



# LUND UNIVERSITY

## Adaptiv reglering

Åström, Karl Johan

1982

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*  
Åström, K. J. (1982). *Adaptiv reglering*. (Technical Reports TFRT-7245). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

*Total number of authors:*  
1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

ADAPTIV REGLERING

K J ÅSTRÖM

DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL  
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
JUNE 1982

<b>LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY</b> DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL Box 725 S 220 07 Lund 7 Sweden		Document name	
		REPORT	
		Date of issue	
		June	
Author(s)  K J Åström		Document number	
		CODEN:LUTFD2/ (TFR-7245) /1-027/(1982)	
		Supervisor	
		Sponsoring organization	
Title and subtitle  Adaptiv reglering.			
Abstract  Detta är ett översiktsföredrag om adaptiv reglering presenterat vid Automationsdagarna 1981 vilka arrangerades av Finlands reglertekniska sällskap.  This is a survey of adaptive control presented at the Automation Days 1981 arranged by the Finnish Society for Automatic Control. It covers, gain scheduling, model reference adaptive control, self-tuning regulators, theory and applications of adaptive control.			
Key words			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			
ISSN and key title		ISBN	
Language swedish	Number of pages 27	Recipient's notes	
Security classification			

Distribution: The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 Lubbis Lund.

## ADAPTIV REGLERING

Karl Johan Åström  
Institutionen för reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola

### INLEDNING

Den enkla reglerkretsen baserad på negativ återkoppling har många bra egenskaper. Ärvärdet kan fås att nära överensstämma med börvärdet. Inverkan av störningar och processvariationer kan reduceras. I många fall kan variationerna i processens dynamik och störningarnas egenskaper dock vara så stora att bra reglering ej kan erhållas med en regulator med konstanta parametrar. Om regulatorn inställes så att den ger bra egenskaper vid ett drifttillstånd kan det inträffa att systemet blir instabilt eller alltför trögt vid ett annat drifttillstånd. I sådana fall ligger det nära till hands att använda mer komplicerade regulatorer som kan anpassa sig till variationerna i processdynamik och störningar. Sådana regulatorer kallas adaptiva.

Inom reglertekniken har man sedan länge försökt att konstruera adaptiva regulatorer. Ett patent av Caldwell från 1950 på en adaptiv pneumatisk regulator är ett tidigt exempel. I slutet på 50-talet var forskningen om adaptiv reglering mycket aktiv. Ett mål var att bygga adaptiva autopiloter för flygplan. Flera ideer utvecklades och provades experimentellt. Man stötte dock på svåra teoretiska och praktiska problem. Det faktum att ett flygplan (X-15) med en adaptiv autopilot störtade bidrog till att minska entusiasmen för adaptiv reglering och utvecklingen avstannade i början på 60-talet.

Forskningen om adaptiva regulatorer återupptogs i början på 70-talet. Reglerteorins stora framsteg under 60-talet gav en god bakgrund. Tillkomsten av mikrodatare, som gjorde det möjligt att enkelt förverkliga adaptiva regulatorer, var starkt pådrivande. Utvecklingen har resulterat i en aktiv verksamhet om adaptiv reglering på många håll i världen. Det är glädjande att notera att verksamheten i Skandinavien ligger väl framme inom området.

I detta föredrag ges en översikt av några huvudlinjer i utvecklingen av adaptiv reglering. Några grundläggande principer för adaptiv reglering presenteras i avsnitt 2. I avsnitt 3 diskuteras centrala teoretiska problem inom området. Tillämpningar behandlas i avsnitt 4. Där diskuteras bl.a. användning av adaptiv teknik för automatinställning av

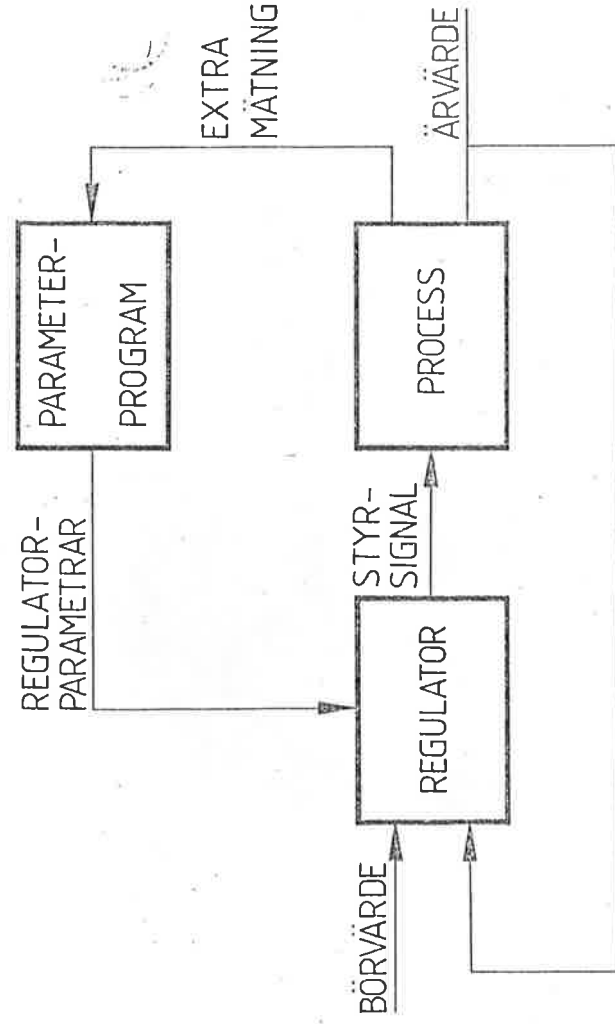
regulatorer. Möjligheten att konstruera nya typer av regulatorer med prestandaorienterade rättnar behandlas. Olika tillämpningar av adaptiv reglering i samband med laboratorieexperiment, industriella produkter redovisas också. Avslutningsvis ges en sammanfattning av dagsläge och framtidsutsikter för adaptiv reglering.

## PRINCIPER

I detta avsnitt ges en kortfattad beskrivning av några av de intuitiva ideer som ligger till grund för adaptiv reglering.

### Parameterstyrning

I vissa fall kan förändringarna i processdynamiken vara entydigt bestämda av mätbara storheter. För många processer är t.ex. produktionsnivån en sådan storhet. För reglering av flygplan kan processdynamiken väl beskrivas som funktion av höjd och hastighet. I sådana fall kan man dimensionera regulatorn för vissa drifttillstånd och göra en tabell av motsvarande regulatorparametrar. De regulatorparametrar som används i en given driftsituation bestäms sedan genom interpolation i tabellen. I stället för att utnyttja en tabell och interpolation kan man bestämma approximativa funktionsuttryck som ger regulatorparametrarna som funktion av drifttillståndet. Blockschemat för en regulator av denna typ framgår av Fig. 1. Denna reglerform kallas



Figur 1 - Blockschemat för regulator med parameterstyrning. Regulatorns parametrar bestäms som funktioner av drifttillståndet genom tabelluppslagning och interpolation.

parameterstyrning eller parameterprogrammering (eng. gain scheduling). Den regulator som erhålles kan tolkas som en olinjär regulator med flera mätsignaler. Drifttillståndet kan uppenbarligen också betraktas som en mätsignal. Skälet till att dela in mätsignalerna i två kategorier är att drifttillståndet ofta varierar betydligt långsammare än de övriga mätsignalerna.

Parameterstyrningen har många likheter med kompensering med hjälp av framkoppling. Man har dock ej lyckats att komma överens om parameterstyrning är en adaptiv reglering. Bortsett från nomenklaturen så är parameterstyrning ofta en mycket användbar teknik.

