

ISSN 0280-5316
ISRN LUTFD2/TFRT--5846--SE

Reglering av avgasningen i en dialysmaskin

Andreas Stolt

Department of Automatic Control
Lund University
December 2009

Lund University Department of Automatic Control Box 118 SE-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> MASTER THESIS	
		<i>Date of issue</i> December 2009	
		<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5846--SE	
<i>Author(s)</i> Andreas Stolt		<i>Supervisor</i> Jan Sternby Gambro AB, Lund Rolf Johansson Automatic Control, Lund (Examiner)	
		<i>Sponsoring organization</i>	
<i>Title and subtitle</i> Reglering av avgasningen i en dialysmaskin (Control of the degassing system in a dialysis machine)			
<i>Abstract</i> <p>The current control strategy in the degassing system in a Gambro AK200S dialysis machine leads to a rather noisy flow upstream in the machine. This is where different concentrates are added to the dialysis fluid and as the control of this adding is rather slow the unsteady flow leads to an unsteady conductivity of the dialysis fluid, which makes it difficult to evaluate the effect of the dialysis treatment. The main components in the degassing system are an adjustable three-way valve, a constrictor valve, a pump and a degassing chamber. The pump is used to create the necessary underpressure needed to degas the fluid and the three-way valve is used to recirculate fluid from the degassing chamber, as the flow needed to create the underpressure is greater than the overall dialysis fluid flow. The pump and the three-way valve are available actuators and the underpressure and the fluid level in the degassing chamber are available measurement signals. The system is investigated thoroughly and different control strategies are tested. It is found that the desired underpressure in combination with the constrictor valve leads to what probably is cavitation. This makes the flow approximately constant for big underpressures and this makes it hard to implement a control strategy where the pump is used to control the degassing level and the three-way valve to control the pressure, this strategy was beforehand thought to be the solution to the problem. The three-way valve is controlled by a stepper motor, and the best method tested to achieve a steadier flow has shown to be to increase the resolution of the motor, using microstepping control. Strategies where the three-way valve is changed as seldom as possible are also tried and the result is a piecewise steady flow. The best flow that can be achieved is limited by disturbances, especially from air bubbles entering the degassing system, but also disturbances from other parts in the machine. Although the flow is stabilized the conductivity is not improved, showing that more has to be done to achieve a steady conductivity. Probably the conductivity control loop has to be redesigned, but this is outside the scope of this master thesis.</p>			
<i>Keywords</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i> 0280-5316			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 90	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

Förord

Detta arbete utfördes på Gambro AB i Lund i samarbete med institutionen för Reglerteknik på Lunds Tekniska Högskola. Jag skulle vilja börja med att tacka Prof. Rolf Johansson på institutionen för Reglerteknik för all hjälp han bidragit med i sin roll som examinator, men även för att han förmedlade den första kontakten med Gambro. Jag vill även tacka min handledare Jan Sternby på Gambro för att ha hjälpt mig igenom hela arbetet, och framförallt för att jag har fått möjligheten att utföra examensarbetet på Gambro.

Vidare skulle jag vilja tacka hela TSR-avdelningen på Gambro i Lund, särskilt Per Hansson för all hjälp i labbet, Anders Wallenborg för hjälp med LabView och att bygga upp den testrigg jag använde frekvent under arbetets gång, och även till Mattias Holmer för hjälp med bl.a. LabView. Jag vill även tacka Björn Ericson, som under arbetets gång åtskilliga gånger fått hjälpa mig med att kompilera ny mjukvara. Min tacksamhet är även stor mot alla som jag inte har nämnt vid namn, då samtliga bidragit till att göra min tid på Gambro trevlig och angenäm.

Slutligen skulle jag vilja rikta ett tack till min familj och mina vänner för att ha stått ut med mig, inte bara under examensarbetet utan under hela studietiden.

Innehåll

Förord	1
1. Sammanfattning	5
2. Bakgrund	7
2.1 Allmänt om dialys	7
2.2 Allmänt om dialysbehandling	8
2.3 Allmänt om Gambro	9
3. Dialysmaskinen	11
3.1 Blodbanan	11
3.2 Vätskebanan	11
4. Avgasningssystemet	13
4.1 Systemets komponenter	13
4.2 Nuvarande reglering	16
5. Problemformulering	21
6. Experiment	23
6.1 Labuppställning	23
6.2 Undersökning av trevägsventilen	23
6.3 Undersökning av flöden och drivspänning för olika undertryck	24
6.4 Kavitation	29
6.5 Avgasningsliknande system	31
6.6 PI-reglering	32
6.7 Flervariabel reglerstrategi	34
6.8 Särkopplad reglering	40
6.9 Test av andra strypventiler i det avgasningsliknande systemet	47
7. Arbete mot dialysmaskinen	49
7.1 Manuell reglering	49
7.2 Omvänd reglering	52
7.3 Systemidentifiering	53
7.4 LQG-reglering	59
7.5 Ventilen med åttondels steg	67
7.6 Störningar	72
7.7 Konduktivitet vid bikarbonatkörning	78
7.8 Pumpreglering	79
8. Diskussion	81
8.1 Möjliga åtgärder för att erhålla bättre flöde och konduktivitet	82
9. Litteraturförteckning	83
A. Identifierade modeller	85
A.1 Labsystemet	85
A.2 Dialysmaskinen	87

1. Sammanfattning

Den nuvarande reglerstrategin för avgasningssystemet i Gambros AK200S dialysmaskin leder till ett väldigt ryckigt flöde uppströms i maskinen. Här doseras olika koncentrationer i dialysvätskan och eftersom denna reglering är ganska långsam leder det ryckiga flödet till en ostadig konduktivitet för dialysvätskan, som gör det svårt att utvärdera dialysresultatet. Huvudkomponenterna i avgasningssystemet är en ställbar trevägsventil, en strypventil, en pump och en avgasningskammare. Pumpen används för att skapa det undertryck som är nödvändigt för att vätskan ska avgasas och trevägsventilen används för att recirkulera vätskan från avgasningskammaren, eftersom flödet som behövs för att skapa undertrycket är större än det övergripande dialysvätskeflödet. Pumpen och trevägsventilen är tillgängliga ställdon och undertrycket och vätskenivån i avgasningskammaren är tillgängliga mätsignaler. Systemet undersöks noggrant och olika reglerstrategier testas. Upptäckten görs att det önskade undertrycket i kombination med strypventilen leder till något som med största sannolikhet är kavitation. Detta gör att flödet är i princip konstant för stora undertryck och det gör det svårt att implementera en reglerstrategi där pumpen används för att styra avgasningsnivån och trevägsventilen för att styra trycket, denna strategi sågs i förväg som lösningen på problemet. Trevägsventilen styrs av en stegmotor, och den bästa testade metoden för att erhålla ett bättre flöde har visat sig vara att öka upplösningen för motorn, genom att använda microstepping-styrning. Strategier som innebär att trevägsventilen ändras så sällan som möjligt har också testats och det leder till ett styckvis stabilt flöde. Det bästa flöde som kan erhållas visar sig vara begränsat av störningar, speciellt från luftbubblor som kommer in i avgasningssystemet, men även från störningar i andra delar av maskinen. Trots att flödet i maskinen stabiliseras förbättras dock inte konduktiviteten, vilket visar att mer måste göras för att en stabilare konduktivitet ska erhållas. Troligen måste konduktivitetsregleringen göras om, men detta är något som inte ingår i examensarbetet.

Denna rapport börjar med en kort överblick över dialys och Gambro i allmänhet och fortsätter sedan och blir mer ingående om hur dialysmaskinen och avgasningssystemet är uppbyggt och fungerar. Efter att hela systemet har presenterats återges sedan en konkret problemformulering. Själva arbetet är uppdelat i två delar, där den första behandlar experiment på en labupställning som funnits tillgänglig och där den andra behandlar det arbete som utförts direkt mot dialysmaskinen. Rapporten avslutas sedan med en diskussion av de resultat arbetet utmynnat i.

2. Bakgrund

2.1 Allmänt om dialys

Dialys är en behandlingsmetod för personer med nedsatt njurfunktion.

Njurarnas funktion

Njurarna har tre uppgifter i kroppen [1, 2]. För det första avlägsnar de avfallsprodukter ur blodet. Det handlar framförallt om restprodukter från metabolismen, ämnesomsättningen, men även för kroppen främmande ämnen och gifter, t.ex. alkohol och mediciner. Den andra uppgiften är att reglera vatten-, salt- samt syra-basbalansen i kroppen, denna funktion är livsviktig för kroppen. Slutligen produceras det här några viktiga hormoner, som t.ex. renin som deltar i regleringen av blodtrycket.

När blodet passerar njurarna bildas utsöndringsprodukten urin. Detta sker i tre på varandra följande processer. Den första kallas för glomerulär filtrering, som innebär att en stor mängd vatten ämnen med låg molekylvikt filtreras ut ur blodet och bildar en primärurin. Nästa process tubulär reabsorption, som innebär att den största delen av primärurinen återupptas i blodet, ca 99 %. Den tredje processen är tubulär sekretion, då sker viss selektiv filtrering, blodet rensas från oönskade ämnen. Alla processerna sker i den del av njurarna som kallas för nefron.

Njursvikt

Då njurarnas funktion blir nedsatt drabbas man av njursvikt, som kan vara både akut och kronisk [1, 2]. Med behandling är det möjligt att återhämta sig från den akuta varianten, som t.ex. kan bero på en olycka där njurarna kommit till skada. Den kroniska varianten leder dock till en permanent nedsättning. Symptomen på nedsatt njurfunktion kallas för uremi, och beror på de störningar som blir följden då njurarna inte längre klarar av sina uppgifter.

Njursvikt måste behandlas och det finns ett antal olika sätt. Till en början räcker det med att äta efter en speciell diet (minskat innehåll av protein, natrium och kalium). Men efter ett tag, då endast 5 % av njurfunktionen återstår, måste antingen en njurtransplantation göras eller dialysbehandling inledas. Då behandling inleds behöver kosten läggas om igen, nu ordinerar istället proteinrik mat. Vid dialys finns det två stycken alternativ, antingen hemodialys eller peritonealdialys.

Hemodialys

Vid hemodialys, HD, utnyttjas en extern dialysmaskinen för att försöka efterlikna njurarnas normala funktion [2, 3, 11]. Detta utförs genom att pumpa blod och dialysvätska genom det så kallade dialysfiltret, eller dialysatorn som det också kallas. I detta skiljs de båda inpumpade vätskorna åt av ett halvgenomsläppligt membran, som tillåter vissa ämnen att passera igenom, t.ex. vatten och lösta salter, medan andra ämnen stoppas, t.ex. blodkroppar. Transporten genom membranet sker med både diffusion och konvektion.

Diffusionen drivs av koncentrationsgradienten, finns det en stor koncentration i den ena vätskan, t.ex. blodet, och lite i den andra, dialysvätskan i det här fallet, kommer diffusion att försöka jämna ut balansen [2, 3]. På en mikroskopisk skala är det endast slumpmässiga rörelser hos ämnets molekyler, men på en makroskopisk

skala blir utfallet ett nettoflöde från den högre koncentrationen till den lägre, för att detta utfall är så mycket sannolikare än det omvända. Konvektion innebär transport av ämnen lösta i något annat, t.ex. koksalt i vatten. Dialysmaskiner kan utnyttja båda transportsätten, men den studerade maskinen utnyttjar huvudsakligen diffusion.

Dialysvätskans innehåll väljs så att det gör att nivåerna i blodet blir rätt efter behandlingen. Salter som blodet behöver fyllas på med förekommer alltså rikligt i dialysvätskan, medan de salter som är överrepresenterade förekommer mer sparsamt eller helt utelämnas. Mängden vatten som ska avlägsnas styrs via det tryck som läggs över dialysfiltret. Trycket gör att vatten sugas ut ur blodet, och denna process kallas för ultrafiltrering.

Dialysatorn är en mycket viktig komponent. Två olika typer finns tillgängliga, nämligen platt- och fiberdialysatorer. I plattdialysatorn ligger membranen parvis och blodet strömmar mellan dem, medan i fiberdialysatorn strömmar blodet i små fibrer. I båda fallen omges membranens andra sida av strömmande dialysvätska. Membranen kan tillverkas av både cellulosa och syntetiska material. Viktiga parametrar är tjockleken och hur pass stort flöde det släpper igenom.

Alternativ till HD

Både för patienter och dialyskliniker hade det varit önskvärt med en förkortad behandlingstid. Detta kan lösas genom att i ökande grad använda konvektion för att avlägsna lösta ämnen [2, 3, 11]. Hemofiltration, HF, är en metod som använder konvektion och som inte utnyttjar någon dialysvätska. En stor mängd vatten ultrafiltreras, och för att kompensera tillsätts en ersättningsvätska, som dock är problematisk att rent praktiskt hantera (den måste hållas steril och är jobbig att distribuera då stora mängder behövs). Ett mellanting mellan HD och HF är hemodiafiltration, HDF, som utnyttjar både konvektion och diffusion. Även här behövs en viss mängd ersättningsvätska.

Peritonealdialys

Peritonealdialysen bygger på samma principer som hemodialysen, här utnyttjas dock ingen maskin och inget externt dialysfilter [2, 3, 11]. Istället pumpas dialysvätska in i bukhålan och bukhinnan, peritoneum, får fungera som det halvgenomsläppliga membranet. För att kunna avlägsna vatten ur blodet tillsätts vanligen glukos, som gör att ett osmotiskt tryck uppstår över membranet, till skillnad mot i dialysmaskinen där pumpas används för att skapa trycket över dialysatorn. Det osmotiska trycket uppkommer för att vattenkoncentrationen är högre i blodet än i dialysvätskan, eftersom den är uppblandad med glukos. Efter ett tag kommer glukos att ta sig igenom bukhinnan, och det innebär att dialysvätskan måste bytas med jämna mellanrum. Detta kan utföras både manuellt och med maskiner som gör det automatiskt.

2.2 Allmänt om dialysbehandling

Dialysbehandling genomförs vanligen på en dialysklinik, som antingen kan tillhöra ett sjukhus eller vara fristående [2]. De flesta patienterna behandlas kroniskt och detta görs vanligtvis efter ett veckoschema, med tre behandlingar i veckan. Det finns även en möjlighet för patienter att få dialys i hemmet, detta kräver dock stor kunskap och ett stort ansvar hos patienten. Ett tredje alternativ är s.k. "Limited Care". Detta innebär dialys på ett center där patienterna själva tar hand om många av de praktiska detaljerna.

Innan dialysmaskinen kan användas måste den desinficeras och dialysvätskans värden stabiliseras, varav det senare erhålls genom att låta maskinen köra ett tag. Blodslangarna och dialysatorn måste sköljas, för att avlägsna luft och diverse restprodukter. Sköljningen görs med koksaltlösning. Blod tas vanligen från den arteriovenösa fisteln hos patienten. Denna bildas genom att man på kirurgisk väg sammanbinder en ven och en artär i armen. Venen kommer då att bli arterialiserad, d.v.s. få tjockare väggar och större diameter. Blodflödet i fisteln är vanligtvis upp mot 1000 ml/min, och av detta kan upp till 400 ml/min utnyttjas i dialysen.

Användande av grova nålar är bäst för dialysen, då det möjliggör stort blodflöde. Det kan dock vara påfrestande för patienten. En annan viktig parameter är den mängd vatten som ska avlägsnas från patienten. Lämnas för mycket vatten kvar leder det till hypertension, för högt blodtryck, och tas för mycket bort leder det till problem med blodtrycksstabiliteten under behandlingen. Genom att övervaka patientens torrsvikt, den vikt patienten hade med normal vätskereglering, ställs vätskan som ska ultrafiltreras bort in som en parameter på maskinen.

För att en dialysbehandling ska anses vara bra utförd ska tillräcklig mängd vätska och önskade lösta ämnen avlägsnas. Ett vanligt sätt att mäta effekten är att mäta ureahalten före och efter behandlingen. Urea i sig är inte skadligt, men det fungerar som en markör för uremiska toxiner med låg molekylvikt. Vid avslutad behandling ges patienten ofta även en EPO-injektion. Detta är ett hormon som styr tillväxten av röda blodkroppar. I normala fall produceras det i njurarna. Före användande av EPO började var det vanligt att dialyspatienter behövde blodtransfusioner för att inte ha för lite röda blodkroppar.

När används respektive behandlingsmetod

Peritonealdialys fungerar ofta som en temporär behandling för patienter som väntar på en njurtransplantation. För barn är det även fördel med PD, då den kontinuerliga blodreningen som PD ger gör att barnen växer bättre. Vidare är PD bra för folk med access-besvär, folk med hjärt- och kärlsjukdomar som inte klarar av de drastiska förändringarna vid HD-behandling. Det kan dock hända att PD inte ger tillräcklig blodrening, och då är HD eller transplantation de enda alternativen.

2.3 Allmänt om Gambro

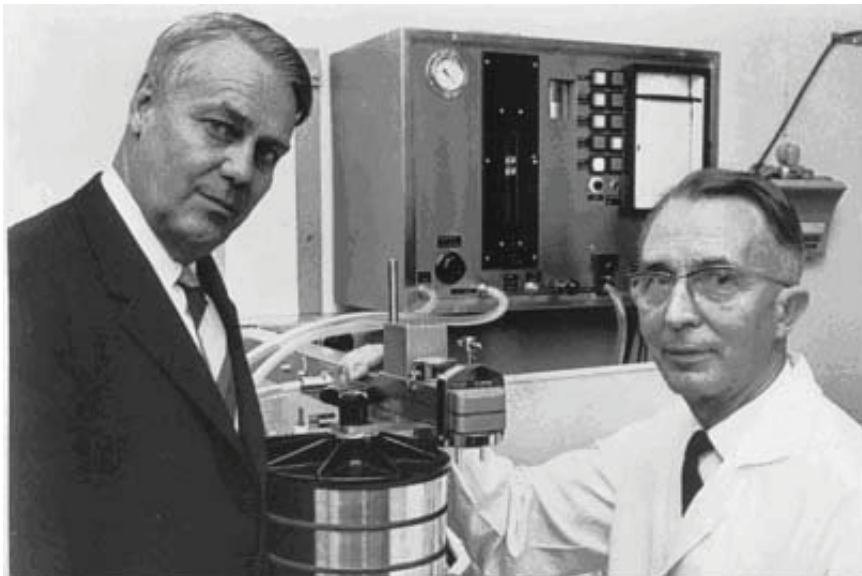
Gambros historia börjar med medicinprofessorn Nils Alwall i Lund [4, 14, 18, 20]. Han hade efter sin utbildning i fysiologi och farmakologi börjat sin bana som underläkare i invärtes medicin. Där blev han gripen av hur njurpatienterna hade det. Ingen bot fanns, och det enda de kunde göra för att leva längre var att stanna i sängen och äta efter en speciell diet.

Alwall började med att prova dialys på kaniner och 1946 gjordes det första testet på en människa. Det var en 47-årig man vars huvudproblem var urinförgiftning, men också led av en lunginflammation. Patienten är medvetslös när behandlingen börjar, men återfår så småningom medvetandet och kan öppna ögonen och prata. Tyvärr avlider han ett dygn senare i lunginflammation.

Dialysatorn som användes bestod av ett 11 meter långt korvskinn, och den var lindad runt ett rostfritt ståltrådsnät inuti en stor glasburk. Principen för dialysen var densamma som i moderna dialysmaskiner. Alwall var inte först med sin konstgjorda njure, där en föregångare som kan nämnas är holländaren Willem Kolff. Det som gjorde Alwalls konstruktion unik var att den var först med att klara av ultrafiltration, dvs. avlägsning av vätska ur blodet, och detta blev möjligt genom att lägga ett tryck över dialysatorn.

Dialys blev snabbt en viktig behandlingsmetod för att klara av en tillfällig nedsättning av njurfunktionen. För att klara av en permanent funktionsnedsättning hos njuren krävdes att två problem löstes, nämligen möjlighet att upprepade gånger förbinda dialysatorn till patientens kärlsystem och ett lätthanterligt dialysfilter för engångsbruk. Det första löstes när man lärde sig skapa arteriovenösa fistlar och det andra kom genom företaget Gambro.

Gambro startades av industrimannen Holger Craaford 1964, efter att han några år tidigare mer eller mindre slumpmässigt träffat Nils Alwall på en social tillställning på trettondedagsafton på Kulturen i Lund och fått höra hans historia. Han blev övertygad om att han skulle utveckla och marknadsföra den livräddande uppfinningen. Namnet Gambro kommer från en förkortning för "Gamla Brogatans Sjukvårdsaffär Aktiebolag". Massproduktion av dialysatorer och dialysmaskiner påbörjades 1967.



Figur 2.1 Holger Craaford och Nils Alwall framför den första Gambro njuren, en spiral-konstruktion. [20]

Idag är Gambro ett globalt medicintekniskt företag som är världsledande inom utveckling, tillverkning och tillhandahållande av produkter, behandlingar och tjänster inom dialys, inom områdena hemodialys, peritonealdialys, intensivvård och leverdialys. Produktionsanläggningar finns i nio olika länder och företaget har totalt 8200 anställda. Den årliga omsättningen ligger på 11 300 miljoner svenska kronor. [8]

3. Dialysmaskinen

Dialysmaskinen hanterar två olika processer [2, 5, 6, 7, 11]. För det första ska blod tas från patienten och pumpas genom dialysfiltret och därefter återlämnas till patienten. Den andra processen är att bereda och pumpa dialysvätska, och låta även den passera dialysfiltret. Dessa processer sköts helt separat.

3.1 Blodbanan

Alla komponenter som används för blodbanan är engångsartiklar, åtminstone de som kommer i kontakt med blodet. Antingen en eller två anslutningar (nålar) görs till patienten. Används endast en anslutning används den både till att pumpa ut och tillbaks blod. En blodpump används för att upprätthålla blodflödet, som är en parameter som ställs in på maskinen. Pumpen fungerar genom att klämma på blodslangen, vilket gör att den inte kommer i kontakt med blodet. För att hindra blodet från att koagulera injiceras därefter heparin. Nästa komponent är en blodvolymsensor, som mäter hemoglobinkoncentration och med denna beräknar den totala blodvolymens förändring under dialysen.

Dialysatorn är nästa steg och därefter kommer en droppkammare, som fungerar som ett expansionskärl för att jämna ut tryckpulsering. Droppkammaren är också ett sätt att säkerställa så att det inte finns några luftbubblor i blodet som returneras till patienten. Används endast en nål används klämmor för att stänga slangarna för till- och utflöde med jämna mellanrum. Pumpen stannar då blodet returneras, som istället sker p.g.a. det tryck som byggts upp då pumpen gått. Man kan även använda två stycken blodpumpar, där de används växelvis i de bägge faserna.

Utöver ovanstående beskrivning finns det mängder med säkerhetsfunktioner, som direkt stoppar blodflödet om något fel upptäcks.

3.2 Vätskebanan

Vatten, som ska uppfylla vissa hygienkrav, tas in i maskinen via en tryckregulator och ett mekaniskt vattenfilter. Via en värmeväxlare överförs en del av värmen från den utgående (använda) dialysvätskan, vilket minskar energibehovet vid uppvärmningen. Vattnet når därefter ett uppvärmningskärl, där vattnet värms upp till önskad temperatur. Nästa steg är att blanda in olika salter i vattnet, för att det ska ha samma innehåll som blodet, eller alternativt mer eller mindre om balansen i blodet ska ändras.

Salterna kan tillsättas på lite olika sätt. Ett alternativ är att använda två olika koncentrat, som brukar kallas för A och B. Det första innehåller alla salter som behövs förutom bikarbonat, som separerats för att motverka utfällning av CaCO_3 . A-koncentratet är i vätskeform och doseringen regleras med en konduktivitetscell, som mäter den elektriska ledningsförmågan i dialysvätskan. B-koncentratet är i pulverform, som maskinen löser upp under behandlingen, och dess dosering regleras även den av en konduktivitetscell, inte samma som A-koncentratet. Ett annat alternativ använder endast ett koncentrat, och här är bikarbonat utbytt mot acetat. Koncentratet är flytande och doseras precis som övriga med en konduktivitetscell.

Bikarbonat fungerar som en buffert i kroppen, som hanterar syra-basbalansen. I normala fall nybildas bikarbonat i njurarna, men en dialyspatient måste tillföras detta

salt. Den dominerande metoden är därför att tillsätta bikarbonat i dialysvätskan, men problem med utfällning av CaCO_3 och hygien, bakterier växer lätt i bikarbonat, gjorde ett tag acetat fick fungera som ersättning. Acetat i sig fungerar inte som en buffert, men då det metaboliseras i kroppen bildas bikarbonat. Fördelen med acetat är att det inte har bikarbonatets nackdelar, endast ett koncentrat behöver användas och att kostnaden är lägre. Nackdelarna är främst att patienter kan ha dålig förmåga att metabolisera acetat. Hygienproblemen löstes i och med att bikarbonat började kunna distribueras i pulverform och utfällningsproblemen löstes genom att separera bikarbonatet från det övriga koncentratet. Idag är bikarbonat dominerande, men acetat finns fortfarande kvar.

