



LUND UNIVERSITY

Adaptiv reglering

Åström, Karl Johan

1986

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Åström, K. J. (1986). *Adaptiv reglering*. (Research Reports TFRT-3185). 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

CODEN: LUTFD2/(TFRT-3185)/1-27/(1986)

ADAPTIV REGLERING

Karl Johan Åström

Institutionen för Reglerteknik

Tekniska Högskolan i Lund

November 1986

Department of Automatic Control Lund Institute of Technology P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> FINAL REPORT	
		<i>Date of issue</i> November 1986	
		<i>Document Number</i> CODEN: LUTFD2/(TFRT-3185)/1-27/(1986)	
<i>Author(s)</i> Karl Johan Åström		<i>Supervisor</i>	
		<i>Sponsoring organisation</i> The Swedish Board for Technological Development (STU)	
<i>Title and subtitle</i> Adaptiv reglering (Adaptive Control)			
<i>Abstract</i> <p>This final report summarizes the project 82-3430 from the Swedish Board for Technical Development (STU).</p> <p>In the project, several aspects of adaptive control have been considered, such as adaptive start-up control, adaptive multivariable control, new algorithms, operational aspects and robustness. A simple method for automatic tuning of PID controllers has also been developed and patented. A combination of automatic control and artificial intelligence, called expert control, has shown to be a promising way to solve the safety problems in adaptive control.</p> <p>The report contains a description of these topics as well as a list of publications and personnel involved in the project.</p>			
<i>Key words</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i>		<i>ISBN</i>	
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 27	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

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.

Slutrapport STU projekt 82-3430

ADAPTIV REGLERING

Karl Johan Åström

Institutionen för Reglerteknik
Tekniska Högskolan i Lund

1986

Innehåll

1. Inledning	3
2. Adaptiva algoritmer för flervariabla system	5
3. Adaptiv reglering av tidsvariabla system	8
4. Adaptiv stabilisering	10
5. Robusthet för adaptiva regulatorer	12
6. Dual reglering	13
7. Automatisk inställning av PID-regulatorer	14
8. Expertreglering	15
9. Experimentell verksamhet	17
10. Kunskapsspridning	18
11. Slutsatser	19
12. Litteraturförteckning	21
Appendix - Deltagande forskare	27

1. Inledning

Forskning om adaptiv reglering har förekommit sedan slutet av 60-talet vid Institutionen för Reglerteknik vid LTH. Inriktningen har varit både teoretisk och experimentell. Forskningen har varit framgångsrik och bildat skola. Många forskargrupper inom universitet och industri har tagit upp våra idéer.

Planerna för projektet adaptiv reglering 82-3430 har beskrivits i Åström (1982). Projektet, som var en fortsättning på tidigare verksamhet, planerades ursprungligen för en treårsperiod med slut 1 juli 1985 men projektet förlängdes till den 31 december 1985. I planerna avsågs att undersöka adaptiv reglering av startförlopp, adaptiv reglering av flervariabla system, nya adaptiva algoritmer och operativa synpunkter på adaptiva regulatorer.

Arbetet har följt de uppgjorda planerna med god framgång. Rolf Johansson har lyckats väl med stabilitetsanalysen och Bengt Mårtensson har nått fina resultat om vilken information som krävs för att genomföra adaptiv reglering. Tre oväntade saker har dock inträffat.

- 1) Det blev ett mycket stort internationellt intresse för robusthet hos adaptiva regulatorer. Vi beslutade oss därför att arbeta även på detta område.
- 2) Åström och Hägglund hittade på en mycket enkel metod för automatisk inställning av enkla regulatorer som patenterats. Patentet har förvärvats av NAF (numera Satt Control Instruments) som konstruerat två produkter som bygger på patentet. Idén har också givit upphov till en rad nya intressanta teoretiska frågeställningar.
- 3) Möjligheten att kombinera automatinställning med adaptivitet har också inspirerat oss till att kombinera reglerteknik med AI-metodik. Detta har lett till ett nytt forskningsområde som ser mycket lovande ut. Resultaten har t.ex. öppnat vägen för ett helt nytt angreppssätt på säkerhetsproblemet för adaptiv reglering. En förstudie för detta initierades inom projektet. De preliminära resultaten har utnyttjats inom STU:s ramprogram för Computer Aided Control Engineering (CACE). Resultaten har också påverkat STU:s programskrivning för expertbaserade styrsystem och planeringen för DUP projektet.

Våra forskningsresultat har uppmärksammats nationellt och internationellt med inbjudningar till föredrag, utmärkelser och belöningar.

Vi har gemensamt med NSF och STU genomfört ett svensk-amerikanskt symposium om adaptiv reglering, juli 1984 i Lund. På uppdrag av IFAC (International Federation of Automatic Control) genomförde vi också den andra IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing i Lund 1-3 juli 1986.

I följande avsnitt ges en kortfattad sammanfattning av metoder och resultat inom de centrala områden vi bearbetat. För ytterligare detaljer hänvisas till lägesrapporterna K J Åström "Projektet Adaptiv Reglering", sept 1983 och sept 1984, samt till övriga rapporter och publikationer som listats i avsnitt 12. Rapporten avslutas med en sammanfattning.

2. Adaptiva algoritmer för flervariabla system

Med flervariabla system avses system med flera in- och utsignaler. Dessa har en rad egenskaper som aldrig uppträder i enkla system med en styrsignal och en mätsignal.

Ett arbetssätt vid adaptiv algoritmutveckling omfattar studier av såväl lämpliga dimensioneringsmetoder som identifieringsmetoder. Utgångspunkten var att få fram algoritmer för adaptiv reglering av flervariabla system så att parameteridentifiering och styrlagsberäkning kan ske med måttlig beräkningsbörda.

Parameteridentifieringen utfördes med vanliga skattningsmetoder såsom minsta-kvadrat-metoden eller någon gradientmetod. Vidare förutsattes parametriseringen ske på ett sådant sätt, att styrlagen kunde uträknas med användning av enbart addition och multiplikation av matriser. Dessa villkor uppsattes för att undvika alltför omfattande beräkningar. Det är särskilt viktigt att undvika algoritmer, som omfattar matrisinversion. Denna typ av operationer är beräkningskrävande och därför olämpliga att inkorporera i adaptiva system, där rekursiva operationer används. Dessutom kan svårigheter uppträda om den matris som skall inverteras är dåligt konditionerad.