Dimensionering av en regulator baserad på parameterstyrning kan vara arbetskrävande. Det är nödvändigt att kartlägga hur processdynamiken varierar med processens driftförhållanden. Regulatorns parametrar bestäms sedan för ett antal driftfall. Sedan regulatorn erhållits är det nödvändigt att undersöka om systemet är stabilt inom hela driftområdet. Då det slutna systemet är olinjärt är detta mycket besvärligt, eftersom man endast i begränsad omfattning kan använda teori. I praktiken övertygar man sig om att systemet fungerar genom omfattande simuleringar. Det är också ett problem att bestämma hur många driftfall som skall finnas i tabellen och hur interpolationen skall utföras.

Ibland är det möjligt att ordna parameterstyrning genom att införa normaliserade variabler. Man kan då komma ifrån mycket av det arbete som normalt fordras för att använda tekniken. Mätningarna av processvariabler och drifttillstånd används då till att beräkna dimensionslösa variabler. Styrlagen uttrycks i den dimensionslösa variablerna. Sedan styrvariabeln beräknats transformeras den till fysikaliska storheter.

Det finns flera system där parameterstyrning används. I datorstyrda processreglersystem kan parametrarna i PID-regulatorer göras beroende av produktionen. Autopiloter för överljudsflygplan är paradexemplet på parameterstyrning. I detta fall görs regulatorparametrarna beroende av höjd och hastighet. Det finns autopiloter med tabeller för ett 30-tal flygfall. En kommersiell regulator för processstyrning som utnyttjar parameterstyrning har nyligen annonserats av Taylor Instrument.

Det finns många fall då det kan vara svårt att mäta processens drifttillstånd. I sådana fall kan adaptiv reglering användas. Det finns flera typer av adaptiva system. Några vanliga adaptiva reglerformer diskuteras nedan.

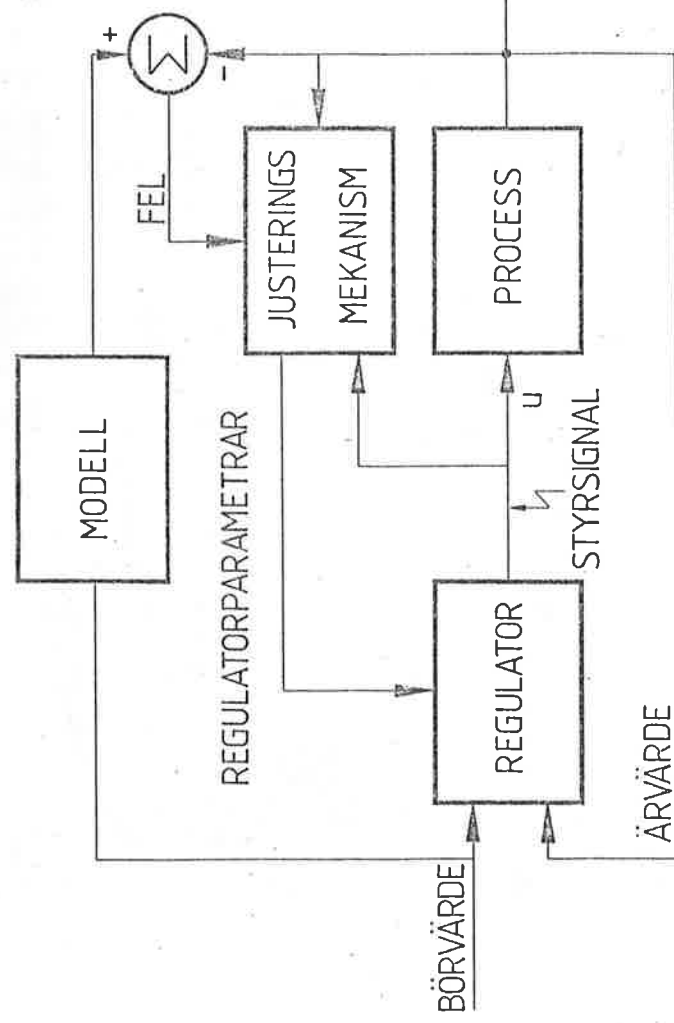
### Modellreferenssystem\_(MRAS)

Vid följereglering kan modellreferensmetoden användas. Systemets syfte anges då med en modell (referensmodellen) som beskriver hur systemet ideellt sett skall reagera på kommandosignalerna. Ett blockschema för ett

modellreferenssystem visas i Fig. 2. Jämför [1]. Observera att det finns två återkopplingsslingor. Den inre slingan är en vanlig reglerkrets bestående av processen och en regulator. Regulatorns parametrar justeras i den yttre kretsen. Denna krets strävar efter att ställa in regulatorns parametrar så att skillnaden mellan modellens utsignal  $y_M$

och processens utsignal  $y$  blir liten. Nyckelproblemet vid konstruktion av modellreferenssystem är att konstruera justeringsmekanismer som leder till stabila system där felet  $e = y_M - y$  går mot noll.

Detta problem är ej trivialt. Det går att visa att en linjär återkoppling från felet ej är tillräcklig. I det ursprungliga modellreferenssystemet användes en parameterjusteringsmekanism som beskrivs av



Figur\_2 - Blockschemat för modellreferenssystem.

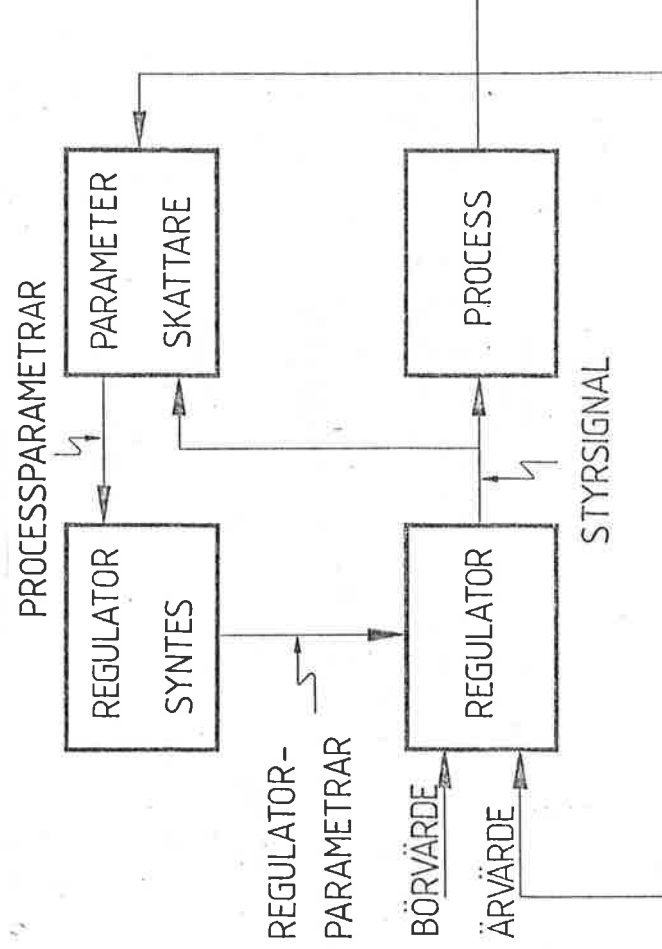
$$\frac{d\phi_i}{dt} = -k e \frac{\partial e}{\partial \phi_i} \quad (1)$$

där  $\phi_1, \phi_2, \dots$  betecknar regulatorns justerbara parametrar,  $e = u_M - y$ , är modellfelet och  $\frac{\partial e}{\partial \phi_i}$  är de s.k. känslighetsderivatorna, vilka anger hur reglerfelet påverkas av regulatorparametrarna. Talet  $k$  är en justerbar parameter, som bestämmer hur snabbt regulatorn adapterar. Ekvation (1) kallas 'MIT-regeln'. Den bestämmer en parameterjusteringsmekanism som består av tre delar, ett linjärt filter, som beräknar känslighetsderivatorna, en multiplikator och en integrator. Parameterjusteringsmekanismer med denna struktur är mycket vanliga.