Avgasningen är dialysvätskans nästa steg. Detta görs för att avlägsna den stora mängd lösta luft som finns i vätskan, som annars kan förstöra de flödes- och konduktivitetsmätningar som genomförs nedströms, men även försämra maskinens prestanda. Avgasningen genomförs genom att sätta ett stort negativt tryck på vätskan (med negativt tryck menas ett tryck lägre än normalt atmosfäriskt lufttryck), detta gör nu att luften separeras från vätskan när den får ansamlas i en avgasningskammare vid atmosfärstryck.

Nästa steg för vätskan är en pH-mätare, som är en extra säkerhetskoll för att se att rätt koncentrat används. Detta för att vissa desinfektionsvätskor kan ge samma konduktivitet som de ordinarie koncentraterna, men pH-värdet skiljer sig åt.

Flödet genom dialysfiltret styrs sedan av två stycken pumpar, placerade före och efter filtret. Det regleras med hjälp av två stycken flödesmätare, där både den enskilda hastigheten och differensen mellan de båda är av intresse. Det vanligaste sättet att reglera flödet är volymstyrning, då man reglerar mängden vätska som ska ultrafiltreras bort från blodet. En annan lösning är att styra trycket över dialysfiltret.

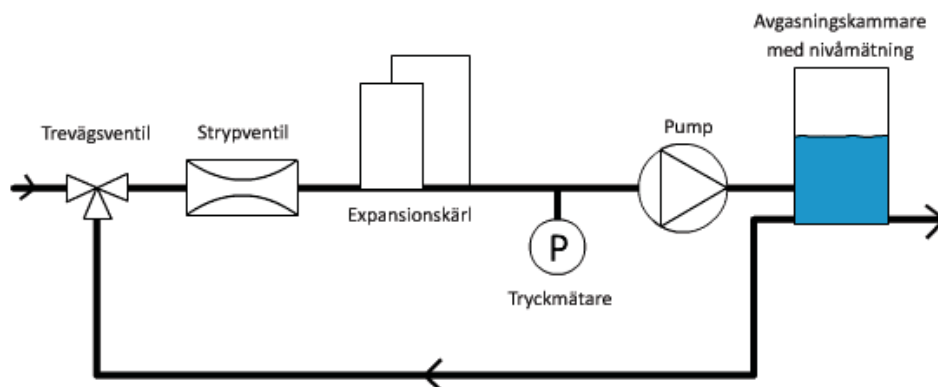
Innan dialysvätskan når dialysfiltret får det passera ännu ett filter. Efter dialysatorn sker avgasning för att möjliggöra den senare flödes- och konduktivitetmätningen. Flödet används för regleringen och konduktiviteten för att mäta effekten av dialysen.

Nästa sensor är en blodläckagedetektor, som larmar om blod läckt igenom dialysfiltret, mätaren upptäcker om vätskan färgats röd. Därefter passerar dialysvätskan den andra pumpen och värmeväxlaren, och sedan transporteras det rakt ut i avloppet.

Ovanstående beskrivning visar den väg dialysvätskan tar då allting fungerar normalt. Utöver detta finns ett antal ventiler, som bl.a. möjliggör förbikoppling av dialysfiltret om något fel på vätskan upptäcks. Ventilerna används även vid desinfektion av maskinen.

4. Avgasningssystemet

I figur 4.1 visas en skiss av avgasningssystemet. Det inleds med en trevägsventil, som förutom dialysvätskan som inlopp även har en recirkulation från avgasningskammaren. Ventilen är ställbar och möjliggör styrning av flödet genom den. Nästa komponent, på trevägsventilens utflöde, är en strypventil, som skapar det undertryck som behövs för att avgasningen ska fungera. Undertrycket gör att luften expanderar i det efterkommande expansionskärlet. Innan vätskan sedan når pumpen passerar det en tryckmätare, som används för att reglera tidigare nämnda undertryck. Efter pumpen kommer avgasningskammaren, där luften lämnar vätskan. En nivåmätning i kammaren används för att reglera vätskemängden. Flödet ut ur kammaren bestäms av maskinen, och det är i normalfallet mindre än det flöde som pumpen orsakar, och för att hålla en konstant nivå i avgasningskärlet måste en viss recirkulation ske, tillbaka till trevägsventilen. Utöver nämnda beskrivning ingår det en del olika ventiler som tillåter vätska att flöda annorlunda, som bl.a. används vid desinficering av maskinen.



Figur 4.1 Schematisk skiss över avgasningssystemet.

Varför avgasning?

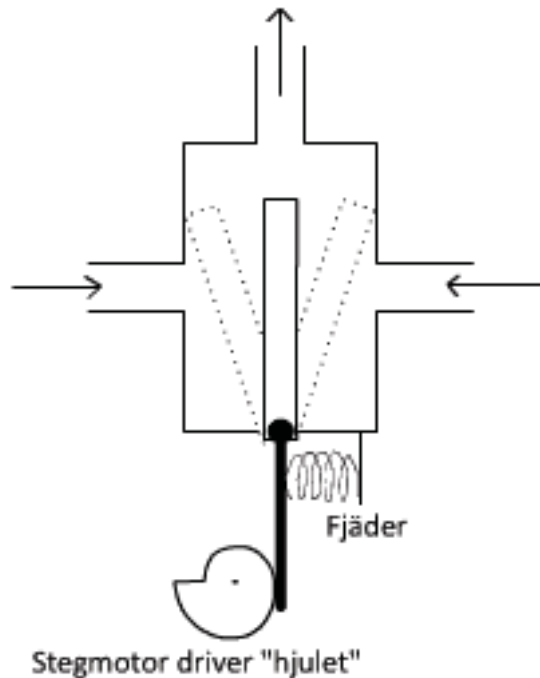
Att ha luft kvar i dialysvätskan när den når dialysatorn är inte bra. För det första kan bubblorna sätta sig i filtret och därmed försämra effekten av dialysen. För det andra kan tryckprofilen över dialysatorn vara sådan att eventuell luft sugts över från dialysvätskan till blodet, särskilt om ultrafiltreringshastigheten är låg, och detta är något som absolut bör undvikas. Luft finns löst i det ingående vattnet till maskinen men gas bildas t.ex. även då saltkoncentratet blandas med dialysvätskan. Förutom att förhindra luften att ta sig till blodet är det viktigt att inte riskera att förstöra mätningen av konduktivitet och flöde senare i vätskebanan. Dessa mätningar störs av minsta luftbubbla. Mätningarna är oerhört viktiga för att dialysen ska fungera på ett bra och för patienten säkert sätt.

4.1 Systemets komponenter

Trevägsventilen

Ventilen har två stycken inflöden, dels dialysvätskan som uppströms har värmts upp och doserats med koncentrat, men också vätskan som recirkuleras från avgasnings-

kammaren. Utflödet går via en strypventil till ett expansionskärl. Ventilen är ställbar, så att flödet genom den kan styras. En platta i ventilens inre styrs via en stegmotor, se figur 4.2. Genom att vrida plattan kan de bägge inflödena styras. Motorn driver en cylinder med varierande radie, se figuren. Denna ligger tryckt mot plattan, som hålls kvar i detta läge av en spänd fjäder.



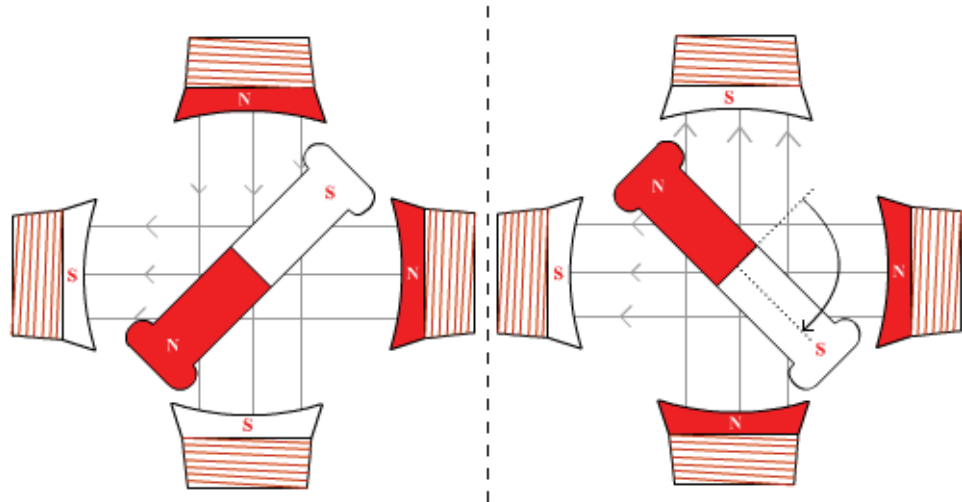
Figur 4.2 Skiss av trevägsventilen.

Stegmotor

Trevägsventilen drivs av en bipolär stegmotor [17]. Den består av två elektromagneter och en metallisk rotor. Genom att driva ström genom elektromagneterna kan man få rotorn att ställa sig in sig i olika lägen. Figur 4.3 illustrerar hur det går till. I utgångsläget är strömmen vald så att elektromagneterna har sina nordpoler uppåt och till höger, vilket gör att rotorn ställer in sig med sin sydpol riktad snett upp åt höger. Genom att byta strömriktningen i den vertikala elektromagneten skiftas de magnetiska polerna och rotorn tvingas rotera för att ställa in sig i det nya magnetfältet. Genom att sedan skifta strömriktningen i den andra elektromagneten tvingas rotorn stega ett steg till. När rotorn återvänder till utgångsläget säger man att den har fullbordat en hel stegsekvens, som alltså består av fyra steg.

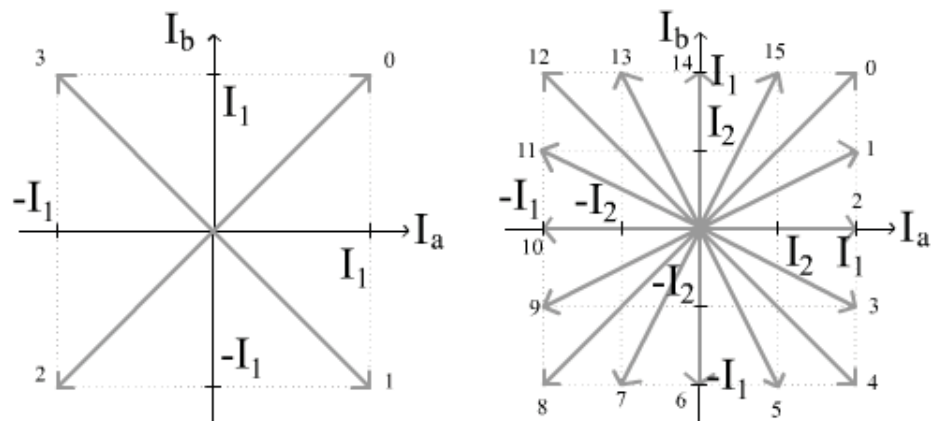
Stegmotorn styrs i öppen loop, genom att räkna antalet steg som tas. Detta gör det omöjligt att veta om motorn ligger rätt och inte har tappat något steg. Den stegmotor som används till trevägsventilen har dock två ändlägen, och detta gör att nollställning är möjlig. Detta genomförs genom att köra motorn till ett ändläge, som ju är en känd position, och därefter på nytt stega fram.

I figur 4.3 har strömmen genom elektromagneterna varit konstant, endast riktningen har ändrats. Det går dock att även variera storleken på strömmen, och då kan man skapa magnetfält som gör att rotorn ställer in sig i olika lägen mellan de hela stegen, s.k. delsteg. Denna typ av styrning illustreras enklast med ett fasdiagram. Ett sådant har strömmen genom elektromagneterna på koordinataxlarna och den Ortsvektor som bildas vid två givna strömmar illustrera rotorn, argumentet ger vinkeln och



Figur 4.3 Illustration över stegmotorns funktion. Genom att variera strömmen genom elektromagneterna kan rotorns vinkel styras. I den högra delen av figuren har strömmen genom den vertikala elektromagneten vänts.

beloppet motorns vridmoment i läget.



Figur 4.4 Till vänster visas ett fasdiagram för när stegmotorn ska styras med helsteg. Endast en strömnivå behövs, bara strömriktningen behöver ändras. Till höger visas ett fasdiagram för när stegmotorn ska styras med kvartssteg. Nu behövs tre strömnivåer, 0, I_1 och I_2 , och dessutom behöver riktningen kunna ändras.

Helstegning åstadkoms alltså genom ett konstant värde på strömmen och endast riktningen regleras. I vänstra halvan av figur 4.4 illustreras hur strömmen ska styras för att erhålla helsteg. Genom att införa en nollnivå kan också halvsteg implementeras, och i figuren skulle då de extra lägena hamna på koordinataxlarna. Genom att tillåta fler strömnivåer kan ännu finare upplösning erhållas. Införs t.ex. en strömnivå mellan 0 och den höga nivån kan kvartssteg implementeras. Detta är illustrerat i den högra delen av figur 4.4.

Den ovan beskrivna metoden för styrning av stegmotorn kallas för microstepping [19]. Nackdelen med metoden är att gångtiden blir längre, då motorn endast tar ett delsteg varje uppdatering, samplingspunkt. Teoretiskt skulle microstepping kunna leda till en hur hög upplösning som helst, bara tillräckligt många strömnivåer finns

tillgängliga. I praktiken finns det dock begränsningar, t.ex. för hur strömmen genereras och dessutom gör friktion i motorn att hur små steg som helst inte är möjliga.

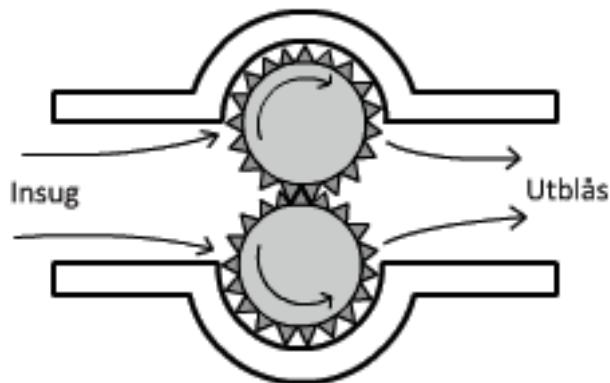
Strypventilen och expansionskärlet

Strypventilen är en komponent som minskar arean som vätskan kan flöda genom, den kan t.ex. liknas vid en flaskhals. Syftet med ventilen är att bygga upp det undertryck som ska göra avgasningen möjlig. Detta genomförs genom att försvåra för vätskan att flöda förbi den samtidigt som avgasningspumpen suger ut vätska ur utrymmet bakom ventilen. Denna process skapar det nödvändiga undertrycket.

Då vätskan och den lösta luften utsätts för undertrycket vill de expandera. I förhållande till luften är dock vätskan inkompressibel och påverkas inte av undertrycket, d.v.s. den expanderar inte. Detta gör dock luften och bubblor bildas. Expansionskärlets roll är att se till att så verkligen hinner ske, så att avgasningssystemet får avsedd effekt.

Avgasningspumpen

Pumpen är av kugghjulstyp, vars funktion bygger på att släppa in vätska i ett utrymme och sedan förflytta detta utrymme. En principskiss ges i figur 4.5. Pumpen måste ha ett tillflöde av vätska för att fungera.



Figur 4.5 Skiss över hur en kugghjulspump fungerar [21].

Pumpen styrs av en DC-motor. I dialysmaskinens mjukvara skickas dock styrsignalen till den med pulser med konstant spänning, men med variabel pulsbredd. De skickas med konstant frekvens, i den meningen att pulsens början återkommer med konstant frekvens. Pulserna skickas sedan genom ett filter som jämnar utsignalen till en DC-signal.

Avgasningskammaren

Kammaren befinner sig i atmosfärstryck, via en koppling till värmekärlet. Nivån i kammaren mäts och används för att hålla flödet genom avgasningssystemet konstant. Mätningen utförs av en ultraljudsmätare. Den är placerad i kärlets botten och avger en puls, som reflekteras i ytan. Genom att mäta när pulsen kommer tillbaka kan vätskenivån beräknas.

4.2 Nuvarande reglering

Det som styrs i systemet är avgasningstrycket och vätskenivån i avgasningskärlet. Det senare är ekvivalent med att styra flödet som ska passera systemet, då nivån i

kärlet ska hållas konstant är reglering av nivån samma sak som att se till att inflöde är lika med utflöde. Det finns två stycken sätt att påverka systemet, nämligen med avgasningspumpen och trevägsventilen. Att pumpen påverkar både tryck och nivå är lätt att inse, med tanke på dess placering. Ventilen påverkar nivån, i och med att den styr recikulationen, och om pumpen reglerar nivån kan den indirekt styra trycket genom att ändra nivån och låta pumpen jobba.

Systemet är alltså flervariabelt, men den befintliga reglerstrategin bygger på två särkopplade regulatorer. Trycket styrs av avgasningspumpen och nivån av trevägsventilen. Båda regulatorerna är PI-regulatorer på inkrementform.

PI-regulator på inkrementform

En vanlig PI-regulator i kontinuerlig tid har överföringsfunktion enligt (4.1) [22].

$$G_{PI}(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (4.1)$$

Denna kan diskretiseras, t.ex. med en Euler framåt-differens, då s approximeras enligt (4.2), där q är skiftesoperatoren och h samplingstiden. Regulatorns överföringsfunktion ges då av (4.3).

$$s \approx \frac{q-1}{h} \quad (4.2)$$

$$\Rightarrow G_{PI}(q) = K \left(1 + \frac{h}{(q-1)T_i} \right) \quad (4.3)$$

Styrsignalen ges genom att låta överföringsfunktionen operera på reglerfelet e , enligt (4.4).

$$u = G_{PI}(q)e = K \left(1 + \frac{h}{(q-1)T_i} \right) e \quad (4.4)$$

Styrsignalinkrementet Δu kan nu beräknas och ges i (4.5).

$$\Delta u = (q-1)u = K(q-1)e + \frac{Kh}{T_i}e \quad (4.5)$$

Den totala styrsignalen kan beräknas genom att använda inkrementet enligt (4.6).

$$u(k+1) = u(k) + K(e(k+1) - e(k)) + \frac{Kh}{T_i}e(k) \quad (4.6)$$

Befintlig tryckreglering

Först definieras en basnivå, som beror på börvärdet. Den beräknas som en konstant offset och till detta adderas en konstant multiplicerat med börvärdet. Denna nivå ger en lagom styrsignal till pumpen, som är ungefär rätt. Resten av styrsignalen beräknas sedan genom att bilda reglerfelet och använda PI-regulatorn på inkrementform. Den signal som sedan skickas till pumpen ges av basnivån adderad till PI-regulatorns styrsignal. Anti-windup åstadkoms genom att jämföra med maximalt och minimalt tillåten signal till pumpen. Om signalen blir för stor trunkeas den; PI-regulatorns integraldel justeras så att totala styrsignalen är inom de tillåtna gränserna. Som tidigare nämnts representerar styrsignalen som beräknas pulsbredden på de pulser som via ett filter skickas till pumpmotorn.

Befintlig nivåreglering

Nivåregleringen använder sig inte av en basnivå som tryckregleringen, utan endast PI-regulatorn på inkrementform. Att använda sig av en basnivå här saknar nämligen mening, då kontrollen över vilken position stegmotorn befinner sig i lätt kan tappas. Positionen synkroniseras vid uppstarten av maskinen, men därefter sker det ingen återkoppling av det aktuella läget, och risken finns att den position mjukvaran tror att motorn befinner sig i skiljer sig från den verkliga. Basnivån behövs dessutom inte, då integraldelen hos regulatorn kommer att göra så att ventilen ställer sig i det läge, som krävs för att nivån ska bli rätt. Antiwindup-biten fungerar på samma sätt som för tryckregleringen, dvs. att integraldelen justeras så att den totala styrsignalen hamnar inom det tillåtna intervallet, mellan motorns ändlägen.

Eftersom ventilen styrs av en stegmotor har den endast diskreta steg, och eftersom styrsignalen är en reell variabel kommer det bli stora avrundningsfel. Detta tas om hand genom att vid varje styrsignaluppdatering hålla koll på hur signalen trunkeas och kompensera för detta vid nästa styrsignalberäkning.

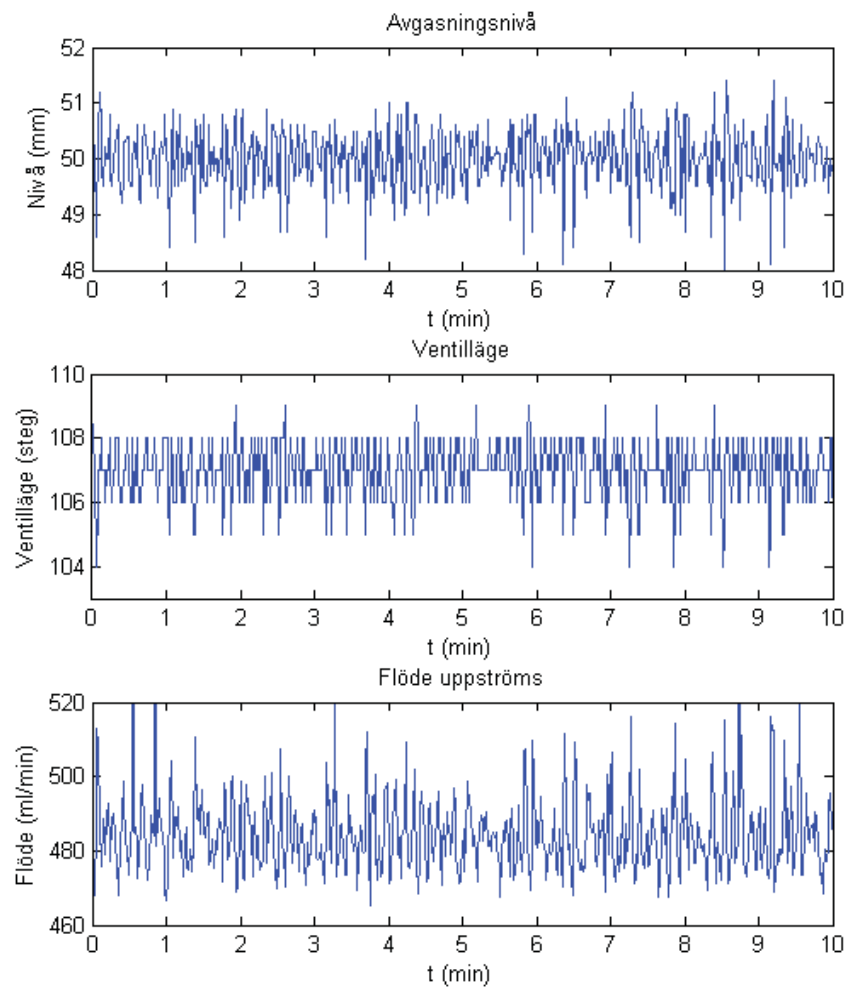
Utvärdering av nuvarande reglering i dialysmaskinen

Regleringen av trycket och avgasningsnivån i dialysmaskinen fungerar bra, åtminstone om man endast studerar avgasningssystemet. Både tryck och nivå följer referensen bra och visar inga tecken på att tappa den.

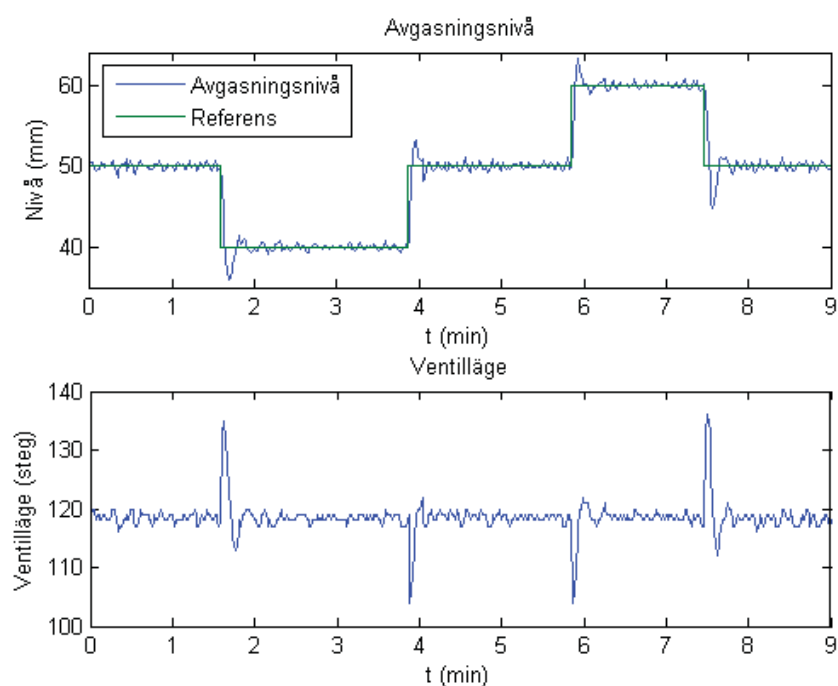
I figur 4.6 visas avgasningsnivån, ventilläget och flödet uppströms. Här ser man tydligt att ventilen jobbar mellan huvudsakligen 3 olika lägen, ibland ända upp till 6. Detta leder till att flödet (inflödet till avgasningssystemet) blir ryckigt, som det nedersta diagrammet tydligt visar.