När det gäller dimensioneringsmetoder, är situationen inte lika överskådlig. I fallet med en styrsignal och en mätsignal kan många olika syntesmetoder, som bygger på optimering med hjälp av ett kriterium såsom minimal-variens-strategi, linjär-kvadratiske metoder etc., ofta återföras på s.k. polplacering. Detta ger möjlighet till en bekväm och generell lösning på en rad olika dimensioneringsproblem. I det flervariabla fallet finns tyvärr inte lika välutvecklade metoder. Det är ofta svårt att i det allmänna fallet av t.ex. minimal-variens-strategin ange explicita uttryck på hur exempelvis styrlagen skall beräknas. Polplacerings-metoderna är i sig emellertid möjliga att generalisera till det flervariabla fallet. Man erhåller då resultat, som kan tolkas i termer av stigtider, tidskonstanter etc. Eftersom, dessa metoder också är matematiskt hanterliga, valdes de som dimensioneringsmetoder för de flervariabla adaptiva algoritmerna.

Ytterligare ett dimensioneringsproblem har studerats, nämligen dynamisk särkoppling. Detta problem har ingen motsvarighet i fallet med en insignal och en mätsignal utan är ett renodlat flervariabelt problem. I vissa dimensioneringar av servon har man intresse av att styra ett antal utsignaler oberoende av varandra,

så att man slipper inverkan av korskopplingar mellan signalerna. Ett lättare specialfall innebär, att man tillåter statiska kopplingar mellan de olika signalerna. Detta fall har inkorporerats i de utvecklade flervariabla polplaceringsalgoritmerna. Det mera komplicerade fallet, med dynamiska korskopplingar har också utretts, och algoritmer har utvecklats för adaptiv dynamisk särkoppling av linjära system.

De uppnådda resultaten har presenterats i en doktorsavhandling av Rolf Johansson. Den omfattar algoritmer för

- 1) Adaptiv polplacering och reglering
- 2) Adaptiv dynamisk särkoppling

Viss möda har också lagts ner på att minimera och beskriva den förhandsinformation om den styrda processen som måste inkorporeras i en adaptiv regulator för att erhålla ett system, som skall ha utsikter att fungera.

Stabilitet

En användbar regulator måste ge ett stabilt slutet system. Olika typer av stabilitetsbedömningar syftar till att värdera regulatorns förmåga att stabilisera det slutna systemet. Vidare vill man ha en uppfattning om regulatorns störkänslighet och dess förmåga att fungera under icke-ideala betingelser.

De hittills existerande stabilitetsbevisen, som rör adaptiva regulatorer, visar att styrfelet vid brusfrihet avtar med tiden - dock utan att kunna ange någon konvergenshastighet. Denna stabilitetskvalitet är i svagaste laget för praktiska ändamål, där man ofta vill kunna ange hur snabbt felet klingar av.

En elegant men oftast svåränvänd metod är att ange en s.k. Lyapunov-funktion för det undersökta systemet. Denna ger ett mått på den totala signalenergin i systemet. Om den avtar med tiden, så kan man ur detta sluta sig till stabilitet. Vidare följer flera resultat automatiskt, såsom okänslighet för mindre störningar. En del olinjäriteter, kan också tolereras. Ett sätt att bestämma dylika Lyapunov-funktioner har angivits för en klass av tidsdiskreta adaptiva system. Ur de egenskaper, som följer, kan man visa exponentiell konvergens med en viss tidskonstant för styrfelet.

Adaptiv styrning av processer med återflöde

Styrning av processer som innehåller material- eller vätskeflöden är vanliga regleruppgifter. Dessa processer har en del karakteristiska egenskaper som gör dem svåra att reglera med traditionella regulatorer. Transportfördröjningar är en typisk svårighet, som naturligt uppkommer vid styrning av materialflöden. Detta har exempelvis stimulerat utvecklingen av dödtidskompenserande regulatorer. Ett annat och litet svårare problem utgöres av transportfördröjningar kombinerade med återflöde eller cirkulation av material. Sådana system uppkommer då produkten inte har kunnat godkännas och därför återförs till tidigare steg i processen för ombearbetning. Det visar sig relativt svårt att både styra sådana processer och att ställa in regulatorer för dem. Det är ej heller trivialt att bygga modeller, som beskriver sådana processer. Ett försök är att formulera modeller baserade på s.k. retarderade differentialekvationer. Denna ansats har utnyttjats i ett utarbetat förslag till adaptiv styrning av sådana processer. Metoden och några lovande resultat finns beskrivna i artikeln: Johansson, R: "Estimation and Direct Adaptive Control of Delay-Differential Systems", Automatica 22 (1986) 555-560.

3. Adaptiv reglering av tidsvariabla system

Ett viktigt tillämpningsområde för adaptiva regulatorer är processer vars dynamik förändras med tiden. I dessa problem är informationsackumuleringen ett väsentligt problem. I existerande algoritmer samlas informationen i form av skattningar av parametrar och deras varianser. Skattningarna uppdateras då nya data erhålles. Problemet med tidsvariabla system är att gammal information kan vara irrelevant, beroende på att den erhöles då dynamiken var annorlunda än den aktuella. För att ge högre vikt åt färsk data, är det vanligt att diskontera gamla data med någon heuristisk metod. Detta har givit upphov till svårigheter under perioder då ingen väsentligt ny information erhålles och befintlig information slänges bort p.g.a. diskonteringen. Forskning inom detta område har presenterats i en doktorsavhandling av Tore Hägglund: "New estimation techniques for adaptive control", December 1983. Avhandlingen kan delas in i två delar, en del som behandlar långsamma dynamikvariationer och en del som behandlar abrupta dynamikvariationer.