MIT-regeln kan olyckligtvis ge slutna system som blir instabila. Regeln kan emellertid modifieras så att ett stabilt system erhålles. Det var först i slutet på 70-talet som man fick verklig förståelse för stabilitetsproblemen i dessa typer av system.

### Självinställande regulatorer (SIR)

En självinställande regulator är en annan typ av adaptiv regulator. Ett blockschema för en sådan regulator visas i Fig. 3. Jämför [2]. Regulatorn kan betraktas som om den bestod av tre delar: en vanlig regulator med justerbara



Figur\_3 - Blockschema för en självinställande regulator.

parametrar, en parameterskattare och en dimensioneringsberäkning.

Den självinställande regulatorn har också två slingor. Den inre slingan består av processen och den vanliga regulatorn. Regulatorns parametrar justeras i den yttre kretsen. Parameterjusteringen utförs på följande sätt. Parameterskattaren bestämmer parametrarna i en modell av processen genom att anpassa modellen till processens in- och utsignaler. En lämplig regulatorinställning beräknas sedan i dimensioneringsblocket. Parameterskattningen och regulatorns parametrar uppdateras i varje samplingsintervall.

Det finns många varianter av självinställande regulatorer, eftersom parameterskattningen och regulatorns dimensionering kan göras på många olika sätt. Parameterskattningen kan t.ex. utföras med minstakvadratmetoden eller någon av dess varianter, med instrumentvariabler, med utvidgade Kalmanfilter eller med maximumlikelihoodmetoden. Styrlagen kan också bestämmas på många sätt, med polplacering, modellföljning, minimalvariansstyrning, med linjär-kvadratisk optimering eller med tumregler. En översikt av några olika typer av självinställare ges i [3].

Det system som visas i Fig. 3 är baserat på explicit identifiering, eftersom en explicit processmodell identifieras. Regulatorns parametrar erhålles sedan indirekt genom att utföra dimensioneringen. I vissa fall kan processmodellen parametreras om så att regulatorns parametrar uppdateras direkt av identifieringsalgoritmen. Detta kallas adaptiv reglering baserad på implicit processmodell. En sådan självinställare är nära besläktad med ett modellreferenssystem.

## TEORI

Man kan ännu inte tala om en enhetlig teori för adaptiva system. Det är snarare så att olika problem i anslutning till adaptiva system har behandlats med olika metoder. Ett mål för teoriutvecklingen har varit att analysera adaptiva system med given struktur. Ett annat och vidare mål har varit att formulera generella problem som leder till adaptiv reglering. Förhoppningen har bl.a. varit att få uppslag till nya systemstrukturer.

Adaptiva regulatorer är olinjära system. Detta medför som regel att analysen är svår, i synnerhet om man vill studera hur systemen uppför sig vid slumpvisa störningar. Stabilitetsvillkor för enkla självinställande regulatorer har nyligen erhållits av Goodwin m.fl. [4] och Egardt [5]. Resultaten bygger på starka antaganden. De system som regleras måste ha en stabil invers, dessutom måste den modell som används i regulatorn åtminstone vara lika

komplicerad som den process som skall regleras. Vidare måste systemets tidsfördröjning vara känd.

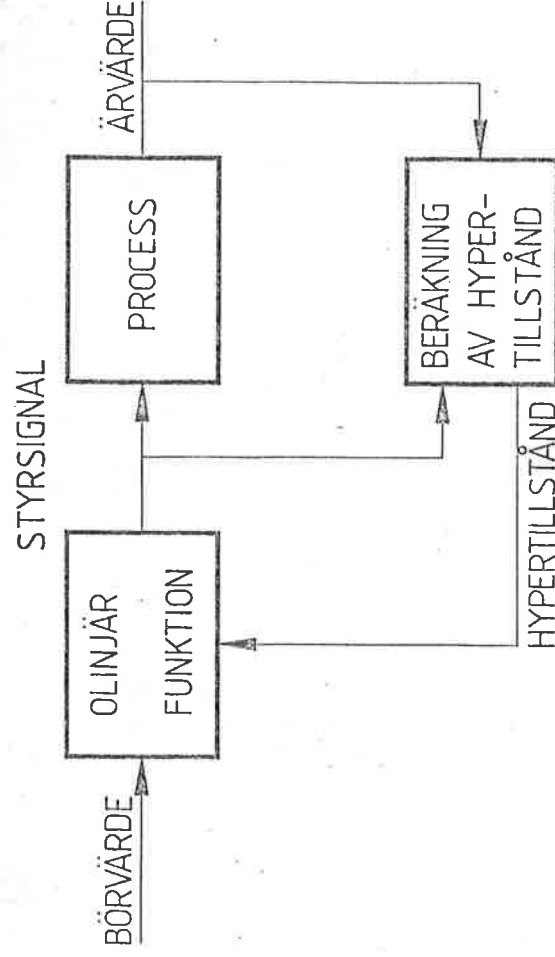
Eftersom parameterskattning ingår som en viktig del i många system är det viktigt att undersöka hur de skattade parametrarna uppför sig. Problemet att bestämma möjliga jämviktsvärden för parametrarna var ett av de första problem som behandlades av Åström och Wittenmark [2]. Detta visade bl.a. att den enkla självinställaren baserad på skattning med minstakvadratmetoden och minimalvariansreglering ställer in sig mot en optimal regulator även om parameterskattaren har medelvärdesfel. Differentialekvationer som approximativt beskriver hur parameterskattningarna uppför sig har också angivits av Ljung [6] och Kushner [7]. Många andra problem, t.ex. parameterskattning i slutna krets, har också undersökts.

Trots de framsteg som gjorts finns det fortfarande många obesvarade frågor.

### Stokastisk\_reglerteori

Adaptiva regulatorer av typen MRAS och STR är strukturer som motiverats utifrån intuitivt rimliga men godtyckliga utgångspunkter. Det skulle vara tilltalande att ha regulatorstrukturer som bygger på grundläggande principiella resonemang. Detta går att göra om man startar med olinjär stokastisk reglerteori. Se t.ex. [8]. Systemet och dess omgivning beskrivs då med stokastiska modeller. Regleringens ändamål anges som att maximera en prestandafunktion.

Problemet att finna en styrlag som maximerar prestandafunktionen är svårt. Lösningen ges av den s.k. Bellman-ekvationen. Denna ekvation kan lösas numeriskt endast för vissa enkla problem. Trots detta är lösningen av intresse, ty den ger insyn i den optimala regulatorns struktur. Den optimala regulatorn kan beskrivas som bestående av två delar, en observerare som beräknar den betingade sannolikhetsfördelningen av det okända systemets tillstånd och parametrar, och en regulator som beräknar lämpliga styringrepp utgående från sannolikhetsfördelningen. Den betingade fördelningen kallas systemets hypertilstånd (eng. hyperstate). Observeraren är ett dynamiskt system medan regulatorn kan uppfattas som en statisk olinjäritet. Bellmanekvationen ger en funktionalekvation som gör det möjligt att bestämma styrvariabeln som en funktion av hypertilståndet. Den centrala svårigheten är att hypertilståndet har mycket hög dimensionalitet. Ett blockschema för en stokastisk adaptiv regulator visas i Fig. 4. Eftersom det är svårt att lösa Bellmanekvationen, är det intressant att undersöka approximationer. Ett enkelt exempel används som illustration.