För att studera regleringen lite närmare gjordes även försök med börvärdesändringar, för nivån finns detta i figur 4.7 och för trycket i figur 4.8. Nivåregleringen är inget problem. Den är snabb, ganska aggressiv och följer snabbt med i referensändringarna. Tryckregleringen är dock något märkligare. Den första referensändringen görs till ett lägre undertryck, och då borde styrsystemet sänka pumpspänningen, men det som händer är det omvända och undertrycket blir så stort som pumpen klarar av att göra det. Långsamt ändras sedan pumpspänningen och rätt tryck nås efter ca 20 minuter, som jämfört med stegändringar i nivån är mycket långsamt. Förmodligen är det teckenfel på de koefficienter som bestämmer basnivån för pumpen, vilket då skulle förklara varför det blir fel i början, för därefter får integraldelen i regulatorn komma i arbete och rätta till regleringen. Den långa stigtiden visar för övrigt på att integraltiden T_i i regulatorn är väldigt lång.

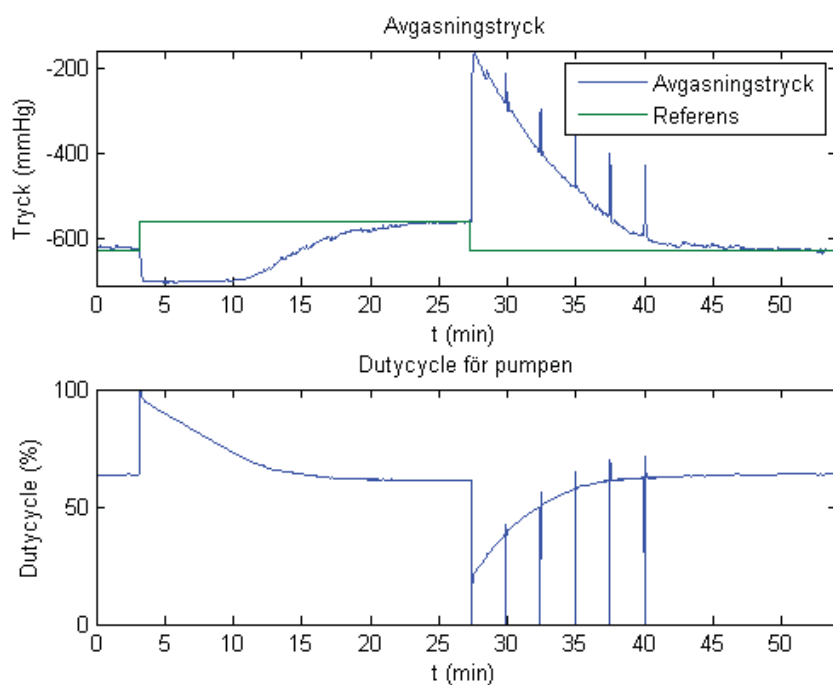
Efter den första referensändringen görs ännu en, tillbaka till det ursprungliga trycket. Samma fenomen uppstår här, och insvängningstiden är av samma storleksordning. Under denna tid inträffar här dock något märkligt, fem gånger sjunker undertrycket dramatiskt under några sekunder och återgår därefter snabbt till samma tryck som tidigare. Pumpen reagerar på ett liknande sätt. Vad det är som händer är oklart.



Figur 4.6 Typiskt utseende för nivån, den reglerande trevägsventilen och flödet uppströms från avgasningssystemet vid en dialysbehandling.



Figur 4.7 Resultatet av en ändring av nivåreferensen.



Figur 4.8 Resultatet av en ändring av tryckreferensen.

5. Problemformulering

Målet med projektet är att undersöka om avgasningsloopen i en AK200S dialysmaskin kan göras om. Detta p.g.a. av att nuvarande implementeringen gör att flöden uppströms i maskinen blir väldigt ryckiga, som leder till att utvärdering av dialysresultatet försvåras. Tanken är att en förändring av loopen eller regleringen ska kunna råda bot på detta problem.

I den nuvarande implementeringen styrs avgasningstrycket av en pump och nivån i avgasningskammaren av en trevägsventil. Målet är att designa systemet så att flödet uppströms blir så jämnt som möjligt. En möjlig lösning skulle kunna vara att göra om regleringen, så att trevägsventilen styr trycket och pumpen styr nivån. Skulle det visa sig att det inte går att förbättra flödet är målet att förklara varför det är på det här sättet.

Varför flödet är ryckigt uppströms

Efter avgasningsloopen styrs flödet noggrant, med både tryck- och flödesmätning tillgänglig. Detta flöde är konstant och styrs från avgasningsloopen via den konstanta nivån i avgasningskammaren. Recirkulationsflödet används för att reglera avgasningsnivån, och därmed tvingas flödet uppströms att variera. Här sker indoseringen av koncentrat, och detta blir svårreglerat eftersom konduktivitetscellen har svårt att klara av flödesfluktuationerna. Genom att se till att ventilen behöver ändras mindre ska förhoppningsvis ett stabilare flöde kunna erhållas.

Varför dialysresultatet blir svårt att utvärdera med ett ryckigt flöde

Dialysen utvärderas bl.a. genom att mäta konduktiviteten på den dialysvätska som passerat dialysatorn. Vissa salter tas upp i blodet, andra tas upp i dialysvätskan från blodet. Genom att jämföra med vad som fanns i dialysvätskan innan dialysatorn kan man på så sätt göra en bedömning om hur det hela gått. Problemet som uppstår med ett ryckigt flöde är att doseringen av saltkoncentrat blir dålig. Den baseras på återkoppling från konduktivitetmätningar av dialysvätskan och det doserade koncentratet. Doseringen är en långsam process som inte hinner med i de snabba förändringar som sker i konduktiviteten, som i sin tur beror på det ryckiga flödet.

6. Experiment

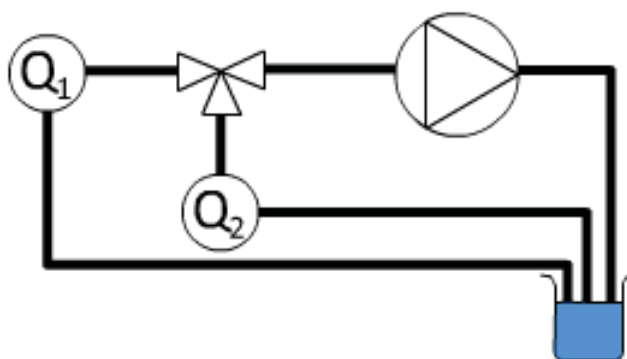
6.1 Labuppställning

En uppställning liknande avgasningssystemet i dialysmaskinen har funnits tillgänglig. Denna har innehållit pump, trevägsventil, strypventil inklusive expansionskärl och diverse slangar och sensorer. Vatten har sugits och pumpats ut i ett och samma kärl. Uppställningen har haft som syfte att efterlikna det riktiga systemet, och den enda större skillnaden är att avgasningskammaren med nivåmätning inte funnits tillgänglig, men däremot har flödet varit möjligt att mäta och nivån har därför kunnat räknas ut. Förutom flödesmätningar har en trycksensor varit inkopplad. Styrning av pump och ventil och avläsning av sensorerna har skett med LabView.

En rad olika experiment för att undersöka karaktäristiken hos utrustningen har utförts, och ökat förståelsen inför de problem som kan finnas med reglering.

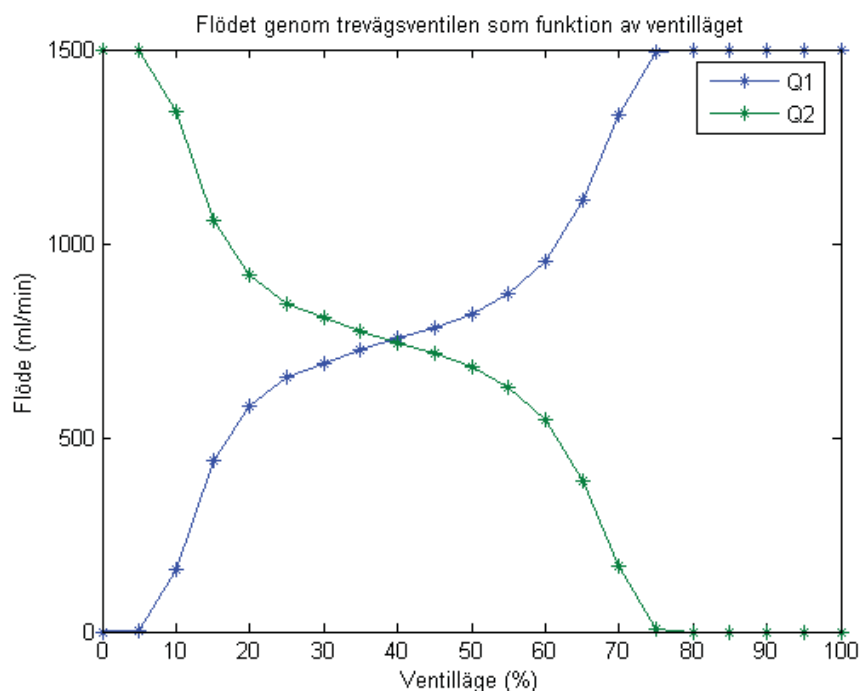
6.2 Undersökning av trevägsventilen

Karaktäristiken för den ställbara trevägsventilen mättes upp med en uppställning enligt figur 6.1. Det totala flödet har hållits konstant genom att reglera det med en PI-regulator. Resultatet av mätningarna återfinns i figur 6.2.



Figur 6.1 Uppställning för undersökning av trevägsventilen.

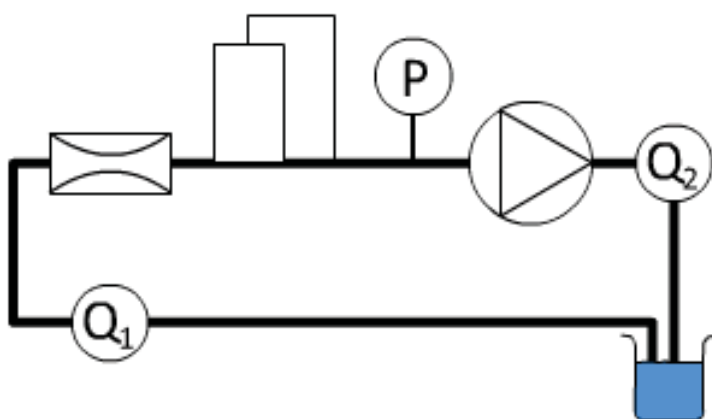
Man kan börja med att konstatera att ventilen inte är symmetrisk med avseende på ventilläget, då punkten där lika mycket vätska passerar de båda ingångarna ligger på ungefär 40 % och inte halvvägs. Detta beror på att stora ventilutslag helt stänger igen den andra ingången, och tas hänsyn till detta ser det mer symmetriskt ut. Då ventilläget ligger mellan ungefär 25 och 55 % är flödet approximativt linjärt beroende av ventilläget, utanför detta område är det dock ganska olinjärt. För regleringen innebär detta att ändring av ventilen ger olika effekt beroende på vilket håll ändringen görs. Förhoppningsvis ska det vara möjligt att approximera även det olinjära området med en linjär motsvarighet, åtminstone lokalt.



Figur 6.2 Illustration över hur flödet genom trevägsventilen varierar med ventilläget då det totala flödet hålls konstant.

6.3 Undersökning av flöden och drivspänning för olika undertryck

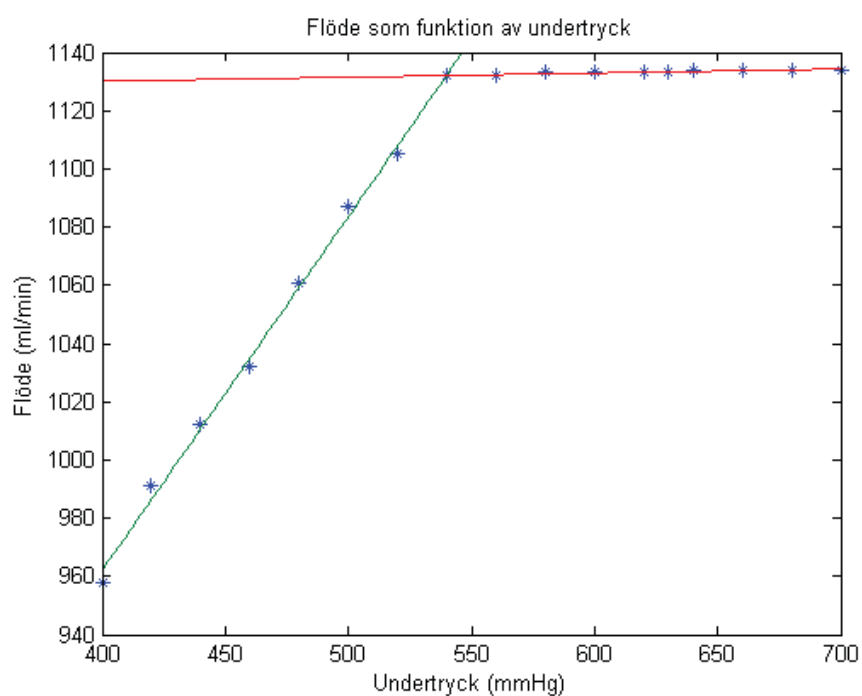
För att undersöka pumpens egenskaper för olika undertryck användes uppställningen enligt figur 6.3. Pumpspänningen styrdes manuellt så att önskat undertryck erhöles. Resultatet visas i figur 6.4 och 6.5. Någotting händer vid ungefär 550 mmHg undertryck. En förklaring skulle kunna vara att pumpen drabbas av kavitation.



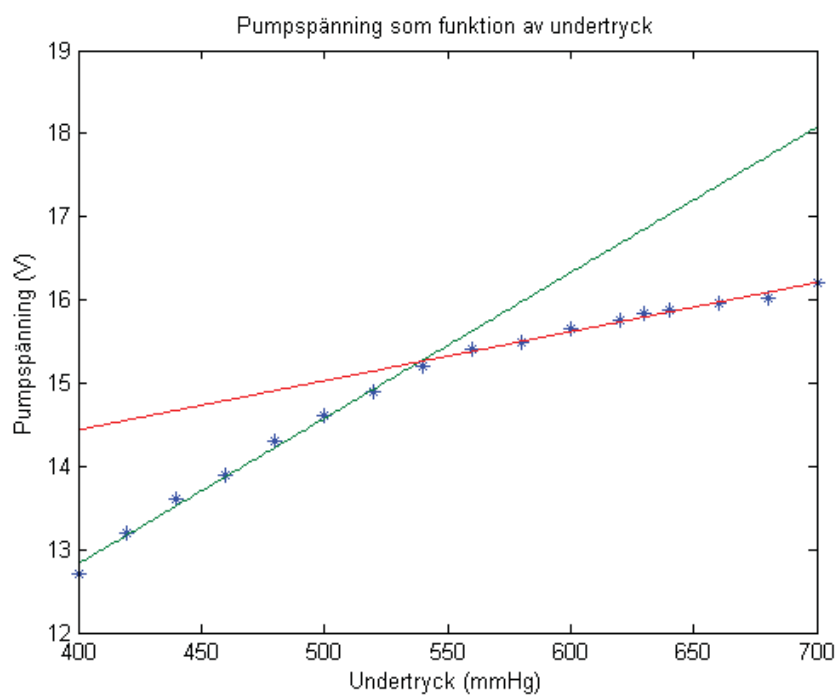
Figur 6.3 Uppställning vid undersökning av flöden och pumpspänning som krävs för olika undertryck.

En annan förklaring till fenomenet skulle kunna vara att det bildas luftbubblor i strypventilen, som beror på samma sak som kavitationen. Dessa fortplantar sig sedan till pumpen och gör att den inte kan öka flödet nämnvärt. Beteendet är dock ganska

6.3 Undersökning av flöden och drivspänning för olika undertryck



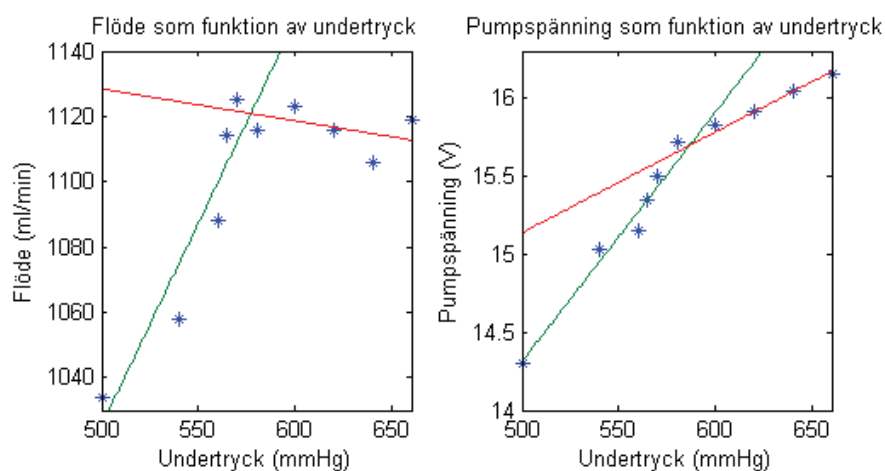
Figur 6.4 Flöde som funktion av undertryck. Två områden identifieras lätt, och båda verkar vara linjära, som de anpassade linjerna antyder.



Figur 6.5 Pumpspänningen som funktion av undertrycket. Precis som för flödet kan två olika områden identifieras, och de ser ut vara linjära även här, se de anpassade linjerna.

anmärkningsvärt, och man kan ifrågasätta huruvida flödesmätaren visat rätt. Därför gjordes ytterligare ett experiment, där flödet även mättes på ett annat sätt. Vätskan sögs från ett kärl och tömdes i ett annat, genom att mäta tiden det tog att förflytta en viss volym kunde flödet beräknas. Resultatet visas i figur 6.6. Som figuren visar blir inte resultatet lika tydligt som tidigare, men det går tydligt att utskilja. Brytpunkten har flyttat på sig här, vilket förmodligen beror på att experimentuppställningarna inte varit exakt likadana, med avseende på placering av komponenter, slanglängder och liknande. Flödesmätaren visade ungefär samma flöde som det manuellt uppmätta, och därmed bör man ej betvivla dess mätningar längre.

Precis som figur 6.3 visar gjordes dubbla flödesmätningar, både före och efter pumpen. Då pumpen kom upp i det övre området började sensorerna visa olika flöden, vilket inte bör vara fallet eftersom all vätska som passerar den första sensorn även måste passera den andra. Flödet är större enligt den andra sensorn och betydligt ryckigare, vilket måste bero på kavitationsproblemen. Kavitationen innebär att det bildas luftbubblor, och dessa gör att flödesmätningen blir dålig.



Figur 6.6 Uppreping av experimentet, då flödet har mätts för hand. Experimenten utfördes vid olika tidpunkter, och uppställningen har förmodligen inte varit likadan, vilket förklarar varför brytpunkten har flyttat på sig.

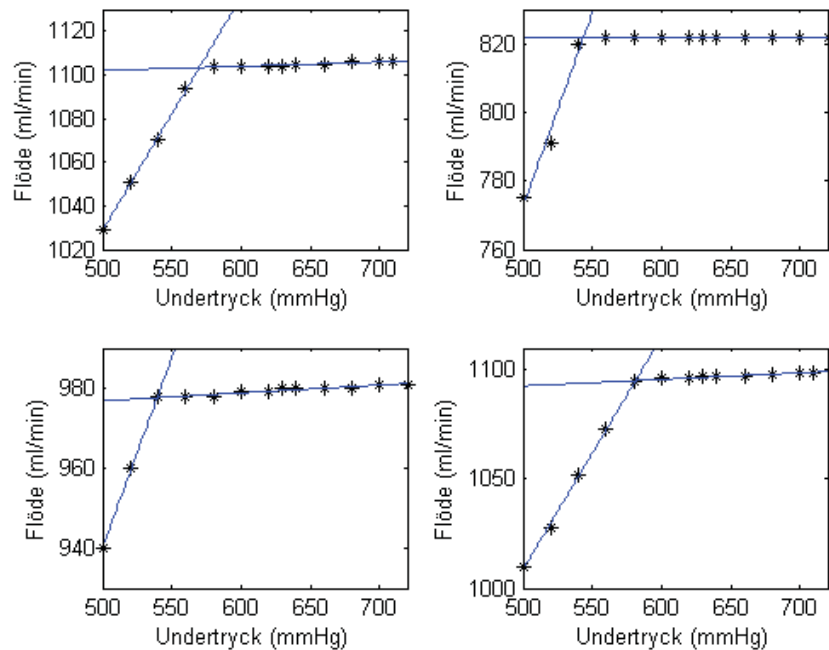
Test av olika strypventiler

Samma försök som tidigare gjorts med strypventilen från dialysmaskinen kan göras för ett par andra strypventiler. Detta visar på ett liknande beteende, dock skiljer sig tryck och flöden åt när brytpunkterna nås. Hur flödet varierar med undertrycket för de fyra studerade strypventilerna visas i figur 6.7, och hur pumpspänningen varierar med undertrycket visas i figur 6.8. Flöde och tryck för brytpunkterna, lutningen innan brytpunkterna samt strypventilernas diameter visas i tabell 6.1.

Den första av strypventilerna är den tidigare testade, och den kan användas som referens vid jämförelser med de andra ventilerna. Alla ventilerna har sin brytpunkt, då flödet övergår till att vara i princip konstant, mellan 500 och 600 mmHg undertryck. Viss tryckskillnad existerar, men den är inte särskilt stor. Den beräknade lutningen visar strypventilernas förmåga att skapa undertryck, och de beräknade lutningarna visar att denna förmåga är likvärdig för de testade stryparna. Storleken på det konstanta flödet varierar dock desto mer, från 820 ml/min för strypventil 2 till 1100 ml/min för strypventil 1 och 4. En ändring av flödet i avgasningssystemet skulle medföra att trevägsventilen får byta arbetspunkt, och skulle då kunna hamna i ett område där ett ventilsteg inte innebär så stor flödesändring. Detta vore ett önskvärt resultat.

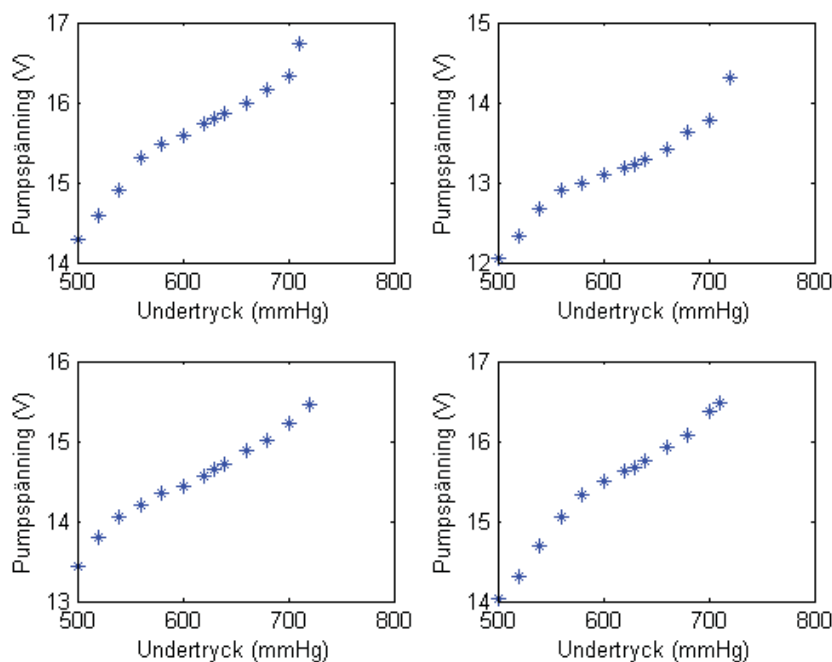
Strypventil	1	2	3	4
Ursprung	AK200	AK200	Foxtrot	AK95
Tryck i brytpunkten (mmHg)	570	544	539	581
Flöde i brytpunkt (ml/min)	1110	822	978	1095
Diameter (mm)	1.8	1.5	1.8	1.9
Lutning före brytpunkt (ml/(min·mmHg))	1.07	1.13	0.95	1.07

Tabell 6.1 Data för brytpunkterna samt storleken för de testade strypventilerna.