Den metod som föreslås för att hantera långsamma dynamikvariationer kan i korthet förklaras så här. Nya data viktas i förhållande till gamla på ett sådant sätt att parametrarnas osäkerhet hela tiden hålles på en konstant nivå. Detta innebär att diskontering sker i en utsträckning som beror på hur mycket ny information som erhålles. Om excitationen är stor, så att mycket information kommer in, är diskonteringsfaktorn stor och förmågan att följa dynamikvariationer också stor. Om i stället excitationen är dålig, så att lite information kommer in till regulatorn, blir diskonteringsfaktorn mindre. Vi tvingas lita mer på äldre mätningar och kan därför inte följa dynamikvariationer lika snabbt.

Denna nya princip för att hantera långsamma dynamikvariationer innebär att informationen i regulatorn regleras. De flesta tidigare principerna bygger på att man, explicit eller implicit, har a priori antagit en modell för dynamikvariationerna. Detta har lett till välkända problem i sådana fall där denna modell stämmer dåligt överens med verkligheten. I praktiken medför den nya metoden att problem, som man tidigare fick lösa med empirisk logik runt algoritmerna, nu tas om hand direkt i algoritmen. Delar av det skyddsnät som omger nuvarande algoritmer kan därför elimineras.

Abrupta förändringar i processdynamiken kan hanteras på ett speciellt sätt. Förändringarna kan nämligen upptäckas med feldetekteringsmetoder. När en

abrupt dynamikförändring är upptäckt, kan man temporärt lägga relativt stor vikt vid nya mätningar. Detta innebär att algoritmen snabbt hittar den nya processmodellen.

Existerande metoder för feldetektering kan användas för detta ändamål, men de flesta av dem är olämpliga. En mycket vanlig förutsättning som görs i feldetekteringsmetoder är t.ex. att brusnivån hos processen är konstant. Detta är helt orealistiskt i samband med dynamikvariationer hos processen. En ny feldetekteringsmetod har därför utvecklats som lämpar sig för adaptiv reglering. En väsentlig skillnad mellan denna metod och de flesta andra är dessutom att vi använder de skattade parametrarna som utgångspunkt för feldetektering i stället för enbart utsignalen från processen. Detta ger en möjlighet att detektera dynamikförändringar som är svåra att se direkt i utsignalen.

Idéerna bakom metoden för att hantera långsamma dynamikvariationer presenterades på konferensen IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing i San Francisco 1983 och konferensen 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameters Estimation i York 1985. Metoden som behandlar abrupta förändringar i processdynamiken presenterades vid IFAC-kongressen i Budapest 1984. Metoderna har också beskrivits i Hägglunds doktorsavhandling.

4. Adaptiv stabilisering

Några centrala frågor för adaptiv reglering är följande: Vad kan man egentligen uppnå med adaptiva regulatorer? Hur svåra problem kan vi hoppas att en adaptiv regulator ska kunna klara av? Hur stor klass av processer kan man tänka sig att en (fix) adaptiv regulator kan klara av att reglera?

Dessa fundamentala frågor ställdes inte förrän i början av 80-talet. De stabilitetsbevis för adaptiva algoritmer för envariabla, tidskontinuerliga processer som publicerades i slutet av 70-talet och början av 80-talet krävde alla någon variant av följande förutsättningar om a priori kunskap om processen:

- (i) En gräns för processens ordningstal är känd.
- (ii) Den relativa graden (polöverskottet) är känd exakt.
- (iii) Processen är minimum fas.
- (iv) Tecknet på högfrekvensförstärkningen är känt.

Det kan med fog hävdas att dessa förutsättningar aldrig kan vara uppfyllda i praktiken. En diskussion av dessa frågor ledde också till en mycket intensiv debatt om adaptiv reglering. Den första förutsättningen skall diskuteras mer ingående i avsnitt 5.

Följande standardproblem, som fokuserar på förutsättning (iv), formulerades upp av A.S. Morse 1983: Finns det någon kontinuerlig adaptiv regulator som stabiliserar alla processer av klassen

$$\frac{dx}{dt} = x + bu, \quad b \neq 0$$

där x är en skalär och b en okänd konstant. Svårigheten uppträder p.g.a. att vi inte känner tecknet på b . "Morse's conjecture" sade att någon sådan inte existerade. Det visades senare konstruktivt av R.D. Nussbaum att detta var ett falskt förmodande.

Den forskning som bedrivits på institutionen av Bengt Mårtensson har fortsatt att betrakta dessa problem. Ett typproblem, nämligen att stabilisera en instabil process, har studerats. Problemet har varit att utröna om adaptiva algoritmer kan stabilisera olika klasser av processer. Det mest grundläggande resultatet är att det räcker att känna ordningstalet hos någon (icke-adaptiv) stabiliserande regulator, för att adaptivt stabilisera en (linjär, tidsinvariant, multivariabel, ändligt

dimensionell) process. Omvändningen av detta resultat har visats av C.I. Byrnes. Många andra resultat i denna anda, resultat om adaptiv stabilisering oberoende av använd algoritm, tillämpningar av återkoppling med hög förstärkning m.m. finns också i Mårtenssons avhandling.

Mårtenssons resultat som är av god klass är närmast att karaktärisera som existensbevis. Dessa resultat ger hopp om att finna praktiska algoritmer som kan användas för större klasser av processer än nuvarande algoritmerna. De ger också uppslag till algoritmer som kan användas för att starta adaptiva algoritmer. Mycket arbete återstår emellertid innan sådana förhoppningar kan förverkligas eller avskrivas.

5. Robusthet för adaptiva regulatorer

Frågan om robusthet för adaptiva regulatorer fick stor aktualitet framför allt genom en doktorsavhandling av Charles Rohrs från MIT. Rohrs undersökte några enkla exempel som visade att svårigheter kunde uppträda i adaptiva regulatorer som baserades på förenklade modeller. Jämför antagande (i) i avsnitt 3. Rohrs' arbeten har väckt stor uppmärksamhet framför allt på grund av att hans handledare professor M. Athans i flera föredrag påstod att adaptiv reglering överhuvud taget inte kan fås att fungera. På grund av denna diskussion har vi funnit anledning att skärskåda Rohrs' exempel, även om detta inte ingick i vår ursprungliga forskningsplan. Vi inbjöd också Rohrs till Lund för ingående diskussioner under en månads tid.