Figur 4 - Blockschemat för adaptiv regulator som erhålles ur den stokastiska reglerteorin. Hypertillståndet genereras från ett dynamiskt system med  $u$  och  $y$  som insignal. Styrsignalen genereras som en olinjär funktions av hypertillståndet  $w$ .

### Ett exempel

Betrakta en process som kan beskrivas av ekvationen

$$y(t+1) = y(t) + b u(t) + e(t), \quad (2)$$

där  $u$  är insignal,  $y$  utsignal,  $e$  vitt brus och  $b$  en okänd parameter. Ekvation (2) kan tolkas som en samplad integrator med okänd förstärkning. Antag att vi vill reglera systemet så att utsignalen är så nära noll som möjligt i medelkvadratmening.

Om parametern  $b$  är känd så ges lösningen av

$$u(t) = -\frac{1}{b} y(t), \quad (3)$$

dvs. av en proportionell reglering. Om parametern  $b$  har en apriorifördelning som är normal och om störningen  $e$  också är normalfördelad så går det att visa att fördelningen av  $b$  betingat av observationer av insignal och utsignal också är normalfördelad. Låt det betingade medelvärdet vara  $\hat{b}$  och den betingade variansen  $P$ . Det går bra att ange ekvationen för  $\hat{b}(t)$  och  $P(t)$ . I detta speciella fall utgöres processens hypertillstånd av de tre talen  $y$ ,  $\hat{b}$  och  $P$ .

Den bästa uppskattning av processförstärkningen  $b$ , som kan

bortser från att uppskattningen är osäker kunde styrlagen (3) approximeras med

$$u(t) = -\frac{1}{\hat{b}} y(t). \quad (4)$$

Denna reglerstrategi kallas säkerhetsekvivalensprincipen. Den erhålles helt enkelt genom att ersätta de okända parametrarna med skattningar. De självinställande regulatorerna är av denna typ.

Observera att styrlagen (4) kan ge upphov till svårigheter. Det kan inträffa att skattningen  $\hat{b}$  blir mycket liten. Regulatorns förstärkning blir då mycket stor och systemet kan bli instabilt. Det kan också hända att skattningen får fel tecken, vilket också kan leda till instabilitet. Denna svårighet kan i viss utsträckning undvikas genom att byta variabler så att parametern  $1/\hat{b}$  skattas i stället för  $\hat{b}$ .

En annan approximation till den optimala lösningen ges av

$$u(t) = -\frac{\hat{b}}{\hat{b}^2 + p} y(t) = -\frac{1}{\hat{b} + p} y(t). \quad (5)$$

Denna styrlag kallas försiktig reglering (eng. cautious control), eftersom den proportionella regulatorns förstärkning minskas då uppskattningen blir osäker. Med försiktig reglering undviks de svårigheter som kan uppstå med säkerhetsekvivalensprincipen då skattningen  $\hat{b}$  är liten. Den försiktiga regulatorn har dock en annan nackdel. Om den används på ett stabilt system så kan det hända att regleringen helt upphör. Detta har givits det talande namnet insomningseffekten. Man kan intuitivt förstå vad som händer med följande resonemang. Om parameterskattningen blir osäker så minskar förstärkningen. Styrsignalen blir då liten. Parameterskattningen blir ännu sämre, vilket medför att förstärkningen minskar, osv.

I det enkla exemplet kan Bellmanekvationen lösas numeriskt.

Styrlagen ger  $u$  som en funktion av  $y$ ,  $\hat{b}$  och  $p$ . Styrlagen är komplicerad. För mycket stora värden på kvoten  $\hat{b}^2/p$  så att den nära säkerhetsekvivalensprincipen. För måttliga värden på kvoten är lösningen nära försiktig reglering. För små värden på kvoten visar det sig att den optimala regulatorn inför extra styrsignaler för att få bättre precision i skattningarna av systemets förstärkning. Styrsignalen väljes så att den balanserar förväntad regleravvikelse mot

förbättrad skattning på bästa möjliga sätt. Detta kallas dual\_reglering.

Detta enkla exempel visar att värdefull insyn kan erållas ur teorin även om teorin ej kan ge lösningen till konkreta reglerproblem. Exemplet ger också en fingervisning på de villkor som måste gälla för att en självinställande regulator skall vara en rimlig lösning.

## TILLÄMPNINGAR

Den adaptiva tekniken kan i praktiken användas på många olika sätt. Några tänkbara användningssätt diskuteras i dessa avsnitt. En kortfattad sammanfattning av praktiska erfarenheter ges också.

### Användningssätt

Det framgår av Fig. 3 att den självinställande regulatorn blir en vanlig regulator med konstanta parametrar om parametterskattaren kopplas bort. Självinställaren kan användas som ett inställningshjälpmedel för olika regulatorer. I en sådan tillämpning kopplas parameterinställaren in så länge som behövs för att få goda regulatorparametrar. Därefter kopplas parameterskattaren bort. Detta kan tillämpas såväl för enkla regulatorstrukturer av PID-typ som för mer komplicerade reglerformer. Denna typ av inställningshjälpmedel kan lätt inkorporeras i DDC-paket. Det är också möjligt att utforma regulatorer för en krets med en knapp på panelen för automatisk inställning av regulatorn.

Diskussioner om konkreta tillämpningar av adaptiv teknik leder ofta till resonemang om hur regulators frontpanel skall se ut. Det framförs ofta som ett önskemål att det inte skall finnas några knappar på regulators framsida. Möjligen tolereras en till-från knapp. Sådana krav leder ofta till orimligheter. Regulators önskade egenskaper måste under alla omständigheter anges. För detta ändamål kan det vara mycket tilltalande att införa prestandarelaterade knappar. För ett självinställande servo kan man t.ex. ha en knapp som är graderad i det slutna systemets önskade bandbredd. En sådan knapp är meningsfull. Det är också lätt för en operatör att ställa in en sådan knapp.

De adaptiva regulatorerna kan också användas för att bygga upp de tabeller som fordras för parameterstyrning. En självinställande regulator kopplas in då processen är i ett givet drifttillstånd. De erhållna regulatorparametrarna lagras i en tabell som successivt kompletteras då processen körs i olika drifttillstånd. Man kan också utjämna tabellvärdena. På detta sätt får man en tabell som antingen kan användas

för vanlig parameterstyrning. Tabellvärdena kan också användas som startvärdet för en självinställare. På detta sätt kan man förbättra insvängningstiderna.

Slutligen kan självinställande regulatorer användas som adaptiva regulatorer för processer som kräver kontinuerlig trimning av regulatorparametrarna.

### Praktiska erfarenheter

Den adaptiva tekniken har nu provats av många forskargrupper i många olika tillämpningar. Sammanställningar av resultat med omfattande referenser finns i [9] och [10]. I [11] ges en mer detaljerad diskussion med flera referenser.

Olika typer av adaptiva regulatorer har provats på laboratorieprocesser. Bland de processer som studerats märks servosystem, motordrifter, nivåreglering, destillationskolonner, kemiska reaktorer, pH-reglering mm.

Lämplighetsstudier av adaptiv reglering har också genomförts på industriella processer. Adaptiva regulatorer har provats för styrning av farkoster, för processreglering i kraft-, cement-, stål-, kemi-, glas-, pappers- och cellulosa-industri. I Skandinavien har den t.ex. provats på ytvikts- och fukthaltsreglering på pappersmaskiner, nivåreglering av kokare, reglering av cementugnar mm.