Figur 6.7 Flödet som funktion av undertrycket för fyra olika strypventiler. I respektive diagram finns även en linje anpassad för de båda områdena.

Något annat som vore önskvärt var om brytpunkten legat vid ett undertryck större än 630 mmHg, som är det undertryck som ska hållas i avgasningssystemet. Detta hade möjliggjort det för pumpen att enklare styra flödet, och förhoppningsvis förbättrat hela regleringen. Storleken på strypventilen ser ut att vara en parameter som spelar roll, om man bortser från stryp nummer 3 (som är lite annorlunda utformad än de övriga). Studeras undertrycket i brytpunkten som funktion av diametern för strypventilen upptäcks att sambandet dem emellan skulle kunna vara linjärt, se figur 6.9. Baserat på endast 3 mätpunkter är detta ingen slutsats man ska lita på, då osäkerheten är alldeles för stor. Struntar man dock i detta kan man undersöka vilken diameter på strypventilen som skulle krävas för att få brytpunkten vid 630 mmHg, och det kan man avläsa till ungefär 2.4 mm. Frågan är sedan om pumpen är tillräckligt kraftig för att åstadkomma det önskade undertrycket med en sådan strypventil. Ett sätt att minska det flöde som behövs skulle kunna vara att förlänga strypventilen, då längden också påverkar strypningen (men inte upphovet till brytpunkten som nästa avsnitt ska visa). Det skulle alltså kunna vara möjligt att designa en strypventil som har samma



Figur 6.8 Pumpspänning som funktion av undertrycket för fyra olika strypventiler.

funktion som dagens, men där kavitationsproblemet uppstår vid högre undertryck.

Även pumpspänningens variation med undertrycket uppvisar samma beteende för samtliga strypventiler. Detta försök har dock även gjorts för lite större undertryck än tidigare, och då visar det sig vissa olinjära fenomen. Pumpen klarar nämligen inte av att åstadkomma större undertryck än lite drygt 700 mmHg. Det som händer är att pumpspänningen plötsligt måste ökas väldigt mycket för att öka undertrycket, och till slut nås ett maxtryck. Detta fenomen är dock inget som behöver tas hänsyn till i avgasningssystemet, då arbetstrycket där är betydligt lägre.

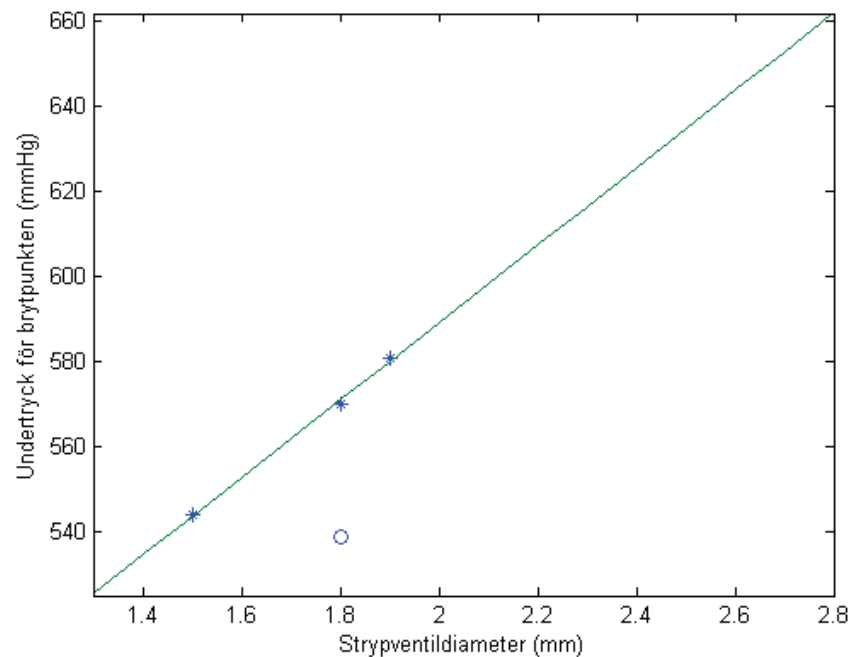
Något mer som kan undersökas är vilket flödesförhållande som råder i strypventilerna. Detta görs lämpligen genom att studera Reynoldstal, som är en dimensionslös parameter som kan tolkas som kvoten mellan tröghetskrafter och friktionskrafter i vätskan. En definition ges i (6.1), där L är rördiametern, V är flödets hastighet, A är tvärsnittsarean, Q flödet, ρ densiteten och μ viskositeten för vätskan.

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho VL}{\mu} \\ Q &= VA = V \frac{\pi^2}{4} L^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Re} = \frac{4Q\rho}{\mu\pi^2 L} \quad (6.1)$$

För flöde i ett rör brukar ett Reynoldstal på 2300 markera övergången från laminärt till turbulent flöde. I tabell 6.2 är Reynoldstalet uträknat för flödena genom de testade strypventilerna vid brytpunkten ($\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.003 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$). Med den tidigare definitionen kan man alltså konstatera att flödet är turbulent.

Strypventil	1	2	3	4
Reynoldstal	4120	3690	3650	3870

Tabell 6.2 Respektive flödes Reynoldstal i strypventilerna vid brytpunkten.



Figur 6.9 De inprickade punkterna motsvarar uppmätta undertryck för strypventilerna och linjen är en linjär anpassning av de tre punkterna markerade med (*). Strypventilen markerad med (o) är den som är lite annorlunda utformad jämfört med de övriga.

6.4 Kavitation

Fenomenet kavitation inträffar i en vätska då trycket sjunker under ångtrycket [21]. Det som händer är att bubblor av vätskan i gasform bildas, vätskan börjar lokalt att koka. Detta är ett vanligt fenomen i t.ex. pumpar och hos propellrar, då de ofta tvingar vätskan att flöda med stora hastigheter, som orsakar ett stort dynamiskt tryck. Fenomenet kan vara ett problem, för när de bildade bubblorna stöter på ett ökat statiskt tryck kan de implodera och orsaka stora skador på närliggande ytor. Detta är något som är vanligt på t.ex. propellerblad.

Försök till förklaring av kavitationsproblemen i avgasningssystemet

En enkel och användbar relation från flödesläran är Bernoullis ekvation (6.2), där p betecknar tryck, ρ densitet, v hastighet, g tyngdaccelerationen, z höjd och indexen anger vilken position det handlar om. Relationen är en förenkling och gäller om flödet är stabilt, inkompressibelt, friktionsfritt och man räknar längs en flödeslinje. Dessa förutsättningar gäller med största säkerhet inte i detta fall, men relationen kan ändå ge en fingervisning om vad som händer.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2 \quad (6.2)$$

Två olika orsaker till kavitationsproblemen kan finnas. Antingen kan de uppstå i pumpen eller också kan strypventilen vara orsaken.

Kavitation i pumpen Antag att en strömningslinje går från ett läge innan pumpen in i pumpen. Den första positionen är före pumpen, här är undertrycket ungefär 600 mmHg och flödet ligger på ca. 1130 ml/min. För den andra positionen, inne i pumpen, kan nu trycket räknas ut som en funktion av hastigheten, under förutsättning att man antar att båda positionerna ligger på samma höjd.

$p_1 \approx -600 \text{ mmHg}$ undertryck = 21.33 kPa
$v_1 = \frac{Q_1}{a} = 0.664 \text{ m/s}$
$Q_1 = 1130 \text{ ml/min} = 1.88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
$a = \pi r^2 = [r \approx 3\text{mm}] = 2.83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-2}$
$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Genom att lösa ut hastigheten för position 2 ur (6.2) erhålls (6.3). Ångtrycket för vatten vid temperaturen 20°C är 2.337 kPa, och kavitation börjar uppträda då trycket understiger detta.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + v_1^2} \quad (6.3)$$

Används (6.3) kan man räkna ut för vilken hastighet vätskepartiklarna i position två måste röra sig för att kavitation ska uppstå, och denna hastighet blir 6.2 m/s. Detta är ganska snabbt, vilket tydliggörs då man räknar ut med vilket varvtal pumpen måste snurra (6.4), där kugghjulet i pumpen har antagits ha en radie på 1 cm. Det verkar alltså inte särskilt troligt att det är i pumpen kavitationen uppstår.

$$\omega = \frac{v}{r} = 620 \text{ rad/s} = 6000 \text{ varv/min} \quad (6.4)$$

Kavitation i strypventilen Två olika möjligheter att placera flödeslinjen finns, antingen kan man börja innan strypventilen och sluta inne i den, eller så kan man börja i ventilen och sluta efter den. Före ventilen kan man anta att atmosfärstryck råder och efter den ett undertryck på ca. 600 mmHg. Flödet är hela tiden detsamma, 1130 ml/min, och genom att anta att det i strypventilen råder ångtrycket för vatten kan radien för strypventilen beräknas, enligt (6.5) och (6.6), radien för slangen före och efter strypventilen antas som tidigare vara ca. 3 mm.

$$v = \frac{Q}{a} = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (6.5)$$

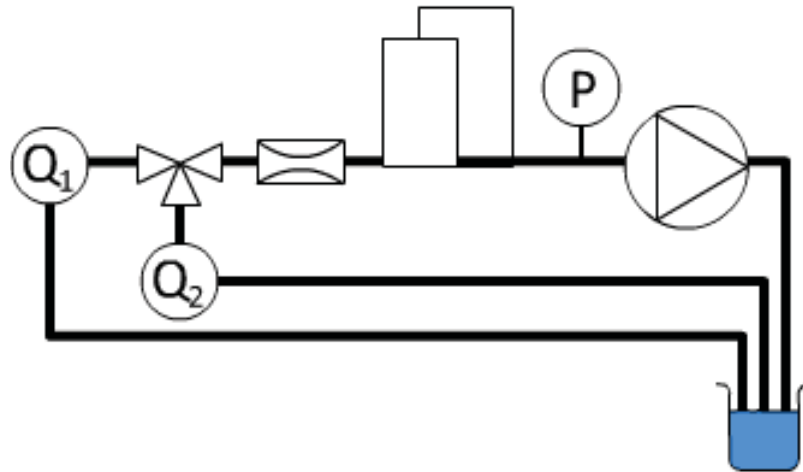
$$r_2 = \left(\frac{1}{\frac{2\pi^2(p_1 - p_2)}{Q^2 \rho} + \frac{1}{r_1^4}} \right)^{1/4} \quad (6.6)$$

Om första positionen väljs till före strypventilen erhålls radien 0.65 mm och används istället en position efter ventilen blir radien 0.99 mm. Dessa radier ligger på varsin sida om den uppmätta radien på 0.9 mm (se strypventil 1 i tabell 6.1) och att hamna strax över och under den riktiga tyder på att det är rimligt att tro att det är i strypventilen kavitationsproblemen uppstår. Bubblorna fortsätter sedan till pumpen och hindrar den att öka vätskeflödet.

Bernoullis ekvation är långt ifrån rätt, det finns så många andra konstiga effekter som beror på geometrin. Den ger dock en fingervisning om hur det ligger till. I det aktuella fallet verkar det dock som om ekvationen pekar i rätt riktning, då den förutspår förändrat beteende då strypventilen ändras, och detta är något som är verifierat experimentellt.

6.5 Avgasningsliknande system

Inledande experiment gjordes med en uppställning enligt figur 6.10. Denna uppställning är väldigt lik systemet i dialysmaskinen, den enda stora skillnaden är att avgasningskammaren saknas. Det är dock möjligt att mäta flöden, och att hålla en nivå konstant är samma sak som att hålla flöden konstanta. Med uppställningen är det möjligt att testa att reglera systemet manuellt, för att få en uppfattning om det övergripande beteendet. Då det är svårt att manuellt samtidigt styra två olika processvariabler implementerades dock en PI-regulator till flödet, som styrdes av pumpen.



Figur 6.10 En uppställning liknande avgasningssystemet i dialysmaskinen.

Genom att manuellt styra trevägsventilen upptäcks att det inte går att nå önskat undertryck om inflödet ska hållas konstant. Detta då pumpen kommer till en punkt då den inte kan leverera mer flöde. Denna observation stämmer bra överens med de tidigare försöken, som just visade på att pumpen i serie med strypventilen gav ett i princip konstant flöde för stora undertryck. Detta problem går dock att ta sig runt, genom att acceptera att flödet tillfälligt sänks, vilket motsvaras av att nivån i avgasningskammaren tillåts sjunka. När önskat undertryck väl är nått, kan ventilen släppa in mer flöde igen och kompensera lite för bortfallet tidigare. Denna manöver får dock följden att undertrycket sjunker, men det sker dock långsammare än flödet återhämtar sig och detta möjliggör det att reglera trycket för en regulator.

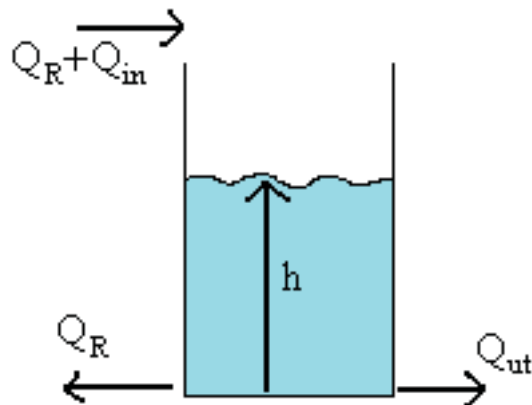
Nackdelen med ovanstående strategi är att den bygger på att ventilen ska ligga och jobba mellan två lägen. I det första är flödet för litet, vilket gör att pumpen försöker jobba mer för att öka flödet, det misslyckas dock men får till följd att undertrycket istället ökar. Då ett tillräckligt undertryck erhållits kan sedan ventilen ändras till ett läge där den släpper in mer flöde, vilket gör att pumpspänningen kan börja sänkas och det får till följd att undertrycket sjunker. Nu är man tillbaka i utgångsläget igen och det hela börjar om. Detta beteende hos ventilen var något som ville undvikas, och det kanske är möjligt med en väl vald reglerstrategi, vilket är möjligt då både tryck och flöde (nivå) kan tillåtas variera en del.

Betydligt bättre reglering kan erhållas om upplösningen på trevägsventilen förbättras. Med mindre steg finns det lägen som ger mycket mindre flödesvariationer och detta medför att ventilläget behöver justeras betydligt mera sällan.

Simulering av avgasningsnivå

För att möjliggöra test av olika reglerstrategier implementerades en simulering av avgasningskammaren. I figur 6.11 visas in- och utflöden, Q_R är recirkulationsflödet, Q_{in}

och Q_{ut} är in- respektive utflödet till avgasningssystemet, även nivån h har definieras. Antag att kammaren har tvärsnittsarean A , då kan volymbalansen enligt (6.7) ställas upp. Genom integration kan då nivån beräknas, enligt (6.8).



Figur 6.11 Skiss av avgasningskammaren med inlopp och utflöden.

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{in} - Q_{ut} \quad (6.7)$$

$$h = \frac{1}{A} \int (Q_{in} - Q_{ut}) dt \quad (6.8)$$

I LabView implementeras nivåsimuleringen genom att approximera integralen med en summa enligt (6.9), där T_s är samplingstiden.

$$h = \frac{T_s}{A} \sum (Q_{in} - Q_{ut}) \quad (6.9)$$

Utflödet Q_{ut} är nominellt 500 ml/min i dialysmaskinen, och anses vara just detta i samtliga utförda simuleringar. En uppskattning av avgasningskammarens tvärsnittsarean är en cirkel med radien 1 cm. Observera att denna simulering av nivån inte tagit hänsyn till några störningar, mer än de som existerar i mätningen av inflödet Q_{in} . Förmodligen existerar det en del mätbrus hos nivåsensorn i maskinen, men detta borde kunna undvikas genom en lågpasfiltrering av signalen, och därmed uppnå en brusnivå liknande den hos den simulerade nivån.

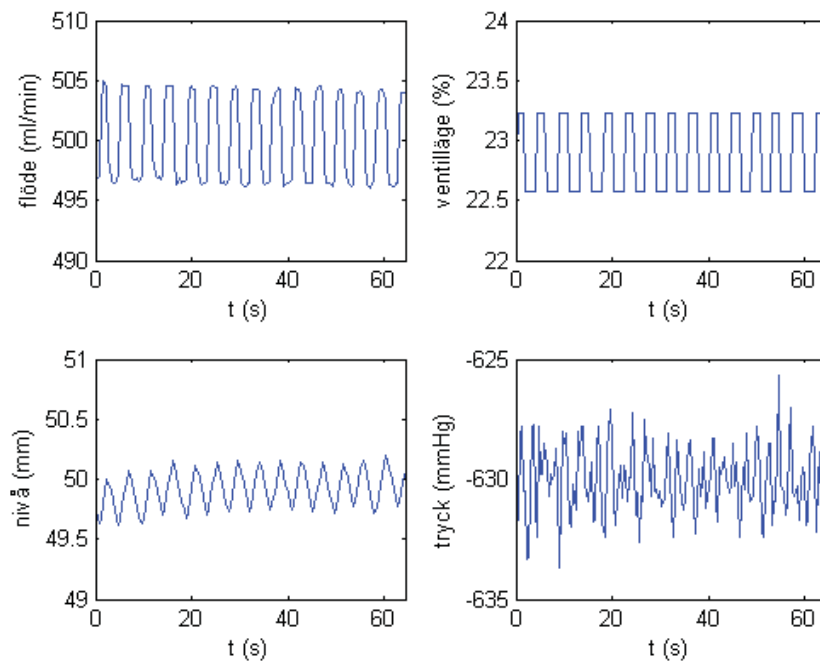
6.6 PI-reglering

Nuvarande reglering

Den nuvarande reglerstrategin kan lätt implementeras på labsystemet och utvärderas. Den bygger på att trycket styrs av pumpen och nivån av trevägsventilen. I dialysmaskinen styrs ventilen endast med hela steg, men på labbänken är det möjligt att köra med så lite som åttondelsteg. I figur 6.12 visas hur det ser ut då reglerstrategin är implementerad med helsteg och i figur 6.13 visas motsvarande då åttondels steg används. I den första figuren kan man konstatera att likheten med dialysmaskinen är slående. I båda fallen ligger ventilen och arbetar mellan olika lägen, och detta får som följd att avgasningsnivån ständigt varierar upp och ner. I maskinen är amplituden på nivåsvängningarna ungefär en halv mm, medan den här är knappt hälften så

stor. Detta beror förmodligen på att störningarna är mindre här. Detta får också till följd att endast två ventillägen behöver utnyttjas, medan dialysmaskinen får utnyttja åtminstone 3 lägen, ibland ännu fler. Trots skillnaderna verkar det övergripande beteendet ha fångats i labuppställningen. Trycket regleras i båda fallen bra och avviker aldrig någon längre bit från det önskade trycket på -630 mmHg.

På labbänken är det möjligt att även mäta inflödet, och här kan man tydligt se att det är väldigt ryckigt. I dialysmaskinen arbetar som sagt ventilen ännu mer, och detta innebär förmodligen minst en fördubblad amplitud på flödessvängningarna. Det visar sig att ett lätt sätt att råda bot på detta är att öka trevägsventilens upplösning. Med åttondels steg minskas flödesvariationerna med åtminstone en faktor 5. Det periodiska beteendet försvinner också, då ventilen nu har ett nästan korrekt läge, som bara behöver korrigeras lite då och då.

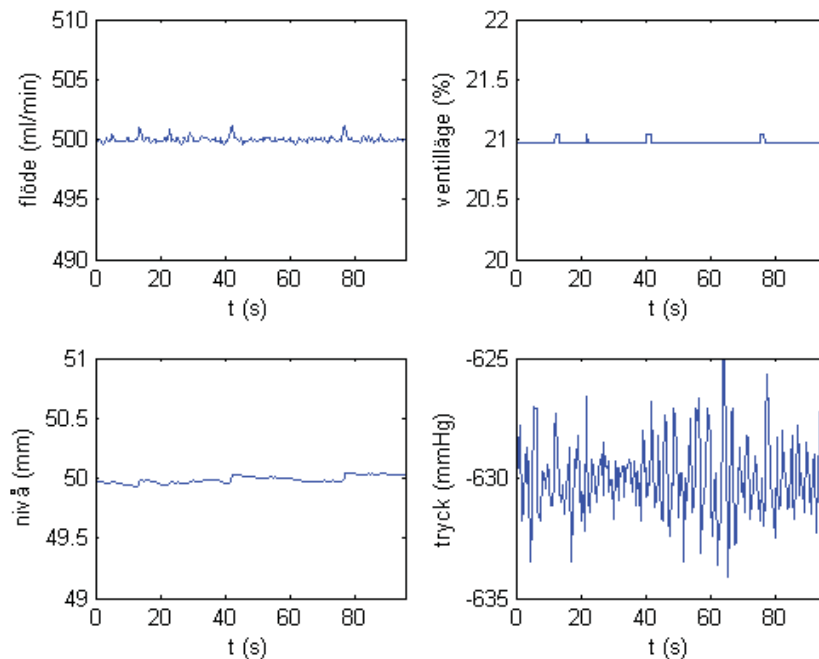


Figur 6.12 Nuvarande reglering av avgasningssystemet, med helsteg. Pumpen styr trycket och ventilen styr nivån, båda med PI-regulatorer. Övre vänstra diagrammet visar inflödet, övre högra ventilläget, nedre vänstra nivån och nedre högra trycket.

Omvänd reglering

Den omvända regleringen bygger på att pumpen reglerar nivån och ventilen trycket. Även denna reglerstrategi kan realiseras med PI-regulatorer, och detta är gjort för helsteg i figur 6.14 och för åttondels steg i figur 6.15. Denna reglerstrategi ger ett lite annorlunda beteende än den föregående. Ventilen får fortfarande ligga och jobba mellan två olika lägen, men den gör det inte längre lika periodiskt som tidigare. För flödet spelar detta dock ingen större roll, då samma problem kvarstår. Nivån varierar lite mer här, men det spelar ingen större roll för systemet som helhet. Tryckets variation är nu något långsammare än tidigare, men varierar ungefär lika mycket.

Övergår man till att köra trevägsventilen med åttondels steg istället förbättras regleringen, men inte lika mycket som vid föregående reglerstrategi. Ventilen får jobba betydligt mer nu, och detta leder till ett ryckigare flöde. Amplituden är dock gans-



Figur 6.13 Nuvarande reglering av avgasningssystemet, med åttondels steg. Pumpen styr trycket och ventilen styr nivån, båda med PI-regulatorer. Övre vänstra diagrammet visar inflödet, övre högra ventilläget, nedre vänstra nivån och nedre högra trycket.

ka liten, och det spelar kanske därför ingen större roll. Både nivå och tryck varierar betydligt långsammare nu, men håller sig inom i stort sett samma intervall.

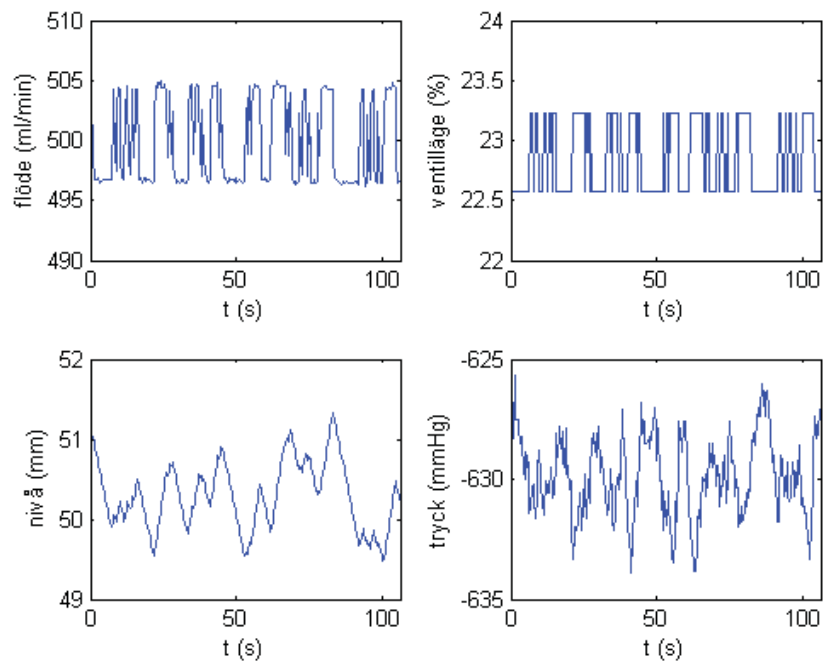
6.7 Flervariabel reglerstrategi

Eftersom systemet är flervariabelt, med två stycken insignaler, ventilläge och pumpspänning, och två stycken utsignaler, nivå och tryck, skulle en reglerstrategi som tog hänsyn till detta kunna vara en bra idé. En möjlighet är då LQ-reglering (linear quadratic control), som är en form av tillståndåterkoppling, där återkopplingsvektorn väljs som lösningen till optimeringsproblemet (6.10) [9]. $x(t)$ betecknar tillstånden i modellen, $u(t)$ styrsignalen och där slutligen Q_1 , Q_{12} och Q_2 betecknar straffmatriser som användaren väljer för att erhålla vissa egenskaper hos regulatorn.