Vi har nu en ganska god förståelse för vad som händer i Rohrs' exempel. De första resultaten publicerades i artikeln Åström K J: "Analysis of Rohrs counterexamples to adaptive control", på CDC-konferensen 1983. Ytterligare arbeten publicerades vid CDC-konferensen 1984, i IEEE Proceedings on Automatic Control 1985 och i ACC-konferensen 1985. Några arbeten skrevs tillsammans med Rohrs. Vad som händer är i stort sett följande. Om man anpassar en förenklad modell så beror resultatet väsentligt på insignalens egenskaper. Insignalen måste vara så komplicerad att den tillåter anpassning av det antal parametrar som finns i modellen. Med en sinussignal kan i regel två parametrar bestämmas. Den modell man får med en sinussignal beror starkt på frekvensinnehållet i insignalen. Vid sinusformad insignal kan man då t.ex. välja den frekvens där modellen stämmer genom att välja insignalens frekvens. De svårigheter som uppträder i Rohrs' exempel beror i stort sett på att han försöker anpassa två parametrar med stegfunktioner som insignaler medan en stegfunktion tillåter endast noggrann bestämning av en parameter.

Den analysmetod baserad på medelvärdesbildning som vi utvecklat i samband med analysen av Rohrs' exempel är av generellt intresse. Den har vidareutvecklats i monografin Anderson et al: "Stability of Adaptive Systems - Passivity and Averaging Analysis", MIT Press 1986.

Forskningen kring robusthet har också givit intressanta uppslag för att konstruera skyddsnät för adaptiva regulatorer.

6. Dual reglering

Alla adaptiva regulatorer som används i dag bygger på empiriska men rimliga förutsättningar. Det är av praktiskt och principiellt intresse att undersöka om adaptiva regulatorer kan härledas ur allmänna principer. Detta kan göras med optimeringsteori. Man får då en s.k. dual regulator. Den karakteriseras av att regulatorn dels eftersträvar att göra reglerfelet litet och dels att den försöker att få bättre information om processen genom att skicka in lämpliga störsignaler. Den aktiva informationsinsamlingen finns ej explicit i de adaptiva regulatorer som bygger på enkla empiriska idéer. Dual reglering är således ett vackert exempel på hur teorin kan ge uppslag till nya funktioner.

Att lösa optimala duala reglerproblem leder tyvärr till så omfattande numeriska beräkningar att endast mycket enkla exempel kan lösas. Räkningarna växer också mycket snabbt med problemstorleken. Det är därför av intresse att undersöka om man kan finna förenklingar som bibehåller de duala egenskaperna. Några försök i denna riktning har genomförts i projektet. Vi har utgått från en approximation av en dual regulator som tagits fram tidigare vid institutionen. Denna regulator utgår från en förlustfunktion som leder till en försiktig (cautious) regulator utan aktiv informationssamling. Förlustfunktionen kompletteras därefter med en term som är ett mått på osäkerheten i uppskattningen av processens parametrar. Beräkningarna förenklas ytterligare genom att serieutveckla förlustfunktionen. Serien trunkeas så att den approximativa förlustfunktionen blir kvadratisk i styrsignalen. Styrsignalen kan då beräknas analytiskt. Det är kritiskt kring vilken punkt man gör serieutvecklingen. Genom att utnyttja känd struktur hos förlustfunktionen kan man bestämma en lämplig punkt för serieutvecklingen.

Den nya regulatorn har simulerats och jämförts med andra styrlagar. Monte Carlo simuleringar visar att den nya styrlagen har goda egenskaper. Fördelen med den nya suboptimala duala regulatorn är att den är lätt att implementera och att den inte kräver några omfattande beräkningar. Vidare kan den generaliseras till mer komplicerade system.

7. Automatisk inställning av PID-regulatorer

Den större delen av alla industriella reglersystem som är i drift i dag bygger på PID-reglering. De industriella PID-regulatorerna har i många fall en standardiserad utformning med en modomkopplare mellan manuell och automatisk reglering och möjligheter till manuell injustering av regulatorns parametrar. Det har i praktiken visat sig att många regulatorer är dåligt justerade. Derivataverkan är t.ex. ofta bortkopplad trots att den i många fall kan ge bra förbättringar av reglerprestanda. Vi blev väl förtrogna med detta problem i samband med våra industrikontakter. Vi gjorde också flera försök till att använda de adaptiva metoder vi utvecklat för att åstadkomma en automatisk inställning av PID regulatorer. Resultaten var ej lyckade, ty de konventionella metoderna kräver att processens tidskala är känd.

Tillsammans med Tore Hägglund kom jag på en enkel ny metod för att automatiskt ställa in parametrarna i en PID-regulatorer. Metoden som bygger på en ny identifieringsprincip är patenterad i Sverige, USA och Kanada. NAF (numera Satt Control Instruments) har förvärvat patenträttigheterna och utvecklat två produkter baserat på idén. Dr Hägglund och en f.d. examensarbetare i adaptiv reglering Lars Bååth leder nu verksamheten med automatinställning på Satt Control Instruments. Den första realiseringen av automatinställaren gjordes på en persondator Apple II. Systemet provades vid försök på Svenska Sockerfabriken i Arlöv. En produkt som utvecklats är en standardregulator för en reglerkrets som försetts med en knapp för automatinställning. När man trycker på knappen ställs regulatorns parametrar in automatiskt. Fältprov har visat att automatinställning är mycket användbar vid drift och igångkörning av anläggningar. I typiska fall kan igångkörningstiden halveras.

Problemet med automatinställning har också givit upphov till en rad intressanta teoretiska problem. Många artiklar har publicerats. Ett centralt problem är att förstå vad som händer vid relästyrning av processer. Detta problem studerades av Tsytkin m.fl. på 50-talet, men det har inte uppmärksamrats så mycket därefter. Vi har försökt att kartlägga vilka processer som självsvänger under relästyrning. Partiella resultat har redovisats i artikeln Åström och Hägglund: "Automatic tuning of simple regulators", som publicerades vid IFAC-kongressen i Budapest 1984 och i Automatica 1984.

Arbetet med automatinställning har också stimulerat utveckling av enkla dimensioneringsmetoder för PID-regulatorer. Inom detta område har vi gjort flera framsteg, som publicerats på CDC-konferenser. Som ett resultat av våra arbeten om automatinställning har vi inbjudits av Instrument Society of America (ISA) att skriva en monografi om våra arbeten.