Adaptiv teknik har också börjat finna sin väg ut i industriella produkter. I Sverige tillverkar Kockumation AB en adaptiv autopilot för båtar, som innehåller en självinställare. ASEA har annonserat en adaptiv regulator Novatune som baseras på en självinställare. Det finns också andra adaptiva regulatorer, som snart kommer ut på marknaden.

### SLUTSATSER

Olika principer för adaptiv reglering har diskuterats. Ord såsom adaptivitet och självinställning kan lätt leda till den felaktiga slutsatsen att denna teknik är någon undermedicin som blint kan användas i alla situationer. Detta är inte sant. Adaptiv teknik leder till jämförelsevis komplicerade styrningar. Vi har ännu mycket att lära innan vi behärskar denna nya teknik. Det betyder att vi måste lära oss att förstå de situationer då tekniken passar men också de fall då tekniken är olämplig. En adaptiv regulator skall naturligtvis inte användas om ett reglerproblem kan lösas med en enklare regulator.

Den adaptiva tekniken ger dock nya möjligheter för reglertekniken. Det är min förhoppning att detta föredrag

kan stimulera till att pröva några av möjligheterna.

#### REFERENSER

- 1 Landau Y.D.: Adaptive control - The model reference approach. New York, Marcel Dekker, 1979.
- 2 Aström K.J. & Wittenmark B.: On self-tuning regulators. *Automatica* 9 (1973) pp. 185-199.
- 3 Aström K.J.: Self-tuning regulators - Design principles and applications. I [9].
- 4 Goodwin G.C., Ramadge P.J. & Caines P.E.: Discrete time multi-variable adaptive control. *IEEE Trans. AC-25* (1980) pp.449-456.
- 5 Edgardt B.: Stability of adaptive controllers. Berlin. Springer, (1979).
- 6 Ljung L.: Analysis of recursive stochastic algorithms. *IEEE Trans. AC-22* (1977) pp. 551-575.
- 7 Kushner H.J. & Hai Huang: Averaging methods for the asymptotic analysis of learning and adaptive systems with small adjustment rate. *SIAM J. on Control and Optimization* (1980), to appear.
- 8 Aström K J.: Stochastic control problems. I Coppel W.A. (red.), *Mathematical control theory*. Berlin, Springer, 1978.
- 9 Narendra K.S. & Monopoli R.V. (red.): *Applications of adaptive control*. New York, Academic Press, 1980.
- 10 Unbehauen H. (red.): *Methods and applications in adaptive control*. Berlin, Springer, 1980.
- 11 Aström K J: *Theory and applications of adaptive control*. - Plenary lecture. Preprints 8th IFAC World Congress Kyoto 1981.

# ADAPTIV REGLERING

Karl Johan Åström  
Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola

1. INLEDNING
2. PRINCIPER
3. TEORI
4. TILLÄMPNINGAR
5. SLUTSATSER

## ADAPTIV REGLERING

### 1. INLEDNING

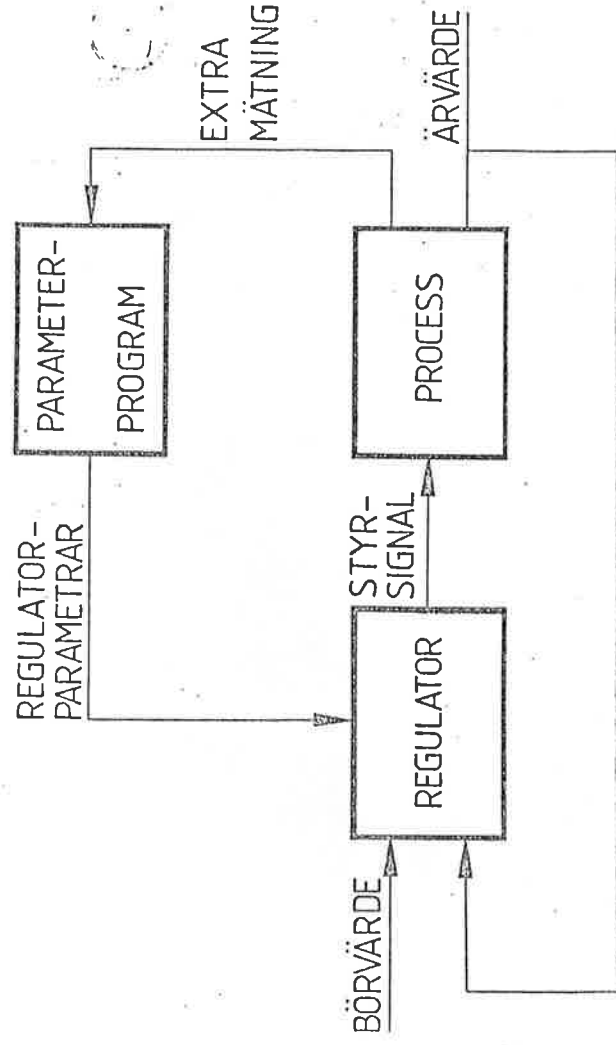
### 2. PRINCIPER

Parameterstyrning  
Modellreferenssystem  
Självinställare

### 3. TEORI

### 4. TILLÄMPNINGAR

### 5. SLUTSATSER



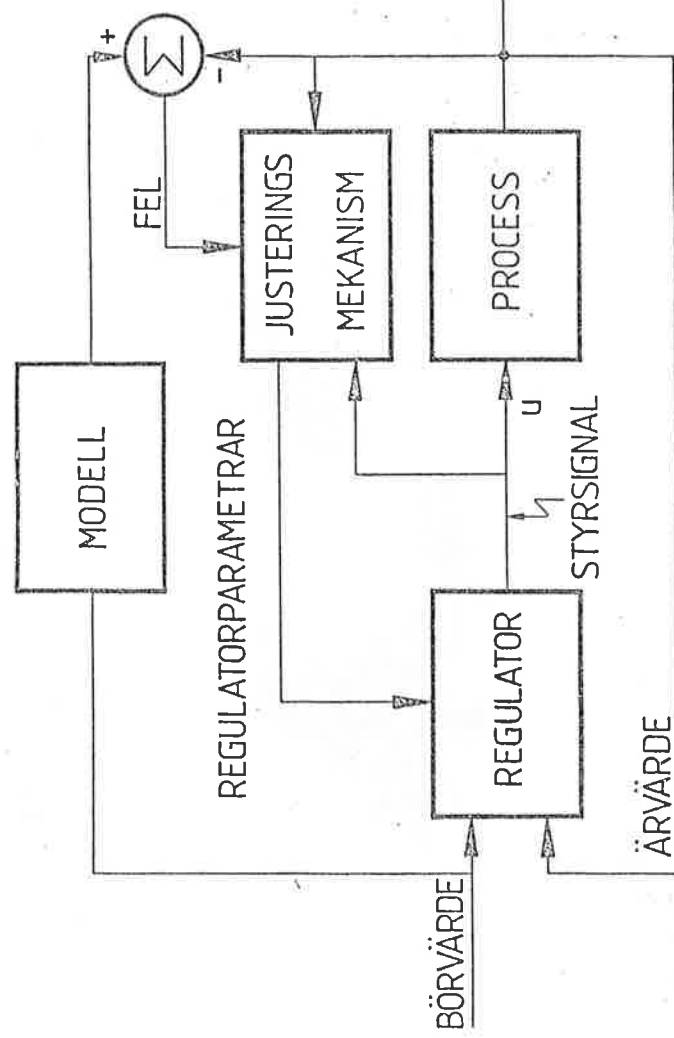
## MODELLREFERENSMETODEN

WHITAKER MIT  
"MIT-regeln"

$$\frac{d\theta}{dt} = -k \frac{\partial e}{\partial \theta} \cdot e$$

### STABILITETSPROBLEM

Lyapunovteori  
Parks, Narendra  
Hyperstabilitet  
Landau  
"Augmented error"  
Monopoli  
Nya resultat  
Goodwin, Egardt  
Narendra, Morse