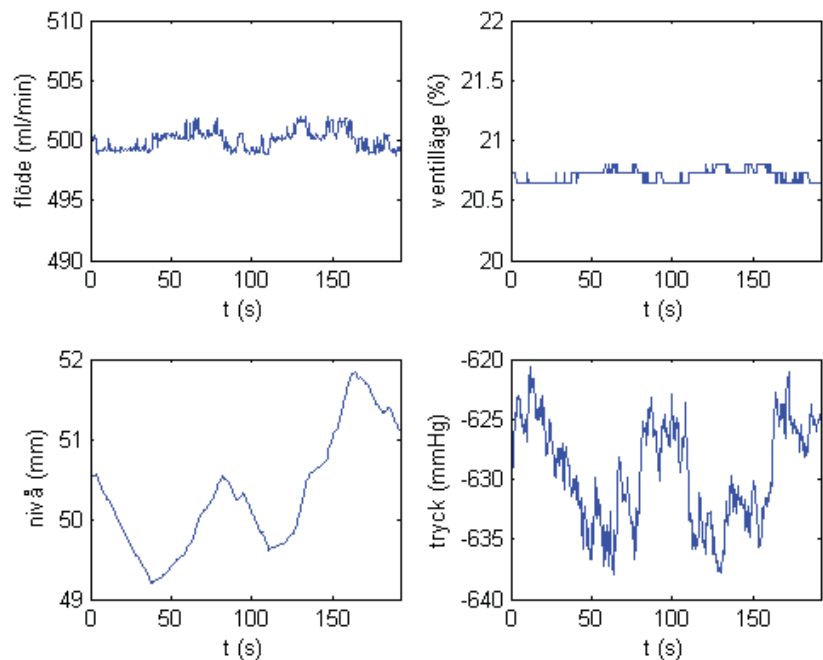
$$\min_u \int x^T(t)Q_1x(t) + 2x^T(t)Q_{12}u(t) + u^T(t)Q_2u(t)dt \quad (6.10)$$

Denna reglerstrategi är väl lämpad för flervariabla system, då den automatiskt använder alla tillgängliga styrsignaler. Genom att utnyttja straffmatriserna kan man dessutom se till att det är kostsamt för regulatorn att utnyttja vissa av styrsignalerna eller att ligga allt för fel med någon utsignal. I det aktuella fallet skulle man alltså vilja att ventilen används så lite som möjligt, för att uppnå ett jämnt flöde uppströms. Övriga straff bör kunna väljas lågt, det gör inte så mycket om trycket och nivån ligger en bit från börvärdet, och om pumpen får arbeta hårt är heller inget som spelar så stor roll.

För att kunna utnyttja LQ-tekniken krävs dock en modell för systemet, och dessutom en observerare för att skatta tillstånden hos modellen, såvida inte samtliga är tillgängliga som mätsignaler. Den optimala observeraren ges av ett Kalmanfilter



Figur 6.14 Omvänd reglering av avgasningssystemet, med helsteg. Pumpen styr nivån och ventilen styr trycket, båda med PI-regulatorer. Övre vänstra diagrammet visar inflödet, övre högra ventilläget, nedre vänstra nivån och nedre högra trycket.



Figur 6.15 Omvänd reglering av avgasningssystemet, med åttiondels steg. Pumpen styr nivån och ventilen styr trycket, båda med PI-regulatorer. Övre vänstra diagrammet visar inflödet, övre högra ventilläget, nedre vänstra nivån och nedre högra trycket.

[12], och att utnyttja ett sådant tillsammans med LQ-teknik brukar kallas för LQG-reglering (linear quadratic gaussian control). En modell kan erhållas genom att excitera systemet på lämpligt sätt och använda systemidentifieringsmetoder.

Systemidentifiering

Målet är att identifiera en modell som är tillräckligt bra för att kunna konstruera en regulator för processen. Enklast tänkbara scenario är om modellen blir linjär, då det underlättar regulatordesignen. Då processen är flervariabel är det också fördelaktigt att syssla med modellen på tillståndsform, då flera in- och ut signaler endast påverkar storleken på B- och C-matriserna. En metod för att göra detta är att använda identifieringsalgoritmer baserade på "subspace"-teknik [13], t.ex. n4sid i Matlabs systemidentifierings-toolbox.

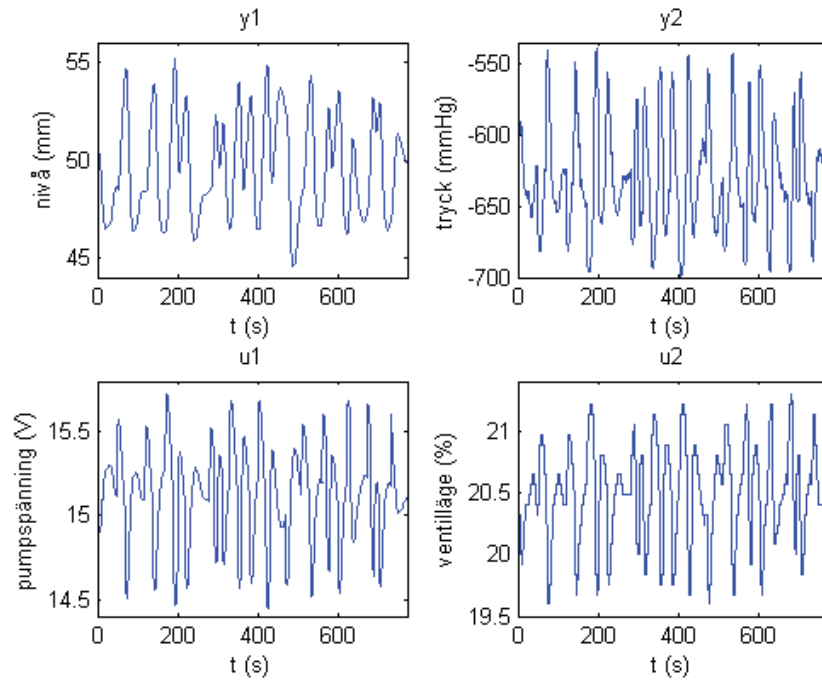
Sedan tidigare experiment är det känt att trevägsventilen är olinjär, men förhoppningsvis ska det vara möjligt att approximera den som linjär kring ett visst läge. Risk finns att fler delar av processen har ett olinjärt beteende, och därför är det bäst att hålla sig nära den tänkta arbetspunkten. För att inte driva iväg från den under identifieringsproceduren görs därför datainsamlandet i slutna loop, dvs. med en regulator inkopplad. Den regulator som används är den omvända regleringen, som tidigare beskrivits, trevägsventilen är inställd på åttondels steg. För att excitera systemet skickas en PRBS-signal som börvärde. Experiment på processen visar att stigtiden vid ett steg är ca. 8 sekunder, vilket gör att en samplingstid på 400 ms kan vara lämplig, och 10 s mellan skiftesregisteruppdateringarna av PRBS-signalen. Flera olika körningar gjordes, där antingen båda eller bara det ena börvärdet var PRBS-signaler.

Data från de olika körningarna undersöktes genom att studera koherensspektrum, som ska ligga nära 1 vid de frekvenser man kan förvänta sig att identifiera en linjär modell. Här visade sig en körning där nivåreferensen valts som en PRBS-signal och tryckreferensen konstant vara den bästa och dessa data användes i den fortsatta identifieringen, se figur 6.16. Dataserien delades in i två stycken delar, identifierings- och valideringsdel. Konstant detrendning gjordes, dvs. data justerades så att medelvärdet blev 0.

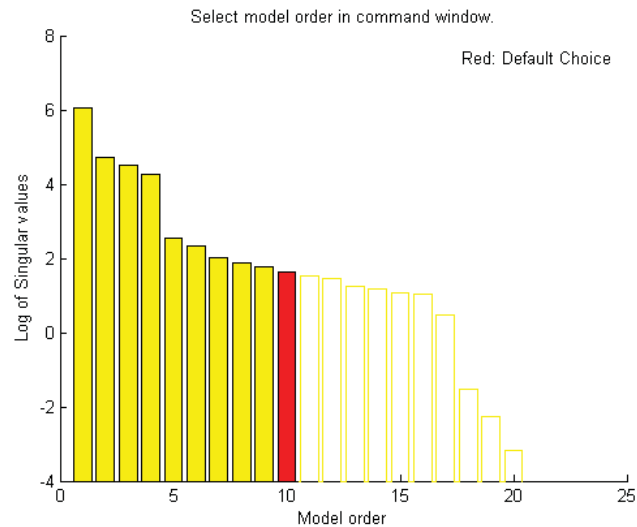
Som tidigare nämnts användes n4sid i Matlab för att utföra själva identifieringen, och ordningen på modellen valdes genom att studera de singulära värdena för Hankelmatiserna från impulsvaret, ordningen ska väljas så att de singulära värdena för högre ordningar är liten i jämförelse. I figur 6.17 visas logaritmen av dem, och här ser man att det är en god idé att välja en fjärde ordningens modell. För högre ordningar är det förmodligen mycket brus som modelleras. Korsvalidering av en fjärde ordningens tillståndsmodell visas i figur 6.18, och som figuren visar är resultatet mycket gott. Studeras korrelationsfunktionen för residualerna visar det sig att det finns viss korrelation, men den är så liten att det inte ska vara något större problem. Korskorrelationen mellan insignal och residualer uppvisar dock ingen korrelation. Den identifierade modellen ansågs därmed tillräcklig, och den redovisas i appendix A.1.

LQ-design - Val av straffmatriser

Straffmatriserna, eller kostnadsmatriserna, i optimeringsuttrycket (6.10) måste väljas på ett lämpligt sätt. Straffet för styrsignalen, Q_2 , väljes lämpligen diagonal, där respektive term på diagonalen motsvarar straffet för respektive styrsignal. För tillstånden är det lite klurigare. Har tillstånden fysikaliska tolkningar kan man välja Q_1 diagonal, där respektive diagonalelement innebär straff på motsvarande tillstånd. Saknas fysikaliska tolkningar kan man utgå från tillståndsbeskrivningen (6.11) och satsa på att straffa utsignalerna enligt (6.12) och approximationen (6.13) av deras



Figur 6.16 De använda identifieringsdata.

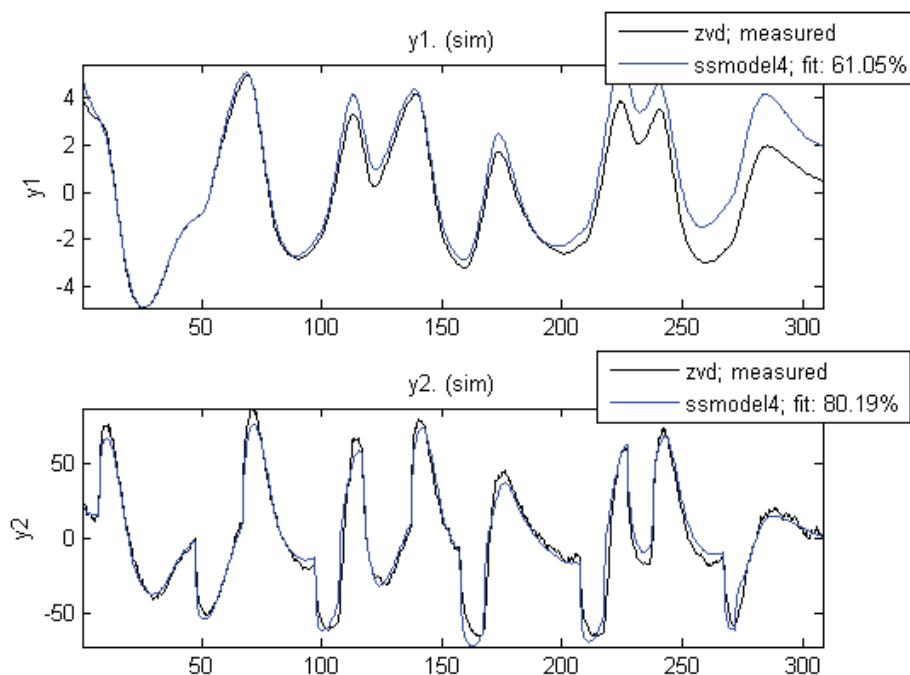


Figur 6.17 Modellordningsbestämning för tillståndsmodellen. Efter fjärde ordningens modell sker ett hopp, och från femte ordningens modell och uppåt kan dynamiken anses dominerats av brus.

derivator enligt (6.14) och (6.15), T_s är samplingstiden. Den beskrivna metoden ger bidrag även till Q_{12} och Q_2 , och de slutliga straffmatriserna ges enligt (6.16).

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6.11)$$

$$y^T Q_y y = [y = Cx] = x^T C^T Q_y C x \Rightarrow Q_1^y = C^T Q_y C \quad (6.12)$$



Figur 6.18 Korsvalidering av den identifierade modellen. Nivå (y_1) och tryck (y_2) har simulerats genom att använda de givna insignalerna och resultat jämförs med uppmätta data.

$$\dot{y} \approx \frac{y(t+1) - y(t)}{T_s} = \frac{1}{T_s} (C(Ax + Bu) - Cx) = \frac{1}{T_s} (C(A - I)x + CBu) \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}^T Q_y \dot{y} &= \frac{1}{T_s^2} (x^T (A - I)^T C^T + u^T B^T C^T) Q_y (C(A - I)x + CBu) \\ &= \frac{1}{T_s^2} (x^T (A - I)^T C^T Q_y C(A - I)x + x^T (A - I)^T C^T Q_y CBu + \\ &\quad u^T B^T C^T Q_y C(A - I)x + u^T B^T C^T Q_y CBu) \\ &= \frac{1}{T_s^2} (x^T (A - I)^T C^T Q_y C(A - I)x + 2x^T (A - I)^T C^T Q_y CBu + u^T B^T C^T Q_y CBu) \\ &= x^T Q_1^y x + 2x^T Q_{12}^y u + u^T Q_2^y u \end{aligned} \quad (6.14)$$

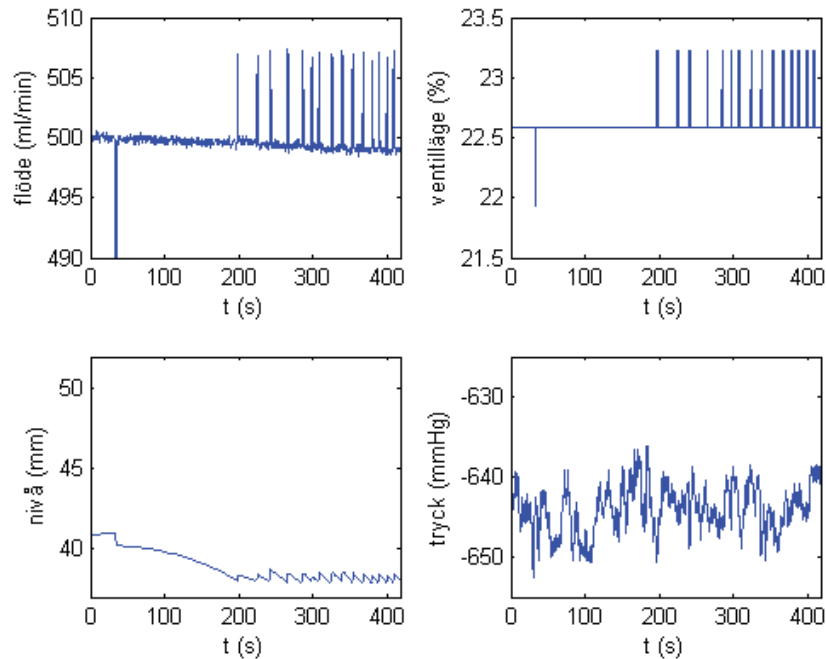
$$\Rightarrow \begin{cases} Q_1^y = \frac{1}{T_s^2} x^T (A - I)^T C^T Q_y C(A - I) \\ Q_{12}^y = \frac{1}{T_s^2} (A - I)^T C^T Q_y CB \\ Q_2^y = \frac{1}{T_s^2} B^T C^T Q_y CB \end{cases} \quad (6.15)$$

$$\begin{cases} Q_1 = Q_1^y + Q_1^u \\ Q_{12} = Q_{12}^y \\ Q_2 = Q_2^u + Q_2^y \end{cases} \quad (6.16)$$

Designparametrarna har nu reducerats betydligt, men fortfarande krävs det en del fingertoppskänsla och en del experimenterande innan det blir bra.

LQG-design för labsystemet

Designen kan delas upp i två stycken olika delar, för det första ska ett Kalmanfilter konstrueras för att rekonstruera tillstånden och för det andra ska en LQ-regulator designas. Den första delen erhålls gratis vid identifieringen, då just Kalmanfilterförstärkningen ges för att motsvara den identifierade brusmodellen. För regulatordesignen visar det sig att det som behöver straffas är tryckderivatan och felet i nivån för att erhålla en stabil reglering. Utöver detta har användandet av trevägsventilen straffats hårt. För att regleringen ska bli bra då upplösningen på trevägsventilen ändras får storlekarna på straffen modifieras lite, men de är i princip likadana.

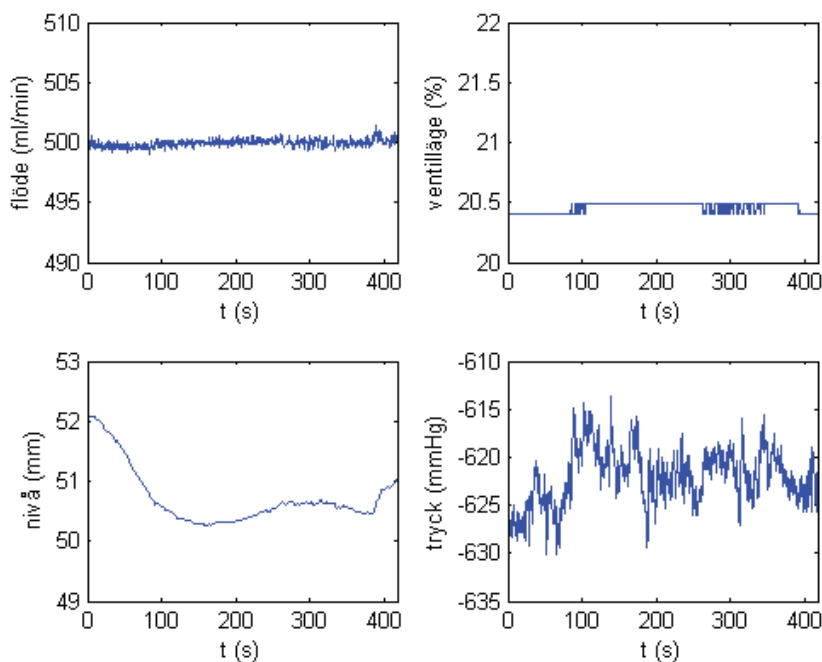


Figur 6.19 LQG-reglering med trevägsventilen inställd på helsteg.

I figur 6.19 visas resultatet av körning med LQG-regulatorn med trevägsventilen inställd på helsteg. Det mest iögonfallande är nog det stora reglerfelet, men det kan förklaras med att regulatorn saknar integralverkan. I övrigt hålls både tryck och nivå inom rimliga gränser. För nivåregleringen kan man tydligt se effekter av den grova kvantiseringen mot slutet av körningen. När nivån kommer under ca. 38 mm blir reglerfelet tillräckligt stort för att regulatorn ska ge tillräcklig styrsignal för att ändra ventilutslaget, men så fort nivån går över 38 mm igen sjunker styrsignalen och ventilen ändrar tillbaka till det föregående läget, och så fortsätter det. Detta beteende avspeglas tydligt i inflödet, som blir väldigt ryckigt mot slutet.

Ökar upplösningen på ventilen ger regulatorn ett resultat enligt figur 6.20. Det stationära felet har nu minskat, och framförallt utseendet på flödet har förbättrats betydligt. Kvantiseringsproblemen kvarstår dock fortfarande, som man tydligt kan se att ventilen råkar in i i två omgångar. Då ändring av ventilläget ett åttondels steg bara ger en obetydlig ändring av flödet ser det inte längre ut att vara ett lika stort problem.

Slutligen kan man göra en jämförelse med de tidigare testade reglerstrategierna. Då trevägsventilen är inställd på helsteg visar LQG-regulatorn inledningsvis upp ett bättre beteende, men då reglerfelet blir för stort hamnar den i samma problem som de tidigare testade regulatorerna, dvs. att ventilen får jobba mellan två olika lägen och



Figur 6.20 LQG-reglering med trevägsventilen inställd på åttondels steg.

resultatet blir ett ryckigt inflöde. Tryckregleringen fungerar ungefär lika bra, med skillnaden att LQG-regulatorn tillåter ett stationärt fel. Integralverkan är dock något som kan införas om det skulle visa sig vara behövt. Ökas ventilupplösningen till åttondels steg erhålls ett liknande resultat som för den nuvarande regleringen, åtminstone om flödet studeras, se figur 6.13. Ventilen får dock jobba betydligt mer nu, vilket inte är särskilt önskvärt.

Frågan är nu om det flervariabla angreppssättet gav ett förbättrat resultat eller inte. Och studeras endast figurerna ovan kan det vara svårt att med blotta ögat besvara den frågan. Syftet var att försöka utnyttja kopplingarna inom systemet och på så sätt undvika att använda ventilen i största möjliga mån. Detta har visat sig vara svårt, med tanke på att ventilen har fått rycka in så fort reglerfelet i nivån blivit stort. Eftersom det inte går att märka någon synlig förbättring mot tidigare reglering är det nog bättre att satsa på en enklare särkopplad reglerstrategi.

6.8 Särkopplad reglering

Den identifierade flervariabla modellen kan användas för att peka på vilken insignal som ska kopplas ihop med vilken utsignal, detta genom att titta på RGA (Relative Gain Array) [9]. Denna definieras enligt (6.17), där G anger en överföringsmatris, $*$ betyder elementvis multiplikation och † betecknar pseudoinvers.

