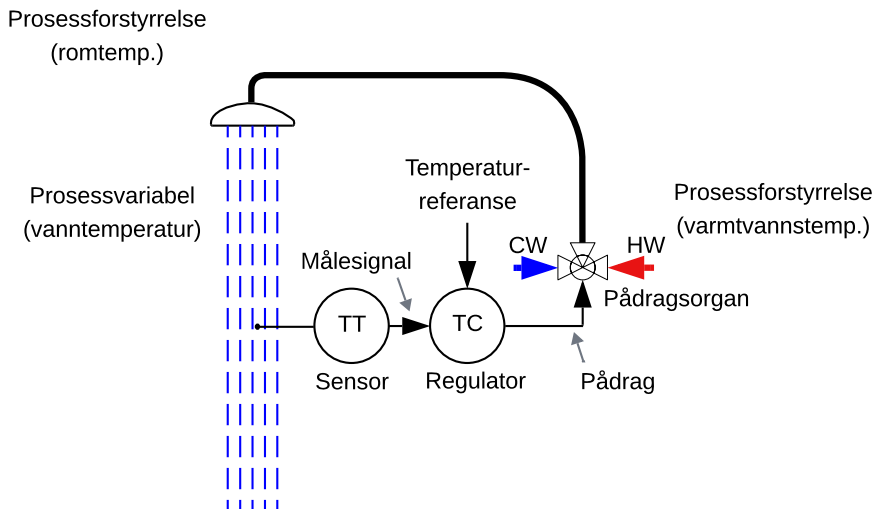
Regulatoren i figur 1.4 er en industriell prosessregulator som inneholder en mikroprosessor som kjører et program som implementerer reguleringsfunksjonen. Den vanligste reguleringsfunksjonen i industrielle regulatorer er PID-regulatoren. PID står for proporsjonal-integral-derivert, som uttrykker den matematiske funksjonen som regulatoren implementerer. Målesignalet fra sensoren er koplet til regulatoren via ledninger koplet på et koplingspanel på baksiden av regulatoren. Du kan stille inn temperaturreferansen med knapper på regulatorens frontpanel. Regulatoren justerer, dvs. øker eller minker, pådragssignalet på ventilen så lenge temperaturmålingen er forskjellig fra referansen, og når målingen er lik referansen, endrer den ikke pådraget. Dette skjer *automatisk* – uten menneskelig interaksjon.

Teknisk flytskjema (Piping & Instrumentation Diagram)

I industrien er det vanlig å tegne et *teknisk flytskjema* (TFS) (engelsk: Piping & Instrumentation Diagram – P&ID) som viser reguleringsystemets struktur. Figur 1.5 viser et teknisk flytskjema for reguleringsystemet for dusjtemperaturen. Vi skal se nærmere på tekniske flytskjemaer i kap. 2.

I figur 1.5:

- TT = Temperature Transmitter. TT brukes som et kombinert symbol for sensoren og transmitteren. En transmitter er en enhet som sender målesignalet til regulatoren. Målesignalet er vanligvis elektrisk eller digitalt. I industrien er elektrisk målesignal i området 4-20 milliampere vanlig, men spenning f.eks. i området 1-5 V benyttes også. I noen anvendelser er målesignalet et digitalt signal. Tidligere kunne målesignalene være pneumatiske og hydrauliske, men det er ikke vanlig lenger.
- TC = Temperature Controller, temperaturregulator.
- Pådragsorganet – her en blandeventil – vises i skjemaet med et skjematisk symbol. Det fins ikke noe generelt symbol for pådragsorganer. Hvis pådragsorganet er f.eks. en pumpe, tegnes et pumpe-symbol.
- Prosesstrømmer i f.eks. rørledninger tegnes med relativt tykke linjer.
- Signaler, som målesignaler og pådragssignaler, tegnes med relativt tynne linjer. Om nødvendig kan du bruke spesielle streker for å indikere signaltypen, dvs. elektrisk, digital osv. En linje uten streker indikerer ingen spesiell signaltype – bare at det er et signal.
- Signallinjer tegnes normalt uten pilhoder, altså bare som rene linjer. Men standarden NS 1438 for tekniske flytskjema, jf. kap. 2.5, åpner for å tegne pilhoder dersom det gjør skjemaet lettere å lese. Det gjelder egentlig skjemaer som ellers ville vært vanskelige å



Figur 1.5: Teknisk flytskjema eller Piping & Instrumentation Diagram (P&ID) reguleringsystemet for dusjtemperaturen.

forstå, men jeg har tillatt meg å bruke pilhoder i boken også i relativt enkle skjemaer fordi skjemaene etter min mening blir (mye) lettere å lese.

Blokkdiagram

I mange sammenhenger, bl.a. i undervisning, er det nyttig å tegne et blokkdiagram av et reguleringsystem. Blokkdiagrammer viser de ulike variablene (signalene) og komponentene i et reguleringsystem. Detaljnivået til blokkdiagrammer kan variere, avhengig av hva som skal vises i diagrammet. Det er ingen spesifikke standarder for blokkdiagrammer.

Figur 1.6 viser et blokkdiagram for reguleringsystemet for dusjtemperaturen. Jeg har der angitt generelle betegnelser og symboler i blokkdiagrammer for reguleringsystemet, men har også angitt i parentes begreper som er spesifikke for temperaturreguleringsystemet. I figuren har jeg angitt det generelle symbolet y for prosessutgang og y_m for prosessmåling.

Kommentarer til figur 1.6:

- Figur 1.4 viser de tre komponentene som trengs for å implementere et reguleringsystem basert på tilbakekopling:
 - Regulator
 - Pådragsorgan
 - Sensor
- Sirkelen (eller sirkelblokken) til venstre for regulatorblokken er en adderer. Det negative tegnet indikerer at målingen går inn i adderen med et negativt fortegn. Sirken inkl.