# T E O R I

---

## TEORINS ROLL

Kan ge insyn, förståelse  
och ideer men sällan  
realistiska lösningar  
till praktiska problem

## STABILITETSANALYS

## KONVERGENSANALYS

## STRUKTURTEORI

# ADAPTIV REGLERING

## 1. INLEDNING

## 2. PRINCIPER

## 3. TEORI

Begreppsbildning  
Analyserktyg  
Syntesverktyg

## 4. TILLÄMPNINGAR

## 5. SLUTSATSER

LEXER

$$y(t+1) = y(t) + b u(t) + e(t)$$

MÄTSIGNAL

STY2 SIGNAL

MINERA

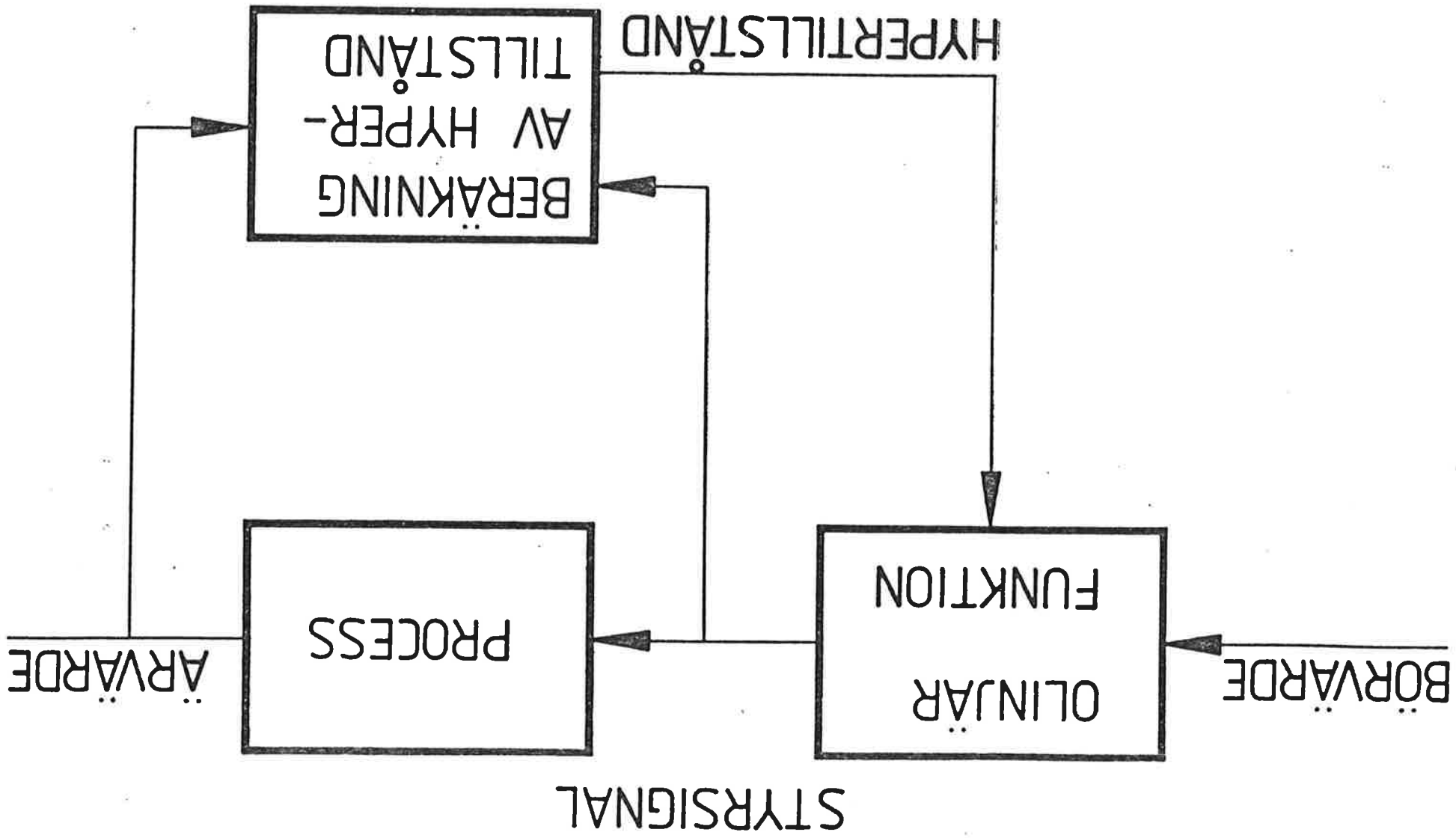
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{n^2} = 0$$

$$p - \frac{1}{p} = (f) \infty$$

$\frac{1}{k} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}}}$

$$u(t) = -\frac{1}{k} \cdot \frac{g^2}{g^2 + b^2}$$

$$w(t) = f\left(\frac{t}{\tau}\right)$$



# HUR SKALL DEN ADAPTIVA TEKNIKEN ANVÄNDAS?

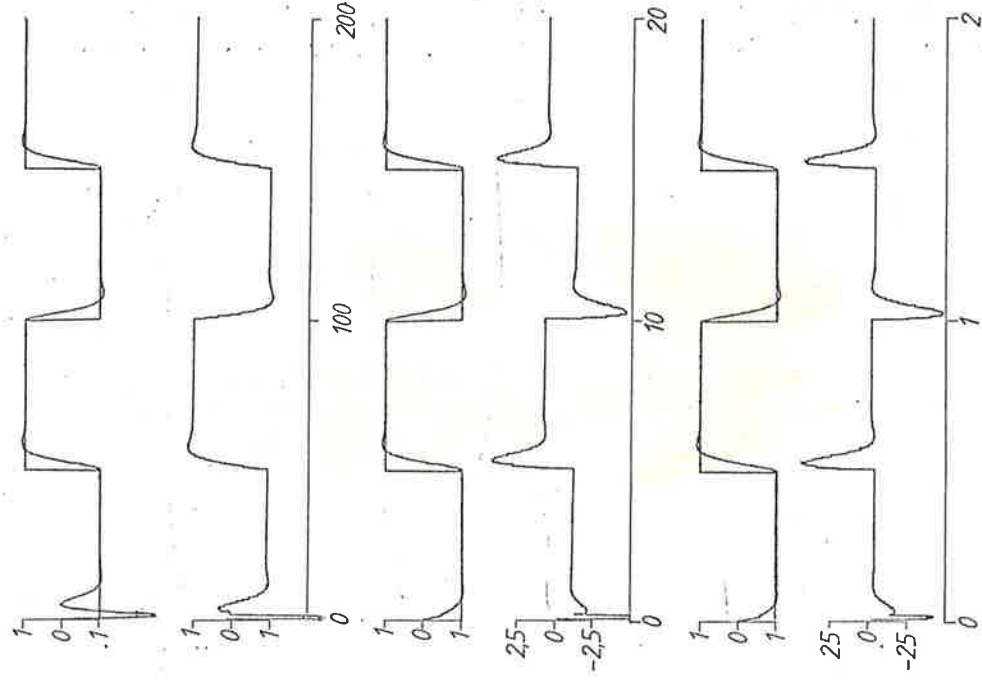
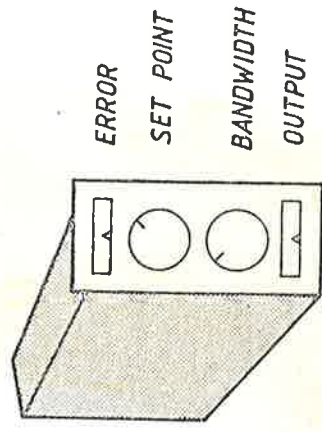
---