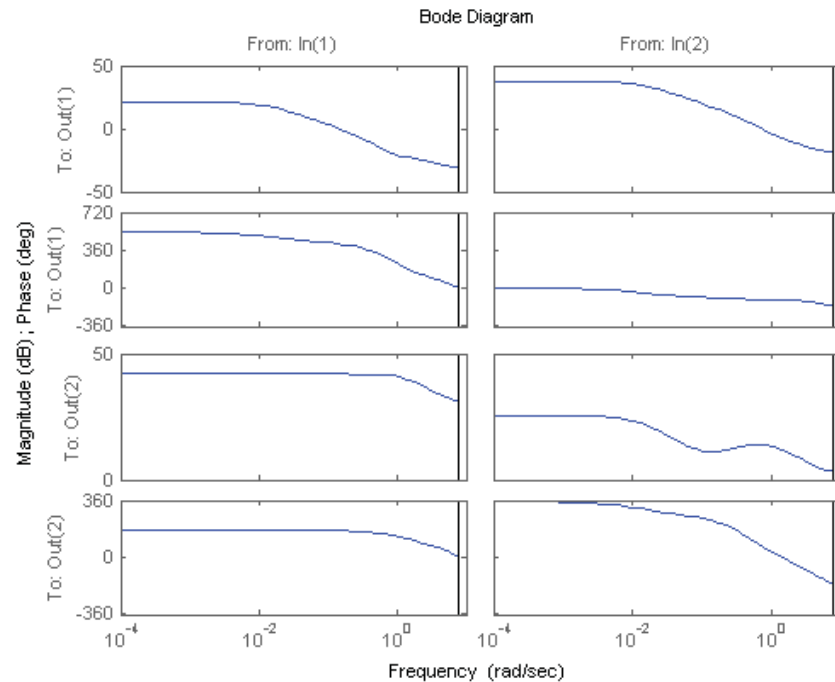
$$RGA(G) = G .* (G^\dagger)^T \quad (6.17)$$

I reglertekniska sammanhang är tolkningen att elementen i RGA anger kopplingen mellan in- och utsignaler, där ett värde nära 1 anger stor koppling och ett värde nära 0 anger liten koppling. Lämpligt är att räkna ut RGA i stationäritet och vid skärfre-

kvensen, om man studerar systemets bodediagram, se figur 6.21, ser man att den är ungefär 0.5 rad/s. RGA vid de båda frekvenserna ges i (6.18) och (6.19).

$$RGA(G(0)) = \begin{bmatrix} -0.0267 & 1.0267 \\ 1.0267 & -0.0267 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

$$RGA(G(0.5i)) = \begin{bmatrix} -0.0119 - 0.0122i & 1.0119 + 0.0122i \\ 1.0119 + 0.0122i & -0.0119 - 0.0122i \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

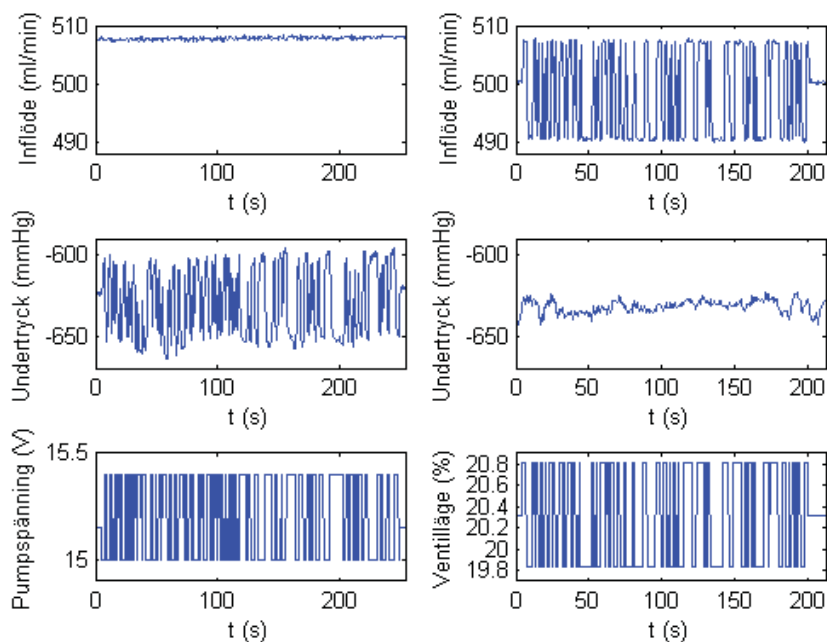


Figur 6.21 Den identifierade modellens bodediagram. In(1) är ventilläget, In(2) är pumpspänningen, Out(1) är trycket och Out(2) är nivån.

Vid båda frekvenserna ser man tydligt att man bör koppla ihop utsignal 1 med insignal 2 och utsignal 2 med insignal 1, vilket precis motsvarar den nuvarande regleringen. Detta är ganska intuitivt om man tänker på det utförda experimentet där flödet genom strypventilen undersöktes för olika undertryck, som visade att flödet blev i princip konstant för stora tryck. Detta motsvarar att pumpen i detta arbetsläge inte kan påverka nivån. Att ventilen inte påverkar trycket är inte visat med något experiment, men om läget inte ändras alltför mycket borde heller inte ventilens strypegenskaper förändras särskilt mycket. En fråga man nu kan ställa sig är varför den omvända regleringen fungerar, och förklaringen ligger i att regulatorer är inkopplade. Då ventilen vill ändra trycket ändras flödet och därmed nivån. Regulatorn för pumpen ser detta som en störning och försöker kompensera genom att öka pumpspänningen. Detta hjälper inte utan den enda effekten blir att undertrycket stiger, och då detta händer kompenserar ventilen genom att ändra flödet igen för att inte ändra trycket för mycket. Det omvända fungerar på samma sätt, och det ger en omständlig reglerstrategi.

Den nuvarande regleringen baseras på PI-regulatorer, vilket oftast ger en bra och tillräcklig reglering. Det brukar dock gå att förbättra genom att övergå till en mer modellbaserad strategi. Modellerna skulle kunna tas direkt från den tidigare identifierade

flervariabla modellen, men förmodligen erhålls ett bättre resultat om identifieringsproceduren utförs på nytt för respektive in- och utsignalpar.



Figur 6.22 Data för den särkopplade identifieringen. Till vänster visas då pumpspänningen är en PRBS-signal och ventilen hålls still och till höger visas det omvända. Lägg märke till hur lite flödet påverkas av pumpspänningen respektive trycket av ventilläget.

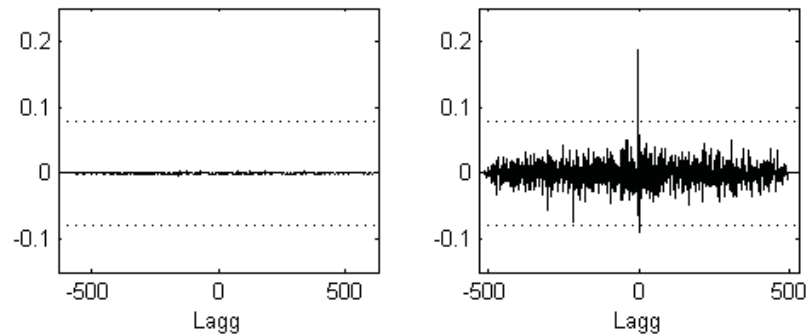
Identifiering av SISO¹-modeller

För att erhålla så bra identifieringsdata som möjligt gjordes nya körningar. För att undvika att koppla in regulatorer, dvs. slippa göra identifieringen i slutna loop, identifierades överföringsfunktionen till inflödet istället för nivån, och för att sedan erhålla rätt överföringsfunktion läggs en integrator till i överföringsfunktionen. Denna modifiering gjorde att ett stabilt läge med ungefärligt tryck och flöde kunde hittas, nivån driftade dock i detta läge till följd av att flödet inte var helt korrekt. Här applicerades sedan en PRBS-signal på pumpspänningen och ventilläget, dock ej samtidigt. Den använda datan visas i figur 6.22.

Med blotta ögat går det inte att se någon korrelation mellan pumpspänning och flöde respektive ventilläge och tryck, och detta är precis vad RGA-matriserna tidigare förutspådde. För att kontrollera detta resultat direkt i identifieringsdatan kan man undersöka korskorrelationen, och bäst resultat erhålls om en filtrering som överför den ena dataserien till vitt brus först genomförs, enligt [16]. I figur 6.23 visas de beräknade korskorrelationerna, och resultatet är det förväntade. Att pumpen mättar har tidigare resultat visat, men kring ventilens påverkan på trycket har det inte varit lika klart. Korskorrelationen visar dock att sambandet är minimalt, kanske inte ens signifikant om man betänker det utritade konfidensintervallet på 95 %. Den lilla korrelation, om den nu finns, ska dock förhoppningsvis inte innebära några problem.

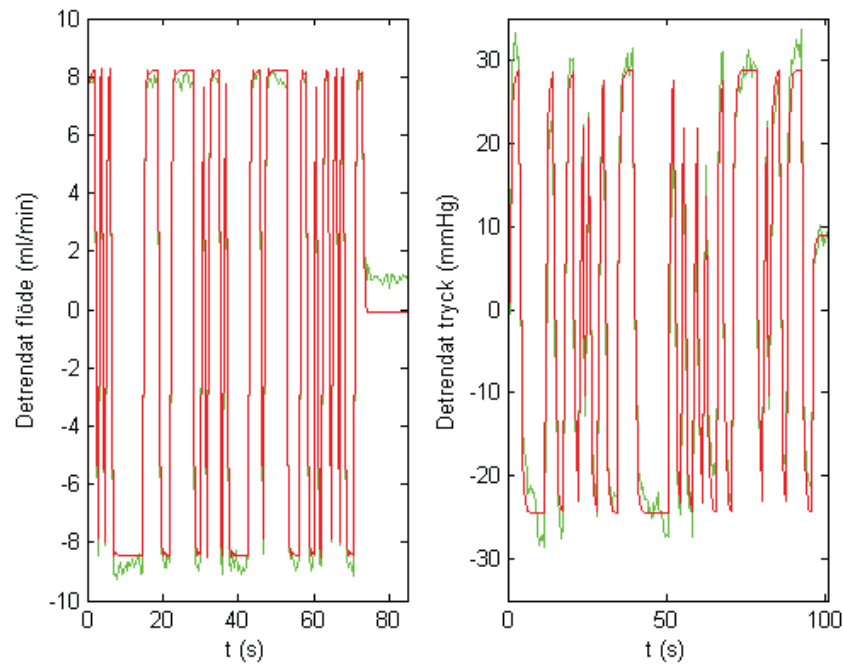
Den fortsatta identifieringen gav sedan att båda överföringsfunktionerna beskrevs väl av ARMAX-modeller, flödesmodellen fick gradtalet 3 och tryckmodellen gradtalet 2. Korsvalideringen gav riktigt bra passning, se figur 6.24. Residualerna var dock

¹SISO = Single Input Single Output - En insignal och en utsignal



Figur 6.23 Till vänster visas korskorrelationen för pumpspänning och flöde och till höger visas korskorrelationen för ventilläge och tryck. I båda fallen har ”förvitande” filtrering utförts. De streckade linjerna visar ett konfidensintervall på 95 %.

inte helt vita, men med tanke på resultaten i korsvalideringen ansågs de tillräckligt bra.



Figur 6.24 Korsvalidering av de identifierade modellerna. Det gröna motsvarar uppmätt data och det röda simulerat med de identifierade modellerna. Simuleringen till vänster ger 91.9 % anpassning, ventil till flöde, och den till höger 87.4 % anpassning, pump till tryck.

Modellen för flödet var dock bara ett mellansteg, och för att överföra den till en modell för nivån utökades den med en integrator. För att skalningen skulle bli rätt multiplicerades också med en konstant, samma som används vid simuleringen av nivån. Att identifiera modellen för nivån på det här sättet är förmodligen inte särskilt rättvisande för hur det kommer att gå i maskinen, men det borde dock ge en anvisning om hur bra modellen kan bli då bättre förhållanden än så här knappast går att åstadkomma. I dialysmaskinen finns det ingen flödesmätning tillgänglig, vilket kommer att försvåra identifieringsarbetet. Men om man gör antagandet om att systemen är

likvärdiga, så att modellstrukturen är likadan, skulle man kunna utföra en s.k. grey-box-identifiering, där vissa av modellparametrarna är kända. De båda identifierade modellerna redovisas i appendix A.1.

Regulatordesign

Precis som i det flervariabla fallet valdes en regulatordesign baserad på LQ-teknik. Här tillkommer dock komplikationen med att designa ett lämpligt Kalmanfilter, då det inte medföljt gratis i identifieringsprocessen. Detta görs genom att överföra modellerna på tillståndsform, anta att varje tillstånd och varje mätsignal påverkas av en brus term och sedan ange brusets kovarians. Med denna information känd finns det sedan algoritmer för att beräkna Kalmanfilterförstärkningen. I det här fallet visade det sig fungera bra med något mer mätbrus än processbrus (brus termerna på tillstånden).

Straffmatriserna för LQ-regleringen valdes på samma sätt som tidigare. För tryckregleringen har det fungerat bra med att använda ett stort styrsignalstraff, ett något mindre derivatastraff och minst straff på själva reglerfelet. Nivåregleringens straffmatriser valdes så att derivatan inte straffades alls, utan stort straff lades på styrsignalen och ett litet straff på reglerfelet.

Integralverkan

För att regulatorerna skulle få integralverkan antogs att styrsignalerna påverkades av en konstant störning, med konstant menas här långsamt varierande. Detta ger en tillståndsbeskrivning enligt (6.20) och om störningen antas vara ett extra tillstånd ges det utökade systemet av (6.21). Detta system är observerbart och störningen kan därmed skattas, och genom att kompensera styrsignalen för den skattade störningen kan den elimineras helt. Det som händer är att regulatorn får integralverkan.

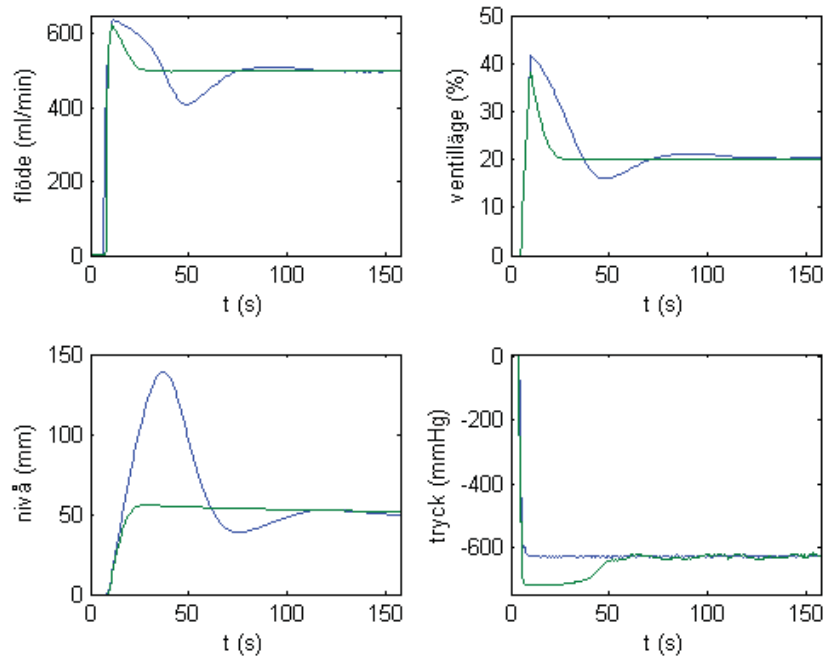
$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B(u(k) + d(k)) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (6.20)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \\ y(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6.21)$$

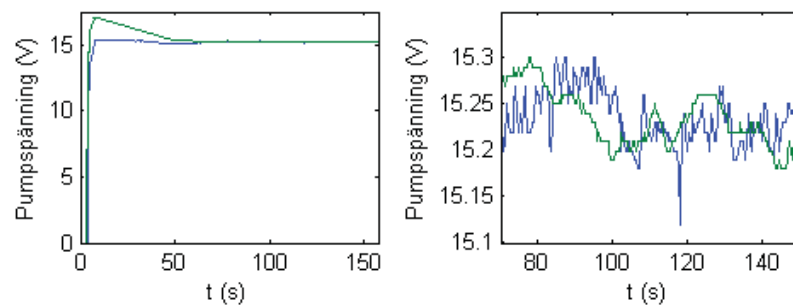
Detta sätt att implementera integralverkan visade sig fungera för bägge regulatorerna, själva skattningen av störningen fick dock skötas olika. Störningen för nivån kunde skattas med samma brusnivå som för de övriga tillstånden, för trycket var man dock tvungen att låta brusnivån vara väldigt låg, då det annars ledde till en skattning som ändrade sig alltför snabbt och ledde till att hela regulatorn blev instabil. Modellen säger ju dock att störningen ska vara konstant, och det skulle motsvara brusvariansen 0, att sätta den väldigt lågt är därmed inte orimligt.

Testkörningar

Vid reglering kring det önskade arbetsläget är inte skillnaden mellan LQG-regulatorerna och de tidigare testade PI-regulatorerna särskilt stor. Studeras däremot hur regulatorerna tar processvariablerna till arbetsläget upptäcker man stora skillnader, se figur 6.25. För nivåregleringen är LQG-regulatorn överlägsen, den har nått en stabil nivå i närheten av börvärdet över minuten före PI-regulatorn. För tryckregleringen är förhållandet det omvända, här bör man dock också studera hur pumpspänningen varierat, se figur 6.26. Det högra diagrammet visar tydligt att LQG-regulatorn är betydligt försiktigare i sin reglering, detta kan vara önskvärt för att erhålla ett så stabilt



Figur 6.25 Jämförelse av LQG-regulatorer (gröna) och PI-regulatorer (blåa) vid uppstart av systemet.



Figur 6.26 Jämförelse av pumpspänningen för PI- (blå) och LQG-regulatorn (grön) för trycket. Det vänstra diagrammet visar pumpspänningen för förloppet i figur 6.25, det högra visar ett utdrag ur det vänstra.

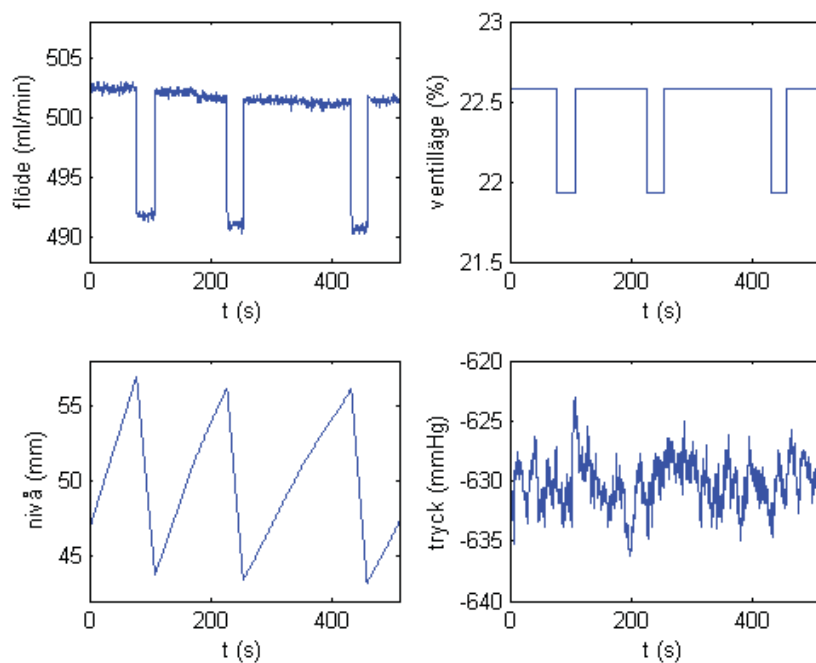
flöde som möjligt. Å andra sidan kan förmodligen PI-regulatorns parametrar ställas in så att en liknande reglering erhålls, och vice versa gäller antagligen också. För tryckregleringen verkar det alltså inte finnas något att vinna med att övergå till LQG-reglering. För nivåregleringen vore det önskvärt om nivåreferensen ändrades stup i kvarten, men så är inte fallet under en dialysbehandlig och därför vinner man ingenting med att gå över till LQG-reglering här heller. Vinsten med att behålla PI-reglering är att den är betydligt enklare att implementera och det är enklare att justera regulatorparametrarna.

Dödzon för nivåreferensen

Ett sätt att minska användningen av trevägsventilen är att införa en dödzon för nivåreferensen, dvs. tillåta att nivån är rätt i ett intervall. För att se till att inflödet inte varierar för mycket kan man även lägga till ett krav på att nivåderivatan ska vara låg.

Förhoppningen med detta är att ventilen ska hitta ett läge som nästan ger rätt flöde, det lilla fel som kvarstår leder till en konstant nivåderivata. Inne i dödزونen tillåts inte styrsignalen att ändras, men så fort den kommer utanför får regulatören lov att göra någonting åt det nu stora reglerfelet. Tanken är då att den bara ska ändra ventilen ett steg, så att flödet nu blir lite fel åt andra hållet och nivån får nu sakta passera dödزونen igen.

Denna strategi har nästan visat sig fungera rakt av, endast smärre modifieringar har fått göras. Det visar sig nämligen att regulatören ogillar det stora reglerfelet som uppstått och den är därför något för aggressiv då den kompenserar för detta, dvs. den ändrar mer än ett ventilsteg. Denna brist har lösts genom att införa en räknare som räknar upp för varje gång regulatören inte får ändra styrsignalen, dvs. när nivån är inne i dödزونen. Om värdet på räknaren är stort anses regulatören ha nått sitt stationära läge, och då begränsas ändringshastigheten av styrsignalen, och regulatören hinner därmed inte att ändra ventilen så mycket. En annan brist är att om regulatören hamnar i ett ventilläge som leder till att nivåderivatan blir större än det använda tröskelvärdet får den lov att styra fritt även inne i dödزونen. Ibland händer det då att den vill snabba upp resan till referensnivån, och detta fenomen har förhindrats genom att lägga in ett förbud att öka hastigheten mot referensen om den redan är på väg dit.



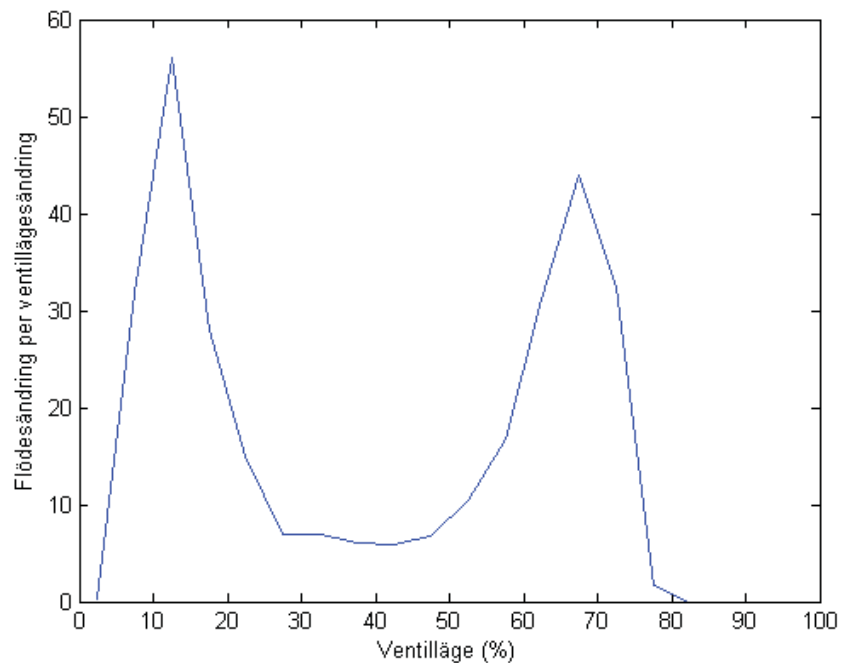
Figur 6.27 Resultat av den nya hanteringen av referensvärdet. Trevägsventilen är inställd på helsteg.

I figur 6.27 visas resultatet av en körning med den ovan beskrivna regulatören, med trevägsventilen inställd på helsteg. Den använda dödزونen har placerats mellan 44 och 56 mm, begränsningen på nivåderivatan har satts till max 0.15 mm/sampel. Ventilläget har ändrats 6 gånger på ca. 8 minuter, vilket måste anses vara mycket bra, förbättring kan endast ske om dödزونen utökas (under förutsättning att ingen ändring i hårdvaran får göras). Jämfört med de tidigare testade regulatorerna är det här en klar förbättring. Frågan man kan ställa sig är hur pass bra det skulle gå i dialysmaskinen, där störningsläget förmodligen är helt annorlunda. Genom lågpassfiltrering av derivatan ska det nog ändå gå att åstadkomma liknande resultat även där.

Tryckregleringen fungerar lika bra som för de tidigare testade regulatorerna, och det finns inget att klaga på hos den.

6.9 Test av andra strypventiler i det avgasningsliknande systemet

Olika strypventiler ger olika arbetslägen åt pumpen och trevägsventilen. Var någonsans pumpen arbetar spelar inte så stor roll för regleringen, men för ventilen är betydelsen större. Experimentet med ventilen, då flödet genom den för olika lägen undersöktes, visar att ventilen inte är linjär, se figur 6.1. Genom att undersöka flödesändring per ventillägesändring, dvs. derivatan av flödet, kan man få en uppfattning om i vilket ventilläge man skulle vilja vara i. Denna derivata är numeriskt beräknad i figur 6.28. Denna visar klart att det är fördelaktigast att ligga kring 40 % för ventilen.