8. Expertreglering

Under ett sabbatsår 1983/84 ägnade jag hälften av min tid att studera datalogi. I samband med detta klarnade tankarna beträffande möjligheterna att kombinera adaptiv reglering och artificiell intelligens. Jag initierade också ett samarbete med Dr John Anton, SCT i Palo Alto, som har stor erfarenhet i AI-tillämpningar. Dr Anton inbjöds att besöka oss för att ge en kurs om tillämpningar av AI inom ingenjörskonsten. I samband med detta startade vi några pilotprojekt. Ett av dem utgick från erfarenheterna från förverkligande av automatinställaren för PID regulatorer. Koden för denna krävde nämligen mycket empirisk logik. Det visade sig vara mycket praktiskt att koda den som ett expertsystem. Sedan var steget inte långt till att börja experimentera med reglersystem innehållande en rad olika algoritmer för diagnos, analys, automatinställning, parameterskattning, och adaptivitet som administreras av ett expertsystem. En första prototyp skisserades i samarbete med Anton. De första resultaten, som presenterades på IFAC World Congress i Budapest juli 1985, väckte stort intresse. Ytterligare forskning inom detta område bedrivs nu inom ramen för STU:s ramprogram CACE.

9. Experimentell verksamhet

Experimentell verksamhet är utomordentligt viktig vid forskning om adaptiva system. Ett skäl till detta är att de adaptiva systemen är så komplicerade att många viktiga frågor måste angripas med idealiserade approximativa modeller. Ett annat skäl är att experiment är nödvändiga för att konstruera algoritmer som fungerar bra i praktiken. Under projektet har vi byggt upp bra simuleringsfaciliteter baserade på det interaktiva simuleringsspråket Simnon. Vi har också konstruerat flexibla prototyper till adaptiva regulatorer med mikroprocessorer. Till en början arbetade vi med system baserade på DEC LSI-11 men vi övergick senare till system baserade på IBM PC. Vår egen experimentella verksamhet har också kompletterats med utbyte av erfarenheter med industriella leverantörer av adaptiva regulatorer.

10. Kunskapsspridning

Vi har regelbundet presenterat våra forskningsresultat vid internationella konferenser och symposier. Detta har givit goda möjligheter att på ett tidigt stadium testa våra idéer i kompetenta församlingar. I samband med konferensresor har vi också passat på att besöka utländska universitet och företag med intresse för adaptiv reglering. Den workshop om adaptiv reglering som vi arrangerade med NSF och STU var mycket värdefull. Likaledes fick vi många goda kontakter och mycket nyttig information i samband med organisationen av IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing.

Informationsutbyte till svensk industri har skett i form av en rad formella och informella kontakter. Vi har hållit föredrag om verksamheten. Vi har också besökt många företag med intresse för adaptiv reglering. Kontakterna med ASEA, First Control, NAF (numera Satt Control Instruments) och Kockumation, som alla tillverkar adaptiva regulatorer, har varit speciellt goda. Genom detta har vi fått god information om många praktiska problem och tillämpningar. Vi har också försökt att dela med oss av våra kunskaper.

Sedan maj 1984 har vi regelbundet givit kurer riktade till ingenjörer i industrin i LTH's regi. Vi har sammanlagt givit fyra kurser med vardera 16 deltagare.

Den kanske viktigaste kunskapsspridningen till svensk industri har troligen skett genom att vi har utbildat civilingenjörer och doktorer som nu är verksamma med adaptiv reglering inom den svenska industrin. Gruppledarna och flera av medarbetarna i de grupper som i dag arbetar industriellt med adaptiv reglering kommer samtliga från LTH. Det är en stor glädje för mig att konstatera att svensk industri intar en tätposition vad beträffar användning av adaptiv reglering.

11. Slutsatser

De resultat vi åstadkommit under treårsperioden bygger på den forskningsbas vi byggt upp under många år. Forskningsperioden har varit ovanligt lyckosam. Vi har avsevärt fördjupat förståelsen för adaptiva problem speciellt vad beträffar stabilitet, robusthet och flervariabla system. Resultaten har uppmärksammats internationellt. Den förnämligaste internationella sammanslutningen IFAC, som har världskongress vart tredje år, uppmärksammade vid den senaste kongressen i Budapest 1985 våra resultat med ett av fyra "best paper awards" utvalda ur tidskriften Automatica under en sexårsperiod. American Society of Mechanical Engineers tilldelade mig the Rufus Oldenburger Award 1985, bl.a. för mina insatser inom adaptiv reglering. Vi har fått många artiklar publicerade och vi har också fått många inbjudningar att presentera våra resultat. IEEE har t.ex. inbjudit mig att skriva en översiktsartikel om adaptiv reglering för deras Proceedings, som distribueras till ca 30 000 elektroingenjörer. Under projektperioden har vi kunnat förstärka de tidigare mycket goda internationella kontakterna.

En doktorsavhandling av Matz Lennels, "Adaptive start-up control", som hade startats under ett tidigare projekt slutfördes inom ramen för detta projekt. Två doktorsavhandlingar, Rolf Johansson: "Multivariable adaptive control" och Tore Hägglund: "New estimation techniques for adaptive control", genomfördes helt under projektet. Bengt Mårtensson slutförde en licentiatavhandling under projektet. och hans doktorsavhandling, "Adaptive stabilization", startades och fördes nära sin avslutning. Fjorton examensarbeten slutfördes också under projektet.

Två nya forskningsinriktningar startades under projektet. Dels hittade Åström och Hägglund på en ny metod för automatisk inställning av PID-regulatorer. Metoden har patenterats i många länder och ett svenskt företag har startat tillverkning av produkter som bygger på patentet. Åström och Hägglund har en ytterligare patentansökan för automatinställning av digitala regulatorer som belönades med pris vid Skandias och Dagens Industris uppfinnartävling för de tekniska högskolorna i Sverige. Dessa uppslag har också genererat många intressanta problem.

Ett nytt forskningsområde som kombinerar adaptiv reglering med AI har också initierats. Denna forskning som är mycket spännande genomförs nu under STU's ramprogram CACE. De preliminära resultaten har också varit vägledande för vår

medverkan i STU's planering om expertbaserade styrsystem och för diskussioner inför DUP-projektet.