AUTOMATINSTÄLLNING  
hand/auto/tune

BYGGA TABELLER FÖR  
PARAMETERSTYRNING

ADAPTIV REGLERING  
knapplös  
prestandarelaterade  
knappar  
fasmarginall  
responstid  
optimeringskriterier

# THE BANDWIDTH SELF-TUNER



# TILLÄMPNINGAR

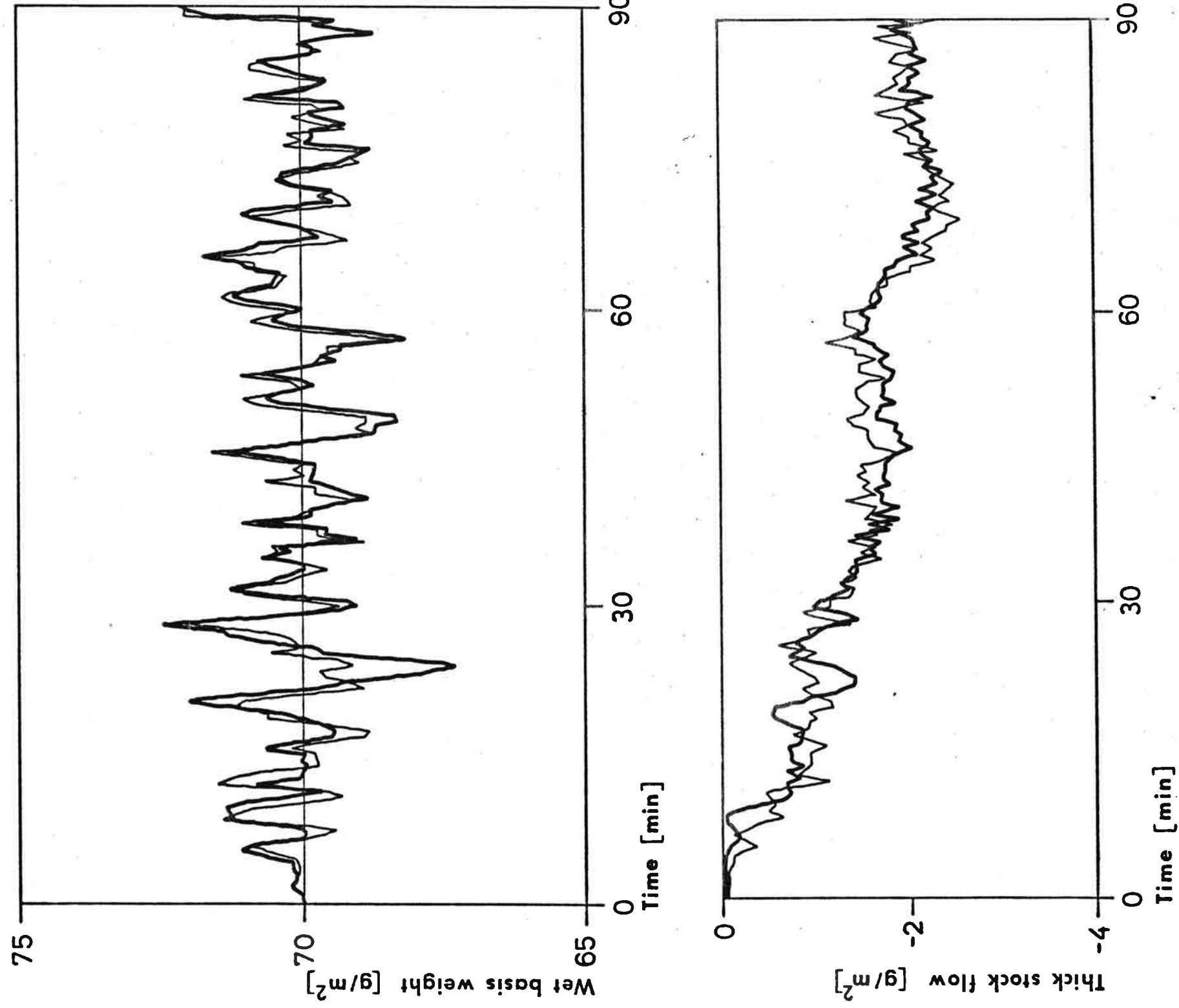
-----  
SIMULERING

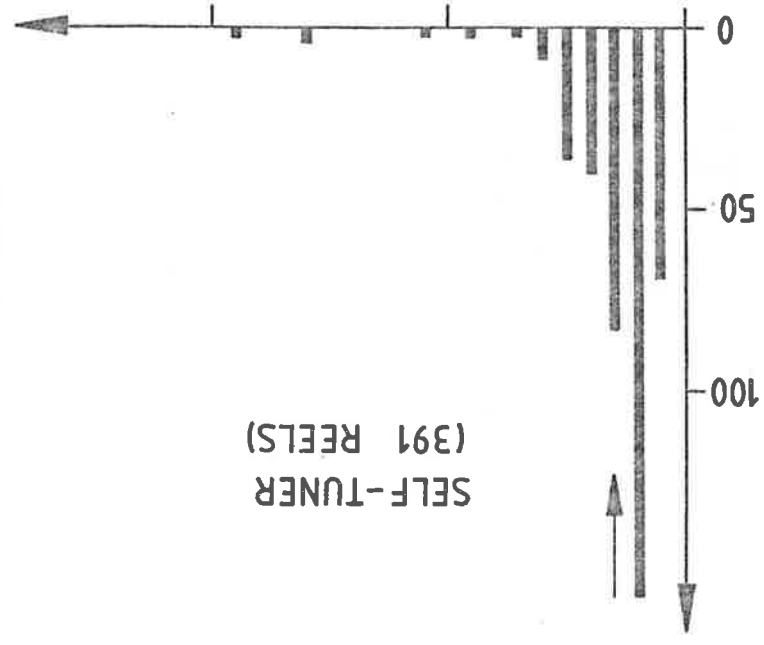
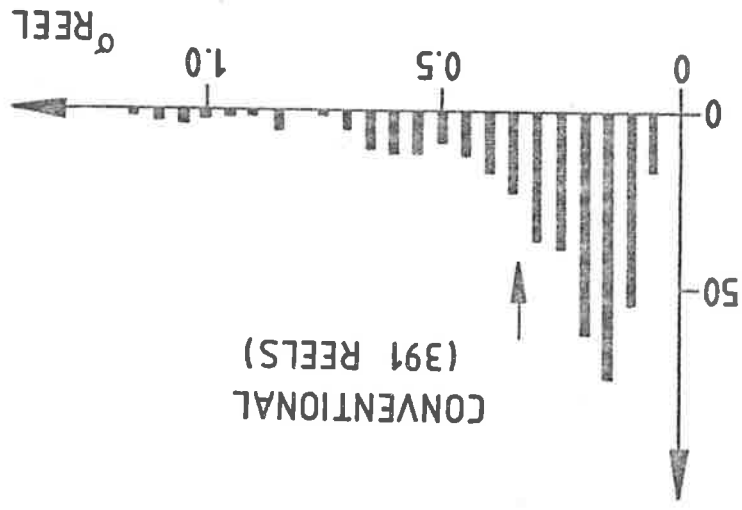
LABEXPERIMENT