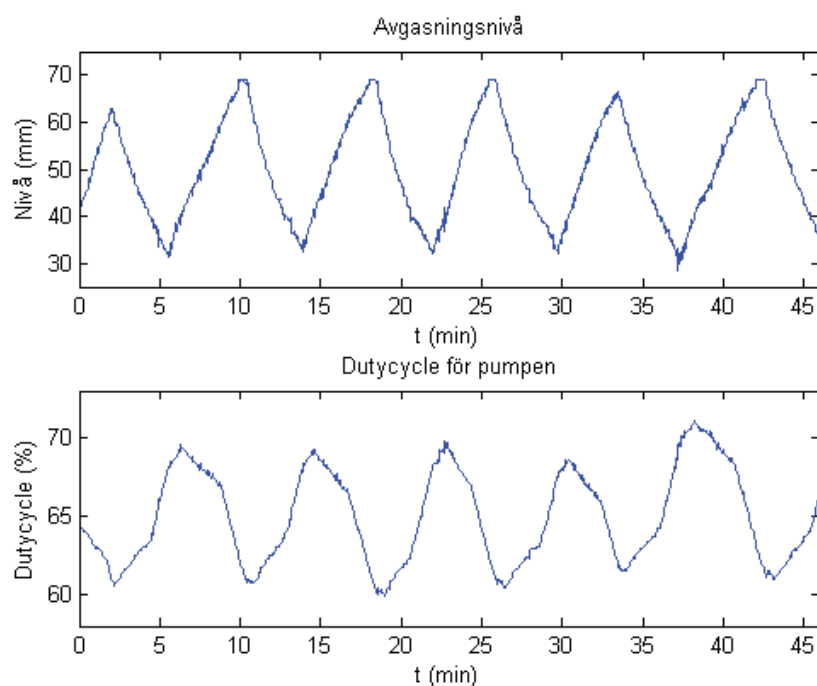
Figur 6.28 Flödesändringen per ventillägesändring. Önskvärt vore om ventilen fick arbeta i "dalen" kring 40 %.

Den nuvarande strypventilen arbetar kring 22 %, och som figur 6.28 visar är detta inget optimalt läge. Av de andra testade strypventilerna hamnar den andra vid 58 %, den tredje vid 33% och den fjärde ungefär likadant som den nuvarande. Figuren säger att den tredje borde vara bäst, och detta bekräftas också då tester gjorts på labuppställningen. Körs ventilen med åttondelsteg är varje stegändring så liten att det knappt går att urskilja som en ändring av flödet, störningar och mätbrus dominerar.

7. Arbete mot dialysmaskinen

7.1 Manuell reglering

Precis som för systemet på labbänken är det möjligt att manuellt styra systemet. På samma sätt som tidigare får dock en PI-regulator styra nivån med pumpen, och det är alltså endast ventilen som styrs manuellt. Detta försök uppvisar samma egenskaper som labbänkssystemet. Det finns en brytpunkt då pumpen inte längre kan leverera mer flöde, vilket yttrar sig i att pumpspänningen växer linjärt (p.g.a. att integraldelen i regulatorn växer), nivån sjunker med en konstant hastighet (utflödet är större än inflödet, då flödet vidare i maskinen är konstant 500 ml/min och ventilen inte ändrar sig kan man dra slutsatsen att inflödet till kammaren, dvs. det flöde pumpen levererar, är konstant) och undertrycket blir större (p.g.a. att pumpen arbetar mer och mer). Precis som tidigare undersökningar har visat går det att reglera undertrycket till det önskade, priset blir att ventilen får ligga och arbeta mellan två lägen. Detta resulterar i problemet med det ryckiga flödet.

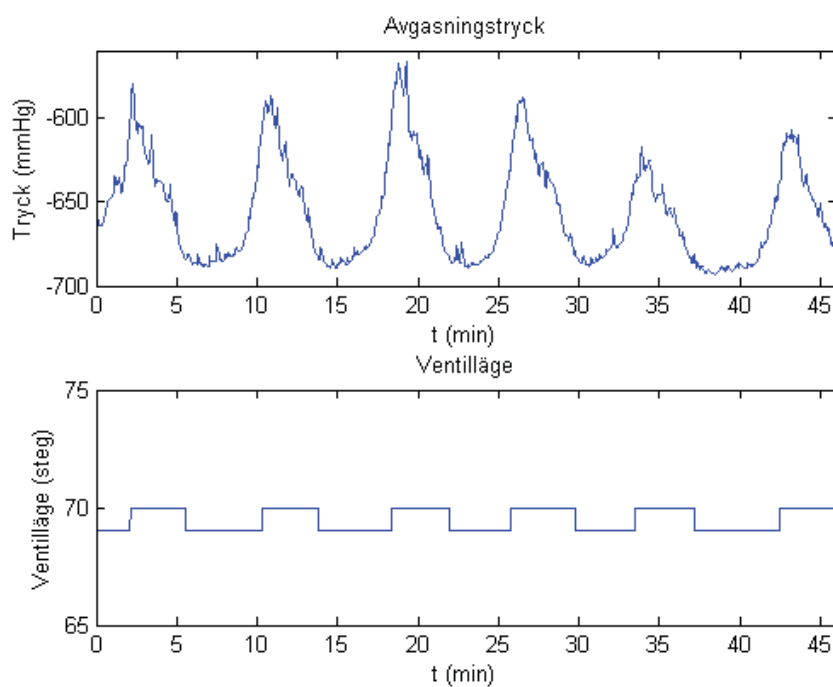


Figur 7.1 Avgasningsnivå och pumpspänning då pumpen med en PI-regulator styrt nivån och ventilen manövrerats manuellt.

Då systemet inte är beroende av att nivån och trycket är stabila och håller sig till börvärdet finns det möjligheter att minska användandet av ventillägesändringar. Nivån kan tillåtas variera egentligen hur mycket som helst, bara utflödet kan hållas konstant, vilket styrs med en pump och en flödesmätare nedströms. En alltför snabbt skiftande nivå innebär dock med största sannolikhet ett snabbt skiftande flöde uppströms, vilket bör undvikas och därför kan bara långsamma skiftningar tolereras. Avseende faktiska nivåer kan en undre gräns sägas vara 30 mm och en övre gräns 65

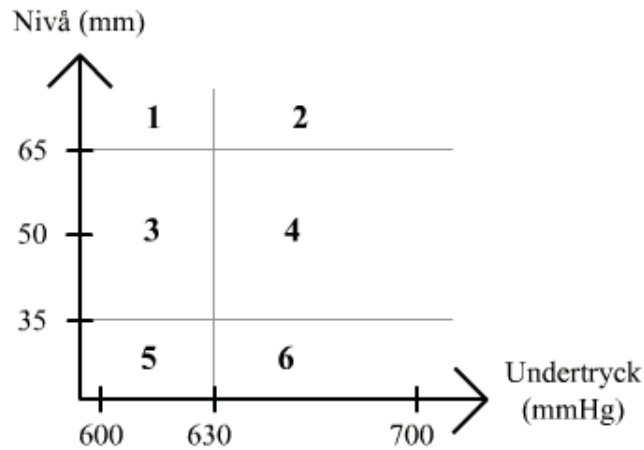
mm. Trycket kan tillåtas variera lite friare, bara undertrycket är tillräckligt stort. Nominellt undertryck ligger på 630 mmHg, men det räcker om det är 610 mmHg (eller kanske t.o.m. ner mot 600 mmHg) för att avgasningen ska fungera tillfredsställande.

Med ovanstående i åtanke kan därför en reglerstrategi som tillåter variationer i både tryck och nivå testas. Nivån styrs av en PI-regulator med pumpen och ventilen manövreras manuellt för att hålla önskat undertryck, även nivån visar sig behöver styras med ventilen i vissa lägen. Resultatet blir ett system där nivån sakta varierar mellan 30 och 65 mm, och gör detta med en i det närmaste konstant hastighet. Då nivån alltså styrs av pumpen saknas i vissa lägen möjlighet att öka flödet, och då leder försök till att öka flödet endast till att undertrycket stiger. Detta gör att när nivån sjunker blir undertrycket väldigt stort, och för att avgöra när det är dags att ändra ventilen kan man därför använda ett övre tröskelvärde för trycket. Förmodligen är det dock smartare att ändra ventilen när nivån nått ett undre tröskelvärde. När å andra sidan nivån stiger kommer pumpen att reagera genom att sänka pumpspänningen, och detta leder till att trycket sjunker. När trycket har blivit för lågt måste därför ventilen ändras. Då börjar nivån att sjunka och pumpen måste svara med att öka spänningen och trycket stiger igen.



Figur 7.2 Avgasningstryck och ventilläge då pumpen med en PI-regulator styrt nivån och ventilen manövrerats manuellt.

Den föreslagna reglerstrategin har manuellt testats, och den leder till ett resultat enligt figur 7.1 och 7.2. Ventilläget behöver endast ändras ungefär var fjärde minut, vilket är en enorm förbättring jämfört med den nuvarande regleringen. Testkörningen som visas i figurerna har dock brister, som t.ex. att ventilen vid några tillfällen ändras lite försent, vilket yttrar sig i att undertrycket hinner sjunka under 600 mmHg. Att trycket tillåts sjunka så lågt är beroende på nivåregleringen, då ventilen ändras är nivån väldigt hög och pumpen försöker därför minska flödet genom att sänka pumpspänningen. Detta gör att trycket sjunker, men flödet förblir oförändrat. Denna brist vid omvänd reglering är något som bör tas hänsyn till, för att undvika att tryck och nivå lämnar sina tillåtna intervall.



Figur 7.3 Uppdelning av utsignalrummet för användning av olika reglerstrategier.

Område	Reglerstrategi
1	Ändra ventil. Styr tryck med pump.
2	Ändra ventil. Styr nivå med pump.
3	Håll ventil still. Styr tryck med pump.
4	Håll ventil still. Styr nivå med pump.
5	Ändra ventil. Styr tryck med pump.
6	Ändra ventil. Styr nivå med pump.

Tabell 7.1 Förslag till reglerstrategi för de olika områdena definierade i figur 7.3.

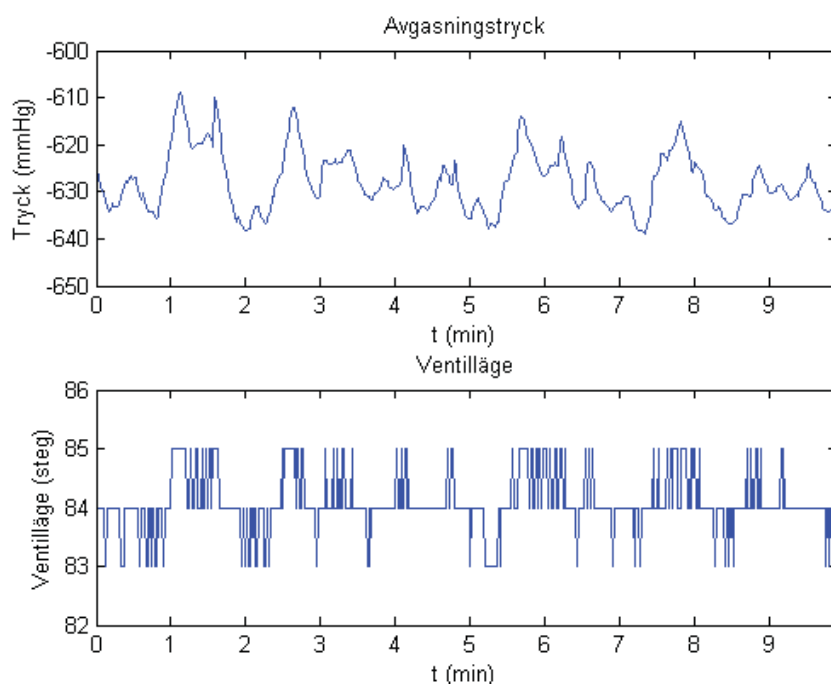
Ett sätt göra detta är att använda olika regulatorstrategier då systemet befinner sig i olika tillstånd. Systemets tillstånd kan definieras av dess undertryck och nivå, och en tänkbar uppdelning av tillståndsrummet ges i figur 7.3. I tabell 7.1 föreslås sedan en lämplig reglerstrategi för respektive område. Denna reglerstrategi påminner väldigt mycket om explicit MPC-reglering, och ännu bättre resultat skulle förmodligen kunna erhållas om denna metod används fullt ut, jämfört med att testa sig fram till lämpliga områden och regulatorer.

Optimalt vore att slippa behöva använda ventilen överhuvudtaget, och bara reglera systemet med pumpen. På labsystemet visade det sig att detta inte var möjligt, då inget samband mellan pumpsignal och nivå existerade för stora undertryck. För dialysmaskinen visar det sig dock vara lite annorlunda. Pumpspänningen går att ställa in på ett konstant läge för att erhålla önskat undertryck, och för ventilen går det att hitta två lägen som kan användas för att reglera nivån. I det ena läget stiger nivån och i det andra sjunker den. I det senare läget går det inte att med pumpen påverka nivån, då den inte kan öka flödet, men i det förstnämnda går det att sänka flödet, dock till priset av att undertrycket sjunker. Det går dock att styra pumpspänningen så att nivån stiger så långsamt som möjligt samtidigt som trycket inte sjunker under en viss nivå. Denna reglerstrategi har visat sig behöva utnyttja ventilen ännu mindre än tidigare, manuella försök har gett en stigtider på över 10 minuter (från en nivå på 30 mm till 60 mm). Sänkning av nivån efter den långsamma stigningen får sedan göras genom att ändra ventilen, och denna sänkning tar lite knappt 4 minuter.

7.2 Omvänd reglering

Precis som för labsystemet gjordes en implementering av omvänd reglering med PI-regulatorer, dvs. att pumpen styr nivån och ventilen avgasningstrycket. Detta är något som har försökts tidigare, men inte lyckats. Problemet visade sig bero på implementeringen av regulatorn i mjukvaran. Integraldelen hade för dålig upplösning beroende på att den implementerats med heltalsaritmetik där storleken på heltalen endast var 16 bitar. Detta gjorde att integraldelen inte kunde göras tillräckligt långsam och försökte den användas i reglering blev följden instabilitet. När detta väl upptäcktes gjordes istället en flyttalsimplementation, som genast gav bättre resultat.

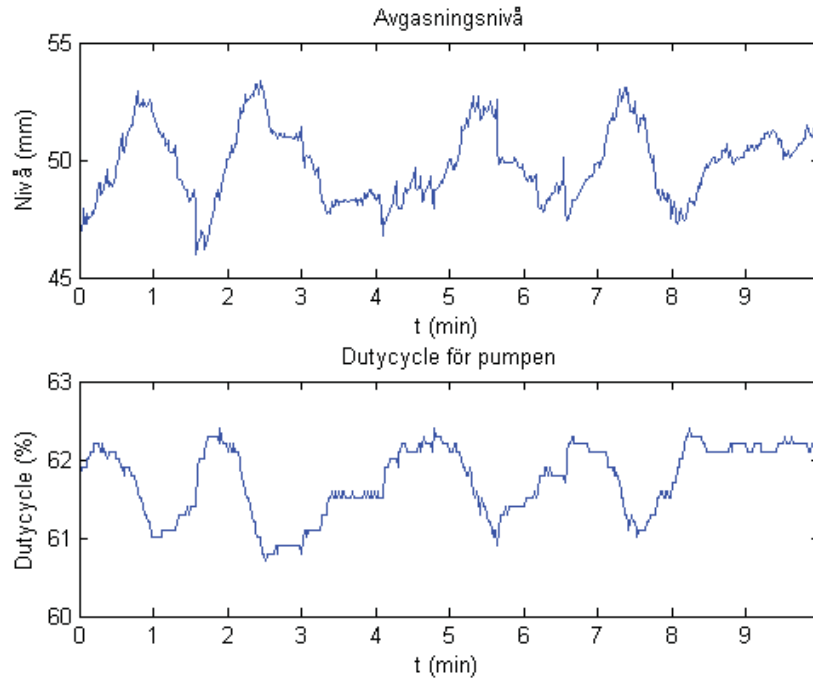
Valet av regulatorparametrar måste göras betydligt försiktigare här än för den vanliga regleringen, dvs. att pumpen styr trycket och ventilen nivån. På labsystemet fanns nästan ingen signifikant koppling mellan pump-nivå och ventil-tryck för den önskade arbetspunkten och därför baserades den omvända regleringen på att systemet var reglerat. I dialysmaskinen existerar det lite mer koppling, åtminstone mellan pump och nivå. Detta borde innebära att denna reglerstrategi ska fungera bättre här, och så visar det sig också vara, se figur 7.4 och 7.5.



Figur 7.4 Avgasningstryck och ventilläge då systemet reglerats med den omvända reglerstrategin.

Man kan börja med att konstatera att både nivån och trycket inte är särskilt stabila, utan de varierar en del. För systemet är detta som tidigare nämnts inget problem, såvida det inte innebär att flödet uppströms varierar lika mycket. För labsystemet var det huvudsakligen ändringar av ventilläget som bidrog till flödets variation, och om man antar att det är fallet i dialysmaskinen också ser man att den omvända regleringen innebär en förbättring, jämför frekvensen på ventiländringarna i figur 4.6 och 7.4.

Ventilen hamnar flera gånger i kvantiseringsproblem, vilket yttrar sig i snabba skiftningar. Detta beror på att det önskade ventilläget ligger ungefär mittemellan två lägen och därför behövs endast små ändringar av styrsignalen för att ventilläget ska ändras. Även signalen till pumpen är kvantiserad, men upplösningen är betydligt bättre.



Figur 7.5 Avgasningsnivå och dutycycle för pumpen då systemet reglerats med den omvända reglerstrategin.

re där och inga kvantiserings effekter syns. Att pumpen saknar fullständig kontroll över nivån kan bl.a. anas på i hur stort intervall pumpen måste jobba, men även på hur mycket nivån tillåts variera. Till viss del sker regleringen genom att flödet kan styras, men stor del sker genom att trycket ändras av pumpen och då reagerar ventilen. De plötsliga förändringarna av nivån kan förklaras med att ventilen ändras, dessa fortplantas sedan till pumpsignalen och är alltså anledningen till den något taggiga kurvformen. Detta utseende bör nog undvikas, både för att inte slita på pumpmotorn i onödan och för att få ett så jämnt flöde uppströms som möjligt.

Ändrar sig ventilen kommer pumpen oundvikligen behöva korrigera lite, förr eller senare. Ett sätt att minska störningarna på flödet skulle då kunna vara att med en framkoppling ändra pumpsignalen då ventilen ändras. Eftersom flödet störs av ventiländringen spelar det inte så stor roll om störningen blir något större i detta ögonblick av att även pumpen gör en lite större korrigering. Då skulle den övriga pumpregleringen kunna göras mindre aggressiv och därmed skulle signalen kunna bli jämnare mellan ventiländringarna. För att detta ska ge någon större effekt krävs då även att ventiländringarna blir betydligt sällsyntare.

Utseendet på trycksignalen spelar ingen roll så länge avgasningen fungerar, och det gör den bara undertrycket är tillräckligt stort, där tillräckligt innebär åtminstone 600 mmHg. Den tidigare beskrivna metoden med framkopplade stora ändringar av pumpsignalen kommer förmodligen att ge en tryckkurva som inte alls är vacker, men hålls bara undertrycket över en viss nivå ska detta inte spela någon roll.

7.3 Systemidentifiering

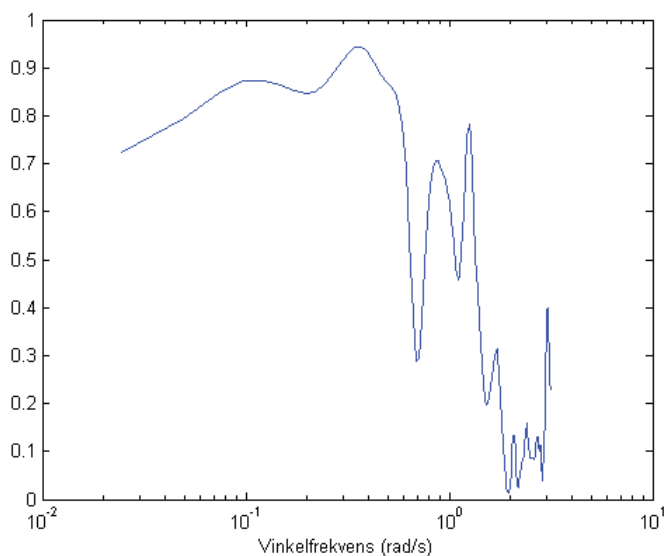
Önskvärt vore om liknade angreppssätt som på labsystemet kan användas även på dialysmaskinen, dvs. att först identifiera modeller och därefter designa regulatorer

baserade på dessa. Detta visar sig dock inte vara helt lätt, p.g.a. problem med att logga data. Alla parametrar som mäts i maskinen med tillgängliga sensorer går att logga med en extern dator, problemet är bara att loggningen ges en väldigt låg prioritet, vilket resulterar i att det inte går att få mätvärden så ofta. Dessutom är synkroniseringen dålig, i den meningen att tiden mellan de erhållna mätpunkterna, samplingstiden, varierar ganska kraftigt.

Det visar sig att samplingstider under 1 sekund inte är möjliga, och detta ska jämföras med samplingstiden på 400 ms som använts på labsystemet. Tidsskillnaden mellan de erhållna datapunkterna varierar dessutom kraftigt, mellan 0.6 och 1.4 sekunder. Utöver dessa problem tillkommer en komplikation om vilken exciterande insignal som ska användas. Ett lämpligt val vore att utnyttja en PRBS-signal, som vid identifieringen på labsystemet. Problemet är dock att en sådan inte finns tillgänglig i dialysmaskinen. Möjlighet finns att implementera den via nästlade if-satser, men det skulle resultera i ganska mycket kod som kanske skulle bli för stor för minnet i maskinen. Därför matades insignalen in manuellt, via ett reglage på maskinen, och målet var att göra den så PRBS-liknande som möjligt. Då pumpspänningen varierades hölls ventilen still och vice versa.

Problemet med en den ouniforma samplingstiden kan hanteras på ett antal olika sätt. Ett första är att helt enkelt strunta i det och istället anta att samplingen är uniform. Ett andra sätt är att interpolera fram värden så att en uniform sampling erhålles. Linjär interpolation har testats, effekten blir att interpolationen jämnar ut data och det ser ut som att information förloras. Då det visar sig att det första alternativet är tillräckligt för att erhålla modeller som beskriver data bra undveks interpolationstekniken i de fall det gick.

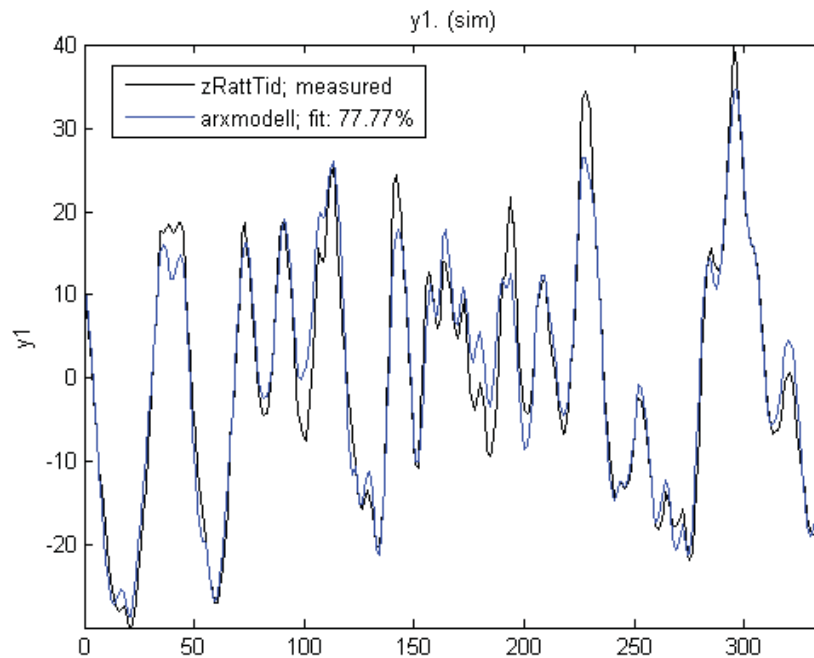
Tryck från pump



Figur 7.6 Koherensspektrum för pumpspänning som insignal och tryck som utsignal.

Studier av koherensspektrum, se figur 7.6, visar att insignalen förmodligen har varit tillräckligt exciterande och att det ska vara möjligt att beskriva datan med en linjär modell, vilket är möjligt för de frekvenser då koherensspektrum ligger nära 1. En modell av ARX-typ visar sig fungera bra, både med avseende på residualerna och prediktionsförmågan, se figur 7.7. Den identifierade modellen redovisas i appendix A.2.

För labsystemet behövdes en ARMAX-modell, men bortser man från brusmodellen finns det stora likheter för de bägge modellerna. Bägge är av andra ordningen och bägge har två stycken positiva reella poler, där placeringen dock skiljer sig lite åt.