Vi har haft utomordentligt goda kontakter med svensk industri under perioden. Detta har gjort det möjligt att föra ut flera idéer och det har också givit inspiration till många nya problem. Vi vill framföra ett varmt tack till kolleger i industrin för ett mycket givande idéutbyte.

Även om vi gjort framsteg så är det min bedömning att adaptiv reglering fortfarande är ett bra forskningsfält. Det finns många väsentliga teoretiska problem kvar att lösa och det finns god potential för bra industriella produkter.

Projektet hade inte kunnat genomföras utan stöd av STU. Vi har emellertid också satsat avsevärda resurser från institutionen i projektet. Sammanlagt har detta väl motsvarat de anslag som STU givit. Anslagen från STU har gjort det möjligt att upprätthålla mycket goda internationella kontakter. Vi har med kort varsel kunnat bjuda in forskare till Lund för längre och kortare perioder. Forskare i projektet har kunnat presentera delresultat på konferenser. De har också kunnat besöka kolleger på andra universitetsorter för diskussioner i samband med kongressresor. Anslagen har också gjort det möjligt för några personer att forska på heltid utan att splittras av undervisning och andra plikter. Detta har tillsammans med de internationella kontakterna i stor utsträckning bidragit till att höja intensiteten i projektet. STU:s handläggare har också varit mycket förstående för ändringar i målsättning och inriktning som motiverats av resultat och idéer som kommit fram i projektet.

12. Litteraturförteckning

Böcker

Åström K J, Wittenmark B: Computer Controlled Systems. Prentice Hall 1984.

Publicerade artiklar och konferensbidrag

Åström K J: Stochastic control theory. Invited plenary paper, SIAM 30th Anniversary Meeting, USA, July 1982.

Åström K J: LQG self-tuners. IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, June 20-22, 1983.

Åström K J: Theory and applications of adaptive control - A survey. Survey paper, Automatica 19 (1983) 471-486.

Åström K J: Fundamental problems of adaptive control. In Singh (Ed): Encyclopedia of Systems and Control, Pergamon Press (to appear).

Åström K J: Applications of adaptive control to paper making. In Singh (Ed): Encyclopedia of Systems and Control, Pergamon Press (to appear).

Åström K J: Analysis of Rohrs counterexamples to adaptive control. Proc 22nd IEEE Conf on Decision and Control, San Antonio, Texas, USA, Dec 15, 1983.

Åström K J: Towards intelligent control. General Electric Whitney Symposium, June 1984.

Åström K J: Ziegler-Nichols auto-tuners. ISA Conference, Houston, Texas, Oct 22-25, 1984.

Åström K J: Interactions between excitation and unmodeled dynamics in adaptive control. Proc 23rd IEEE Conf Decision and Control, Las Vegas, Nevada, USA, Dec 1984, pp. 1276-1281.

Åström K J: Adaptive control - a way to deal with uncertainty. In "Lecture Notes in Control and Information Sciences" (M Thoma, editor), Proc DFVLR Int Seminar on Uncertainty and Control, Bonn, May 1985, Springer-Verlag, pp 131-152.

Åström K J: A commentary on the C E Rohrs et al paper 'Robustness of continuous-time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics. IEEE Trans Automatic Control AC-30 (1985) 889-891.

Åström K J: Auto-tuning, adaptation, and expert control. Proc American Control Conference, Boston, Massachusetts, June 1985.

Åström K J: Instability mechanisms in adaptive control. 7th Int Symp on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS-85), Stockholm, Sweden, 1985.

Åström K J: Adaptation, auto-tuning and smart controls. In Morari and McAvoy (Eds), Chemical Process Control - CPCIII. CACHE, Elsevier, pp. 427-466, 1986.

Åström K J: Adaptive control. ASME Winter Meeting, Miami Beach, November 1985.

Åström K J: Why control is fun! Acceptance speech for the Rufus Oldenburger Medal, 1985.

Åström K J, Anton J J: Expert control. 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary 1984.

- Åström K J, Helmersson A: Dual control of a low order system. Proc Développement et Utilisation d'Outils et Modeles Mathématiques en Automatique, Analyse de Systemes et Traitement du Signal, Belle-Ile, France, Sept 13-18, 1982. Also in I D Landau (Ed): Outils et Modeles Mathématiques pour l'Automatique l'Analyse de Systemes et le Traitement du Signal. Editions du CNRS, Paris, 1983, Vol 3, pp 741-758.
- Åström K J, Hägglund T: Automatic tuning of simple regulators for phase and amplitude margins specifications. IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, June 20-22, 1983.
- Åström K J, Hägglund T: Automatic tuning of simple regulators. IFAC 9th World Congress, Budapest, July, 1984.
- Åström K J, Hägglund T: A frequency domain approach to automatic tuning of simple feedback loops. 23rd IEEE Conf on Decision and Control, Las Vegas, Dec 1984.
- Åström K J, Hägglund T: Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica 20 (1984) 645-651.
- Åström K J, Zhao-ying Z: A linear quadratic Gaussian self-tuner. Proc ISIS Workshop on Adaptive Control, Florence, Italy, October 27-29, 1982.
- Åström K J, Zhao-Ying Z: A linear quadratic gaussian self-turner. Ricerche di Automatica, 13 (1982) 106-122, Italy 1982.
- Åström K J, Hagander P, Sternby J: Zeros of sampled systems. Automatica 20 (1984) 31-38.
- Byrnes C I, Mårtensson B, Willems J C: Crystallographic algorithms for adaptive stabilization. 7th Int Symp on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS-85), Stockholm, Sweden, June 10-14, 1985.
- Hägglund T: The problem of forgetting old data in recursive estimation. IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, June 20-22, 1983.
- Hägglund T: Adaptive control of systems subject to large parameter changes. IFAC 9th World Congress, Budapest, Hungary 1984.
- Hägglund T: Recursive estimation of slowly time-varying parameters Proc 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation, York, UK, 1985.
- Hägglund T, Åström K J: Automatic tuning of PID controllers based on dominant pole design. IFAC Workshop on Adaptive Control of Chemical Pprocesses, Frankfurt/Main, FRG, 1985.
- Johansson R: Parametrizations of linear multivariable systems for adaptive controllers. Proc 21st IEEE Conf on Decision and Control (CDC), Orlando, USA, Dec 1982.
- Johansson R: Lyapunov functions for adaptive systems. Proc 22nd IEEE Conf on Decision and Control, San Antonio, USA, Dec 14-16, 1983.
- Johansson R: Stability of direct adaptive control with RLS-identification. 7th Int Symp on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS-85), Stockholm, Sweden, June 10-14, 1985.
- Johansson R: Estimation and direct adaptive control of delay-differential systems. Proc 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation, York, UK, 1985.