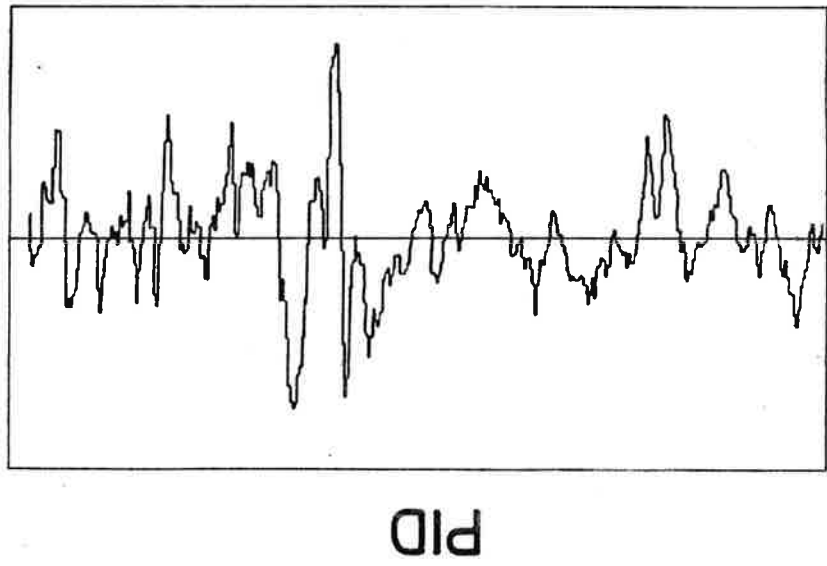
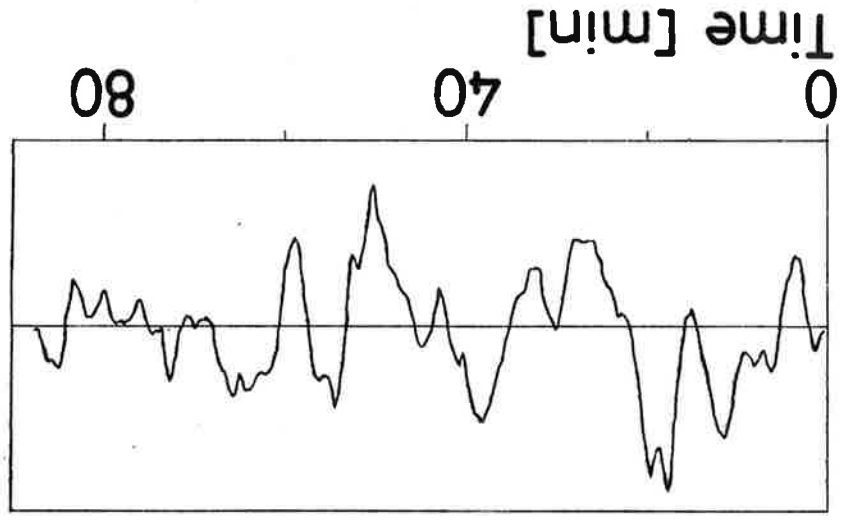
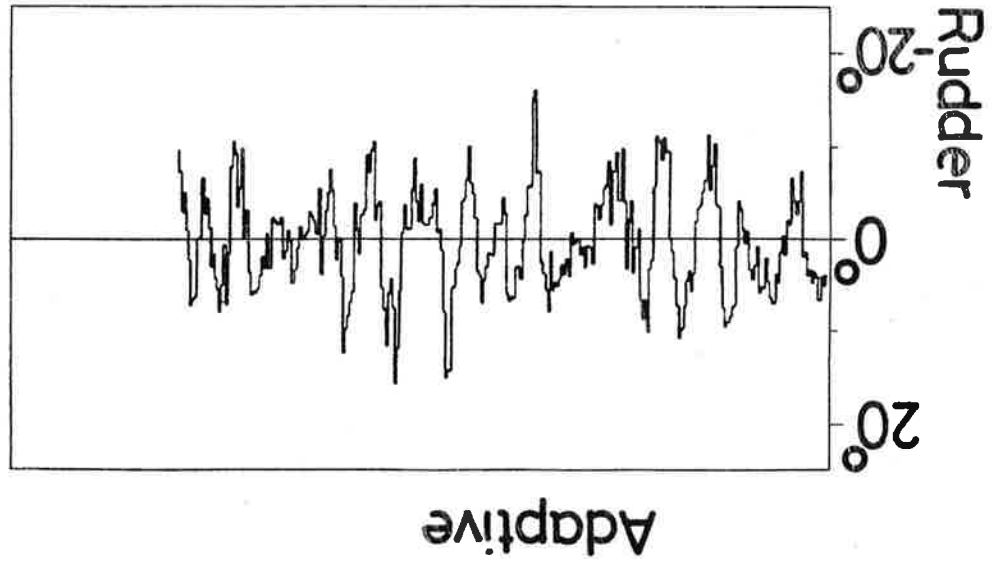
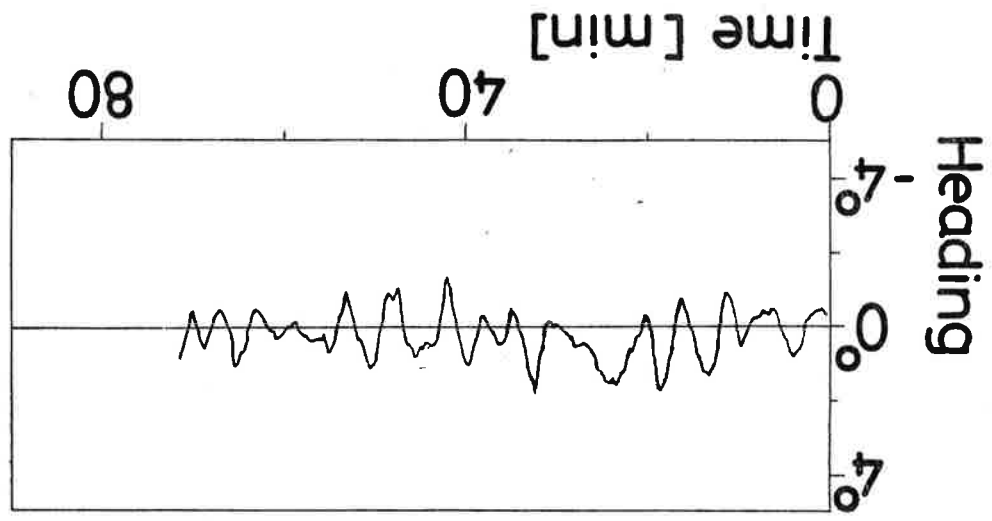
INDUSTRI

LÄMPLIGHETSSUDIER  
PRODUKTER

Figure 9







# ADAPTIV REGLERING

1. INLEDNING

2. PRINCIPER

3. TEORI

4. TILLÄMPNINGAR

5. SLUTSATSER

# SLUTSATSER

---

INDUSTRIELL ANVÄNDBARHET AV  
ADAPTIV TEKNIK HAR VISATS

VI BÖRJAR FÖRSTA HUR SYSTEMEN  
FUNKERAR. ARBETE ÅTERSTÅR!

TEKNIKEN GER INTRESSANTA  
MÖJLIGHETER TILL NYA LÖSNINGAR

SYSTEMEN KAN LÄTT FÖRVERKLIGAS  
MED MIKRODATORER