- Johansson R: Estimation and direct adaptive control of delay-differential systems. *Automatica* 22 (1986) 555-560.
- Johansson R: Direct adaptive control - Global Lyapunov stability and exponential convergence. Proc 25th IEEE Conf Decision and Control, Athens, Greece, 1986.
- Ljung L, Åström K J (Editors): Identification, Adaptive and Stochastic Control. (IFAC 9th Triennial World Congress, Budapest, Hungary, 1984). Pergamon Press, 1985.
- Mårtensson B: Adaptive stabilization of general multivariable, continuous- or discrete time systems. 7th Int Symp on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS-85), Stockholm, Sweden, June 10-14, 1985.
- Mårtensson B: The order of any stabilizing regulator is sufficient a priori information for adaptive stabilization. *System & Control Letters* 6 (1985) 87-91.
- Mayne D Q, Åström K J, Clark J M C: A new algorithm for recursive estimation of parameters in controlled ARMA processes. *Automatica* 20 (1984) 751-760.
- Olsson G, Rundqwist L, Eriksson L, Hall L: Self-tuning control of the dissolved oxygen concentration in activated sludge systems. In "Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems, Advances in Water Pollution Control" (R A R Drake, editor), Int Association on Water Pollution Research and Control, pp 473-480, 1985.
- Rohrs C E, Stein G, Åström K J: Uncertainty in sampled systems. Proc American Control Conference, Boston, Massachusetts, June 19-21, 1985.
- Rohrs C E, Stein G, Åström K J: A practical robustness theorem for adaptive control. Proc American Control Conference, Boston, Massachusetts, June 19-21, 1985.
- Wittenmark B: Simple PID self-tuners based on pole-placement. In Singh (Ed): *Encyclopedia of Systems and Control*, Pergamon Press (to appear).
- Wittenmark B, Åström K J: Implementation aspects of adaptive controllers and their influence on robustness. Preprints 21st IEEE Conf on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, Dec 8-10, 1982.
- Wittenmark B, Åström K J: Self-tuning control. In Singh (Ed): *Encyclopedia of Systems and Control*, Pergamon Press (to appear).
- Wittenmark B, Åström K J: Practical issues in the implementation of self-tuning control. *Automatica* 20 (1984) 595-605.

Doktorsavhandlingar

- Hägglund T: New estimation techniques for adaptive control. PhD thesis TFRT-1025, Dec 1983.
- Johansson R: Multivariable adaptive control. PhD thesis TFRT-1024, April 1983.
- Lenells M: Adaptive start-up control. PhD thesis TFRT-1023, Nov 1982.
- Mårtensson B: Adaptive stabilization. PhD thesis TFRT-1028, Febr 1986.

Licentiatavhandlingar

- Bengt Mårtensson: The order of any stabilizing regulator is sufficient a priori information for adaptive stabilization. Lic avhandling TFRT-3174, April 1985.

Examensarbeten

- Andersson F, Lindh G: Självinställare baserade på gradientmetoder (Self-tuning regulator based on gradient methods). Report TFRT-5282, Sept 1982.
- Bernhardsson B: Implementation of fast recursive parameter estimation algorithms on the signal processor TMS 320. Report TFRT-5351, May 1986.
- Hammar A, Johnson A: Temperaturreglering vid värmebehandling av elakartade tumörer (Temperature regulation of hyperthermia treatment of malignant tumours). Report TFRT-5326, June 1985.
- Hansson L G: En självinställande regulator för frekvensreglering av kraftsystem med högspänd likström (A self-tuning regulator for frequency control of power systems with high voltage direct current). Report TFRT-5293, March 1983.
- Jansson A: Beräkning av regulatorparametrar med hjälp av i regulatorn inbyggd process modell (Computation of regulator parameters using gain scheduling). Report TFRT-5313, Sept 1984.
- Jönsson M: Simulering av en hybrid självinställande regulator (Simulation of a hybrid selftuning control). Report TFRT-5334, September 1985.
- Kai Siew W: Methods for Automatic Tuning of PID Regulators. Report TFRT-5288, Dec 1982.
- Knutsson S: En självinställande prediktor med operatörskommunikation skriven i Omsi-Pascal (A self-tuning predictor with operator communication written in Omsi-Pascal). Report TFRT-5303, Oct 1983.
- Lindqvist T: En auto-tuner för PI-regulatorer (An auto-tuner for PI regulators). Report TFRT-5332, September 1985.
- Möllerström A: Referat av handbok för TA 6500 mikrodatorbaserad reglerenhet. Undersökning av några olika inställningsregler för PI-regulatorer (Handbook for TA 6500 microprocessor control unit and investigation of some tuning rules for PI-controllers). Report TFRT-5291, March 1983.
- Nilsson A, Petersson K: Konstruktion av en robotarm med adaptiv reglering (Construction of a robotarm with adaptive control). Report TFRT-5325, July 1985.
- Palmgren M: En självinställande PID-regulator för system med variabel tidsfördröjning (A self-tuning PID-regulator for systems with variable time delay). Rapport TFRT-5283, Sept 1982.
- Svensson P-E: Experiment med en linjär-kvadratisk självinställare (Experiments with a linear-quadratic selftuner). Report TFRT-5285, Sept 1982.
- Wingertz B: Practical Aspects on Self Tuning Regulators. Report TFRT-5299, May 1983.

Rapporter

- Åström K J: Adaptiv reglering. Ansökan till STU, Febr 1982.
- Åström K J: Adaptiv reglering. Report TFRT-7245, June 1982.
- Åström K J: LQG self-tuners. Report TFRT-7255, July 1983.
- Åström K J: Implementation of an auto-tuner using expert system ideas. Report TFRT-7256, July 1983.

- Åström K J: Analysis of Rohrs counterexamples to adaptive control. Report TFRT-7257, Aug 1983.
- Åström K J: Projektet adaptiv reglering (82-3430). Lägesrapport till STU, Sept 1983.
- Åström K J: Projektet adaptiv reglering (82-3430). Lägesrapport till STU, Sept 1984.
- Åström K J: Transient response analysis. Report TFRT-3177, Sept 1985.
- Åström K J: Auto-tuning, adaptation and expert control. Report TFRT-7298, Oct 1985.
- Åström K J: The adaptive nonlinear modeller. Report TFRT-3178, Nov 1985.
- Åström K J, Anton J: Expert control. Report TFRT-7271, March 1984.
- Åström K J, Helmersson A: Dual control of a low order system. Report TFRT-7244, June 1982.
- Åström K J, Helmersson A: Dual control of a low order system. TFRT-7249, Febr 1983.
- Åström K J, Hägglund T: Automatic tuning of simple regulators for phase and amplitude margins specification. Report TFRT-7253, April 1983.
- Åström K J, Hägglund T: Automatic tuning of simple regulators. Report TFRT-7269, March 1984.
- Åström K J, Hägglund T: Dominant pole design. Rapport Report TFRT-7282, April 1985.
- Braun K: Simulation of a hydraulic system with the simulation package Simnon. Report TFRT-7306, February 1985.
- Braun K: Implementation of an adaptive friction compensation. Report TFRT-7304, May 1985.
- Canudas de Wit, C: Adaptive friction compensation in DC motors. Report TFRT-7285, July 1985.
- Canudas de Wit, C: Recursive estimation of the continuous-time process parameters. Report TFRT-7290, Dec 1985.
- Canudas C, Åström K J, Braun K: Adaptive friction compensation in DC motor drives. Report TFRT-7309, Sept 1985.
- Elevitch C: An approximate analytic control law for an active suboptimal dual controller. Report TFRT-7264, Nov 1983.
- Hägglund T: Adaptive control with fault detection. TFRT-7242, June 1982.
- Hägglund T: Recursive least squares identification with forgetting of old data. Report TFRT-7254, March 1983.
- Hägglund T: Adaptive control of systems subject to large parameter changes. Report TFRT-7270, March 1984.
- Hägglund T: NFS-STU workshop on adaptive control. Report TFRT-3175, April 1985.
- Hägglund T, Åström K J: A new method for design of PID regulators. Report TFRT-7273, July 1984.
- Hägglund T, Åström K J: Automatic tuning of PID controllers based on dominant pole design. Report TFRT-7299, Oct 1985.

Johansson R: Parametric models of linear multivariable system for adaptive controllers. Report TFRT-7233, Febr 1982.

Johansson R: Estimation and direct adaptive control of delay-differential systems. Report TFRT-7274, Sept 1984.

Mannerfelt C F: A self-tuning regulator for systems with known dynamics and unknown disturbance characteristics. Report TFRT-7246, August 1982.

Mayne D Q, Åström K J, Clark J M C: A new algorithm for recursive estimation of parameters in controlled ARMA processes. Report Imperial College of Science and Technology, January 1984. To appear in Automatica.

Rohrs C E, Stein G, Åström K J: Uncertainty in sampled systems. Report TFRT-7296, Oct 1985.

Rohrs C E, Stein G, Åström K J: A practical robustness theorem for adaptive control. Report TFRT-7297, Oct 1985.

Rundqwist L: Tryck- och syrerreglering på Käppala-verket, dokumentation av reglerprogram i Novatune versionsdatum 83-11-22 (Pressure and dissolved oxygen control at Käppalaverket, version 83-11-22). Report TFRT-7263, Nov 1983.

Rundqwist L: Integral action and mode transitions in self-tuning process control. Report TFRT-7305, Sept 1985.

Wittenmark B, Åström K J: Practical issues in the implementation of self-tuning control. Report TFRT-7268, March 1984.

Patent

Hägglund T, Åström K J: Method and Apparatus in Tuning a PID regulator. U.S. Patent Number 4549123.

Hägglund T, Åström K J: Method and Apparatus in Tuning a PID regulator. Canadian Patent Number 1201 511.

Hägglund T, Åström K J: Förfarande för inställning av en PID-regulator för en process. Svenskt Patent nummer 8104989-2.

APPENDIX

Deltagande forskare

Tore Hägglund	LTH, heltid STU 3,5 år
Rolf Johansson	LTH, heltid STU 2 år
Karl Erik Årzén	LTH, heltid STU 1,5 år
Fred Andersson	LTH, examensarbetare
Bo Bernhardsson	LTH, examensarbetare
Konrad Braun	ETH Zurich, gästforskare
Carlos Canudas	Grenoble, gästforskare
J M C Clarke	Imperial College London, professor
Craig Elevich	LTH, forskarstuderande
Per Hagander	LTH, docent
Leif Göran Hansson	LTH, examensarbetare
Anette Hammar	LTH, examensarbetare
Anders Helmersson	LTH, examensarbetare
Anders Jansson	LTH, examensarbetare
Anne Johnsson	LTH, examensarbetare
Mats Jönsson	LTH, examensarbetare
Wong Kai Siew	LTH, examensarbetare
Stefan Knutsson	LTH, examensarbetare
Matz Lenells	LTH, forskarassistent
Göran Lindh	LTH, examensarbetare
Thomas Lindqvist	LTH, examensarbetare
Carl Fredrik Mannerfelt	LTH, forskarstuderande
D Q Mayne	Imperial College London, professor
Bengt Mårtensson	LTH, forskarstuderande
Anders Möllerström	LTH, examensarbetare
Anders Nilsson	LTH, examensarbetare
Martin Palmgren	LTH, examensarbetare
Kjell Petersson	LTH, examensarbetare
C Rohrs	University of Notre Dam
Jan Sternby	Gambro
Per-Erik Svensson	LTH, examensarbetare
Bo Wingertz	LTH, examensarbetare
Björn Wittenmark	LTH, lektor
Z Zhao-ying	Peking, gästforskare
Karl Johan Åström	LTH, professor