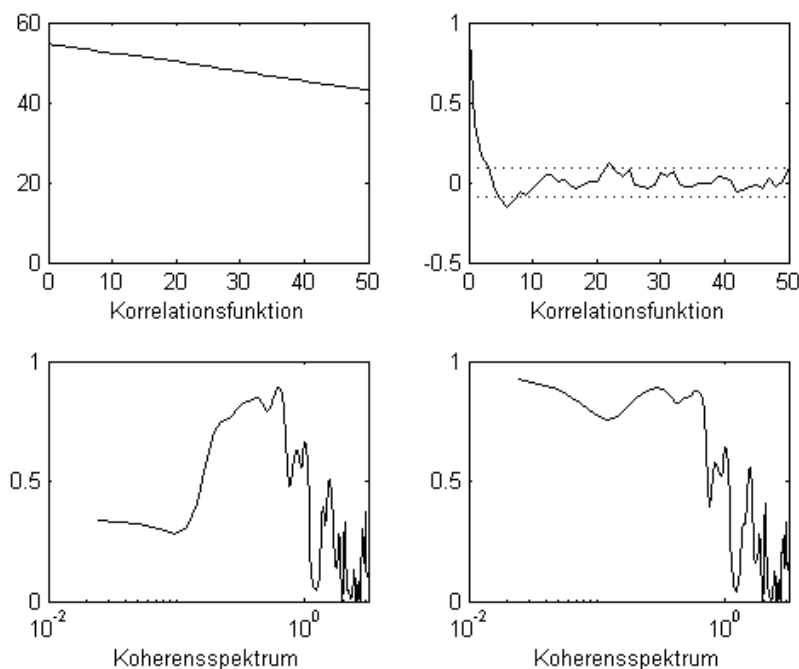


Figur 7.7 Resultat då modellens simulerade tryck jämförs med verkligt tryck. Utdatan med de uppmätta tidpunkterna har använts i jämförelsen.

Nivå från ventil

Vid identifieringen av modellen för nivån på labsystemet användes till en början inflödet, och därefter lades en integrator till och en modell för nivån erhöles. Detta förfarande är inte möjligt nu, då det helt enkelt inte finns någon flödesmätning tillgänglig. Nivån i dialysmaskinen bör dock inte betyda sig särskilt mycket annorlunda än den simulerade i labsystemet, och man kan därför förvänta sig att det ska finnas en integrator i modellen. Studeras korrelationsfunktionen och koherensspektrum för data, se de vänstra diagrammen i figur 7.8, får man också dessa hypoteser bekräftade. Korrelationsfunktionen är långsamt avtagande, vilket tyder på åtminstone en integrator i processen [16]. Att koherensspektrum är litet vid låga frekvenser visar att ingen bra modell kan förväntas här, vilket stämmer bra för en integrerad process som inte har något stationärt läge. En differentiering, motsvarande att förkorta bort integratorpolen, av data ger resultat enligt de högra diagrammen i figur 7.8. Nu ser korrelationsfunktionen ut att tillhöra en stationär process och koherensspektrum antyder att det ska gå bra att beskriva data med en linjär modell, åtminstone för vinkelfrekvenser under ca. 1 rad/s.

De differentierade data blir väldigt brusiga och gör det svårt att hitta någon lämplig modell. Detta skulle kunna tänkas bero på mätbrus, då det är en mätning av en förmodligen skvalpande nivå. Mätbruset är ofta högfrekvent, och ett sätt att bli av med det är därför lågpassfiltrering. Då samplingen är väldigt långsam finns risk för att en del mätbrus har vikits in i signalen, detta är dock svårt att undersöka, men förhoppningen är att det inte ska innebära något problem.



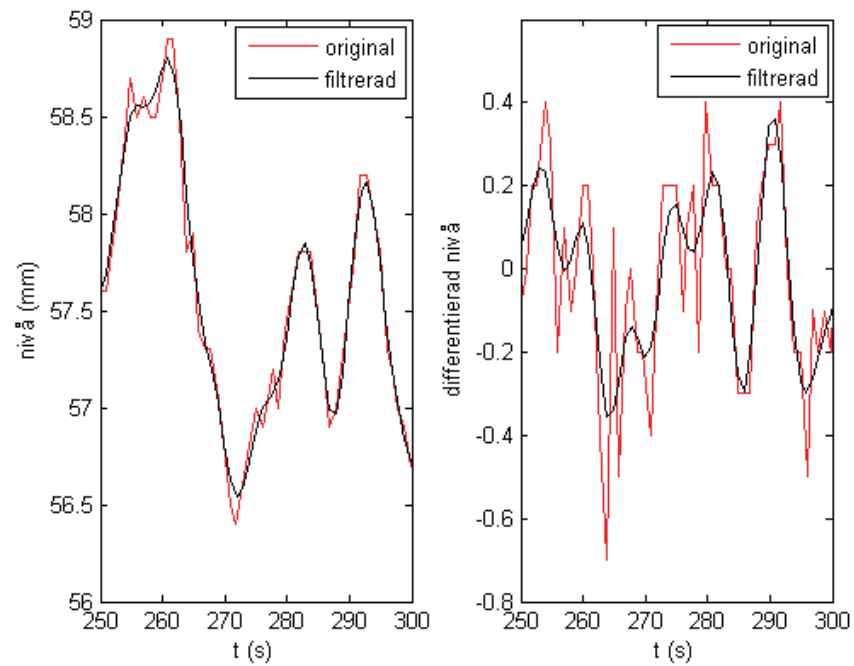
Figur 7.8 Till vänster visas korrelationsfunktion och koherensspektrum för nivådata före differentiering. Till höger visas motsvarande efter differentiering. De streckade linjerna i den övre högra figuren motsvarar ett konfidensintervall på 95 %.

Till filtreringen användes ett femte ordningens Butterworth-filter, med en brytfrekvens på 0.3 Hz. För att inte få någon fasfördröjning p.g.a. filtreringen utnyttjades det faktum att operationen utförs med all data känd, vilket möjliggjorde användning av filtret både framlänges och baklänges (matlabs funktion `filtfilt`), resultatet visas i figur 7.9. På själva nivåsignalen märks inte särskilt mycket skillnad, men på den differentierade signalen är skillnaden desto större. Under körning i maskinen är det inte möjligt att använda denna typ av filtrering, och det är därför ofrånkomligt att en viss fördröjning introduceras. Detta ska dock nog inte vara något problem, då processen inte ligger särskilt nära stabilitetsmarginalerna.

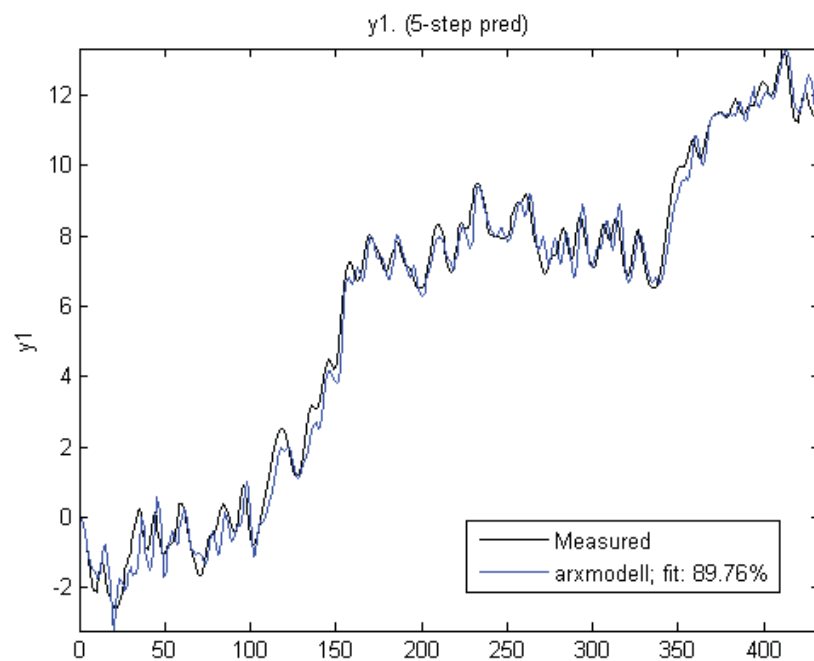
På labsystemet visade sig en ARMAX-modell beskriva data bra, här ger en ARX-modell bra prediktionsförmåga, men residualerna ser inte riktigt ut som vitt brus. Med en ARMAX-modell sker ingen förbättring trots införandet av en brusmodell. Då prediktionsförmågan är tillfredsställande anses den identifierade ARX-modellen tillräckligt bra, trots residualerna, och den redovisas i appendix A.2. Jämförs denna med ARMAX-modellen från labsystemet kan man se vissa likheter, båda har t.ex. 2 positiva komplexkonjugerade poler. Skillnaderna är bl.a. att ARMAX-modellen har en positiv pol till och dessutom en insignalfördröjning på två samples, medan ARX-modellen inte har någon insignalfördröjning alls. Det senare kan förmodligen förklaras med att samplingstiden för ARMAX-modellen är 0.4 sekunder medan den för ARX-modellen är 1 sekund. För att få den önskade modellen för nivån får sedan integratorn läggas till i modellen. Resultatet blir en modell som kan prediktera bra, se figur 7.10, men har residualer som inte riktigt är vitt brus.

Korskopplingar

För labsystemet var korskopplingarna i princip obefintliga, men de inledande testerna på dialysmaskinen visade att så nog inte var fallet här. Studeras datan visuellt

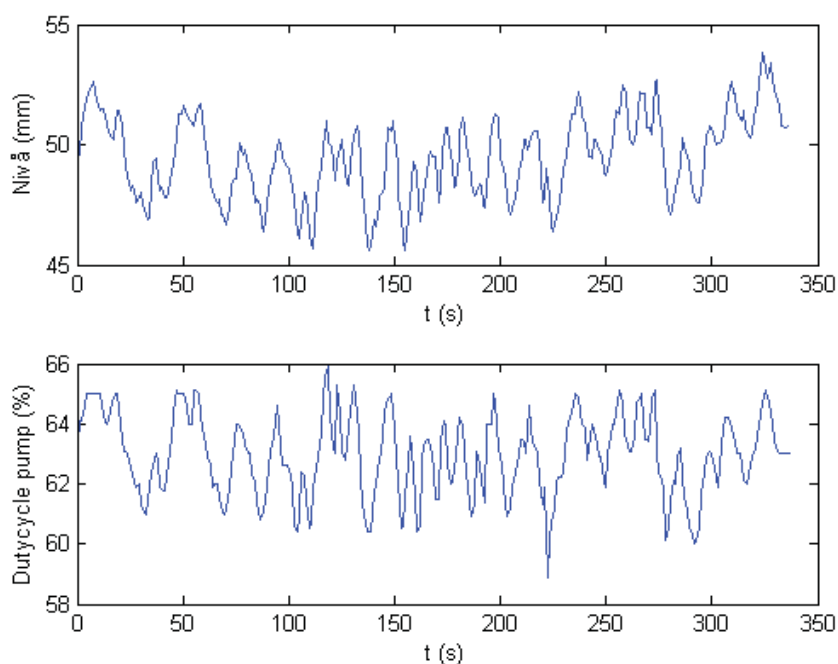


Figur 7.9 Till vänster visas ett utdrag ur den orörda nivååtdatan och den filtrerade. Till höger visas differentiering av de båda.



Figur 7.10 Resultat då modellens 5-stepsprediktion av nivån jämförs med verklig nivå (den filtrerade nivån har använts). Utdata med de uppmätta tidpunkterna har använts i jämförelsen.

kan även viss korrelation skönjas, se figur 7.11. En identifiering av denna koppling medför dock vissa problem, beroende på att nivå och pumpspänning loggas från olika funktioner i dialysmaskinen. Detta gör att loggningen inte är synkroniserad, i den tidigare identifieringen har in- och utsignal varit givna vid samma tidpunkt och det som har varierat är tiden mellan dessa tidpunkter. Nu varierar även synkroniseringen, dvs. nivån och pumpspänningen är givna för olika tidpunkter, och detta kan innebära problem. En enkel lösning skulle vara att strunta i detta, precis som är gjort med den ouniforma samplingstiden, nivåmätningarna ges dock något oftare än pumpspänningsmätningarna och problemet är då att välja vilka värden man ska utesluta. För att undvika denna problematik gjordes därför en linjär interpolation av nivån till de tidpunkter då pumpspänningen fanns tillgänglig, och ouniformiteten mellan dessa tidpunkter ignorerades.

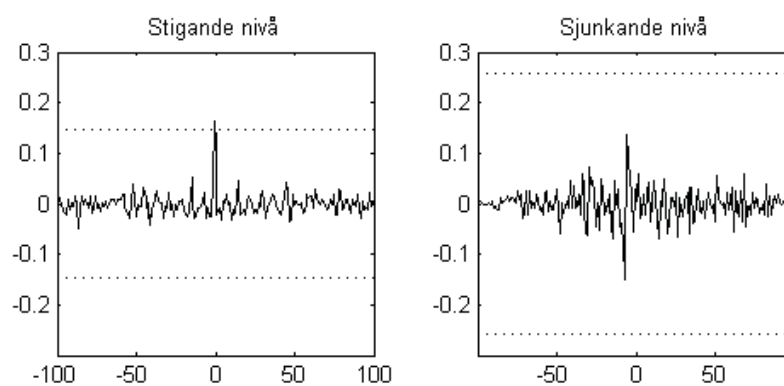


Figur 7.11 Datan använd för identifiering av korskoppling mellan pump och nivå. Även med blotta ögat kan korrelation skönjas.

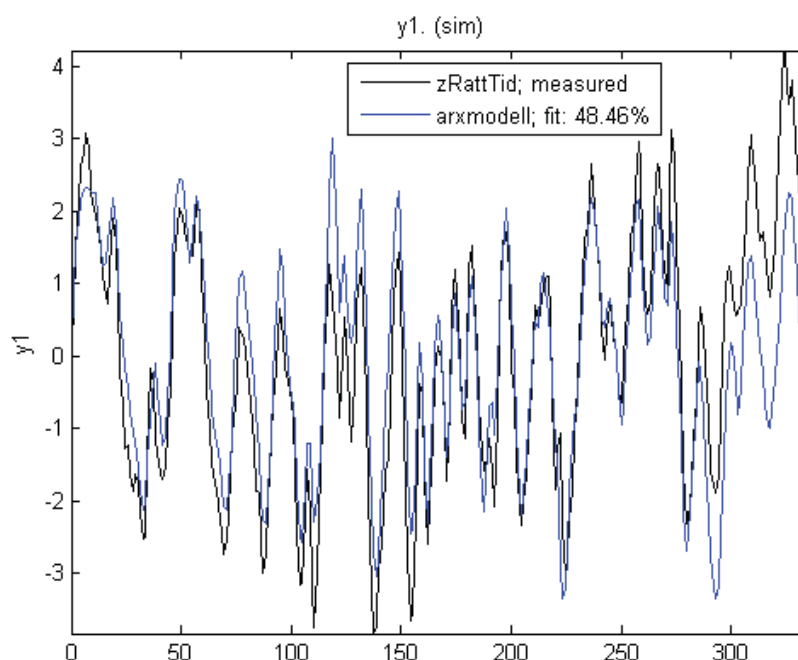
Kopplingen mellan pumpspänning och avgasningsnivå visar sig vara beroende av ventilläget. Befinner sig ventilen i ett läge där den släpper igenom för mycket flöde, så att nivån stiger, finns det lite korrelation, men i ett läge där flödet är för litet, nivån sjunker, saknas signifikant korrelation, se figur 7.12. I den fortsatta identifieringen används datan då ventilen är ställd så att nivån stiger.

Studerars koherensspektrum för in- och utsignal ser man att för låga frekvenser bör man inte kunna förvänta sig att modellen ska bli bra, men den fortsatta identifieringen visar trots detta att modellen som tas fram både har bra prediktionsförmåga och residualer. Den nämnda modellen är en andra ordningens ARX-modell, och i figur 7.13 visas resultatet i ett valideringstest. Redovisning av modellen sker i appendix A.2.

Den andra korskopplingen, trevägsventilens påverkan på trycket, är mindre intressant. Detta eftersom den övergripande strategin går ut på att slippa använda ventilen och då ska denna koppling förhoppningsvis inte exciteras så mycket att den kommer spela någon större roll. En kontroll av korrelationen kan dock göras, och enligt figur 7.14 är den inte signifikant.



Figur 7.12 Korskorrelationen mellan nivå och pumpspänning för två olika ventillägen (förvitande filtrering har utförts). Det första släpper igenom något för mycket flöde och leder till en stigande nivå, det andra släpper igenom för lite och därmed sjunker nivån. De prickade linjerna motsvarar konfidensintervall på 95 %. Färre mätdata har använts för den sjunkande nivån och konfidensintervallet blir därför något större.

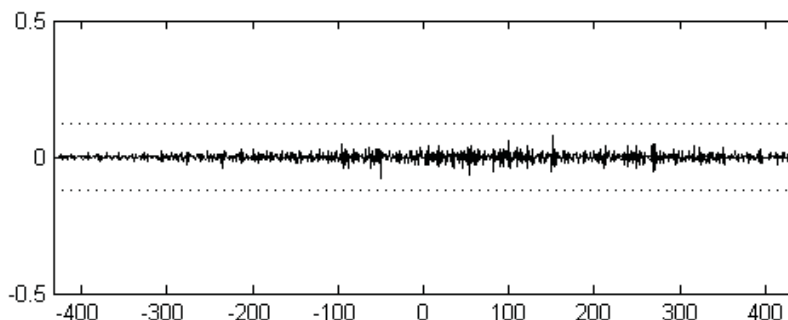


Figur 7.13 Simulerad nivå från ARX-modellen med pumpspänning som insignal jämförd med uppmätt data, där de faktiska tidpunkterna har använts.

7.4 LQG-reglering

LQ-straff på styrsignaländringar

I den normala formen av optimeringskriteriet till LQ-reglering kan man endast straffa absolutbeloppet av styrsignalen. För trevägsventilen är det mer intressant att straffa ändringar av läget, eftersom målet är att den ska ligga still och inte specifikt var den ligger. Detta kan åstadkommas, men priset som får betalas är att modellen måste utökas. Utgå från tillståndsbeskrivningen (7.1) och differentiera, dvs. multiplicera



Figur 7.14 Korskorrelationen mellan ventilläge och tryck, förvitande filtrering har utförts. Den prickade linjen motsvarar ett konfidensintervall på 95 %.

med $(1 - q^{-1})$, enligt (7.2).

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(t) \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) - x(k) &= A(x(k) - x(k-1)) + B(u(t) - u(t-1)) = \\ &= A(x(k) - x(k-1)) + B\Delta u(t) \end{aligned} \quad (7.2)$$

Genom att utöka tillståndsvektorn med även tillstånden i föregående samplingspunkt kan systemet skrivas på vanlig tillståndsform, enligt (7.3).

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+I & -A \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(t) \quad (7.3)$$

Denna realisering är praktisk då tillstånden från den ursprungliga modellen behålls. Mindre praktiskt är att styrbarheten för modellen förloras, som är en klar nackdel då tillståndsåterkoppling är den tänkta reglerstrategin. Detta beror på att realiseringen inte är minimal [10], vilket lätt inses om man istället studerar vad som händer med överföringsfunktionen. Systemet beskrivs då enligt (7.4) och multiplikation med $(1 - q^{-1})$ ger (7.5).

$$y(k) = H(q^{-1})u(k) \quad (7.4)$$

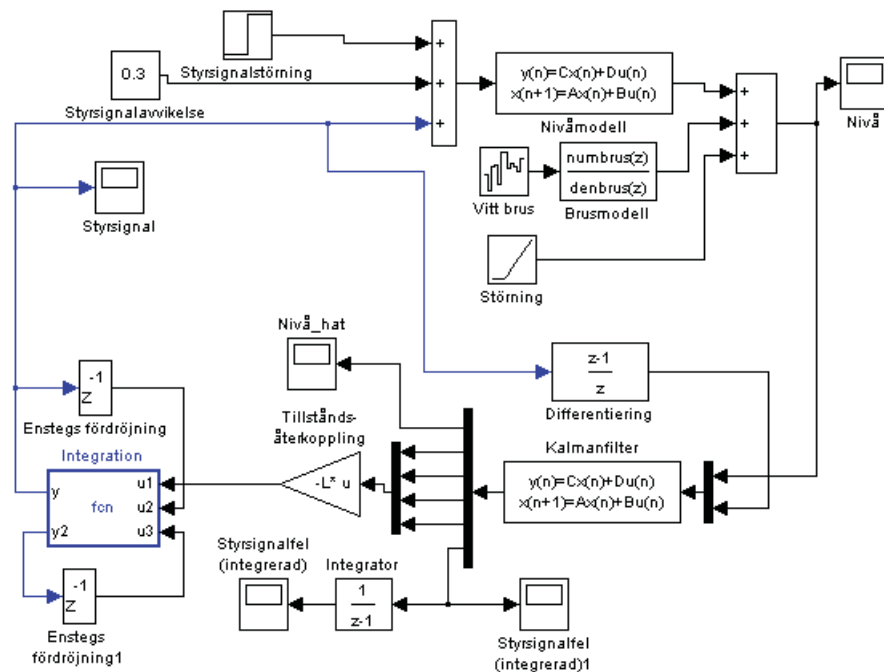
$$\begin{aligned} (1 - q^{-1})y(k) &= H(q^{-1})(1 - q^{-1})u(k) = H(q^{-1})\Delta u(k) \\ \Rightarrow y(k) &= \frac{H(q^{-1})}{1 - q^{-1}}\Delta u(k) \end{aligned} \quad (7.5)$$

Systemets ordning växer alltså bara med ett och blir inte fördubblat vilket tillståndsbeskrivningen antyder. Detta blir alltså den minimala realiseringen och systemet är numer styrbart. För att rent praktiskt kunna använda det nya systemet behöver sedan styrsignalen integreras, vilket är en effekt av differentieringen.

En följd av att styrsignalen beräknas på inkrementform och sedan integreras blir att regulatorn får integralverkan. Detta inses enklast genom att konstatera att integreringen av styrsignalen medför en division av styrsignalen med faktorn $(1 - q^{-1})$. Denna faktor i regulatorns överföringsfunktion är precis det som ger integralverkan (oändligt stor stationär förstärkning).

Simulering

Den föreslagna metoden för straff av styrsignaländringar kan testas i simulering på modellen för nivån. Detta har gjorts med simuleringsmiljön Simulink i Matlab, i figur 7.15 visas den använda modellen. Den identifierade modellen för nivån har delats upp i dels in- och utsigaldelen, "Nivåmodell" i figuren, och dels brusdelen, "Brusmodell" i figuren. Utöver det vita bruset förekommer två andra störningar. För det första finns det en konstant styrsignalavvikelse, som ska simulera att det inte finns ett ventilläge som ger ett önskat arbetsläge, kallad "Styrsignalavvikelse". I figuren finns det även med en stegstörning på styrsignalavvikelsen, kallad "Styrsignalstörning". Det andra är en laststörning på nivåsignalen, i figuren representerat med en ramp kallad "Störning".



Figur 7.15 Den i simulink använda modellen.

Regulatorn består i princip av tre olika delar. Den första komponenten är ett Kalmanfilter, den andra tillståndsåterkopplingen och den tredje en integration av styrsignalen, eftersom den nu räknas ut på inkrementform. Kalmanfiltret kräver en mätning av nivån samt den givna differentierade styrsignalen som insignaler. Förutom tillstånden skattas en konstant styrsignalavvikelse, detta är inte nödvändigt för att regleringen ska fungera men det visar att en skattning av avvikelser är möjlig. Kalmanfiltrets utsignaler är en skattning av nivån, som t.ex. kan jämföras med den verkliga nivån för att bedöma hur bra skattningen fungerar, skattningar av tillstånd samt skattning av styrsignalavvikelsen.

Tillståndsåterkopplingen ger styrsignalinkrementet och för att få den faktiska styrsignalen måste denna signal integreras. Detta görs på ett lite speciellt vis, för att undvika att ventilen ändras mer än den verkligen behöver. Koden för integrationen återges i matlabkod 7.1 (koden är den som återfinns i blocket "Integration" i figur 7.15). Variabeln *delstep* anger kvantiseringen i antalet delsteg hos trevägsventilen. Insignalen *u1* är styrsignalinkrementet, och denna integreras i variabeln *y2*, som med ett stegs fördröjning kommer in som *u3*. *y* är den kvantiserade utsignalen, som är det läge som ventilen kommer att ställas i, och denna beräknas som

en avrundning av den integrerade signalen y_2 . Så länge som y inte förändras fortgår integrationen som vanligt i y_2 , men när y ändras sätts y_2 till det värde y får. Detta är möjligt genom att även y återkopplas med en sampels fördröjning och kommer in som insignalen u_2 . Denna implementation av integrationen förhindrar regulatorn att komma i ett läge där avrundningen gör att enstaka små styrsignalinkrement leder till ventillägesändringar.

```
1 function [y,y2] = fcn(u1,u2,u3)
2
3 delstep = 1;
4
5 y2 = u3+u1;
6
7 y = 1/delstep*round(delstep*y2);
8
9 if ( abs(y-u2) > 0)
10     y2 = y;
11 end
```

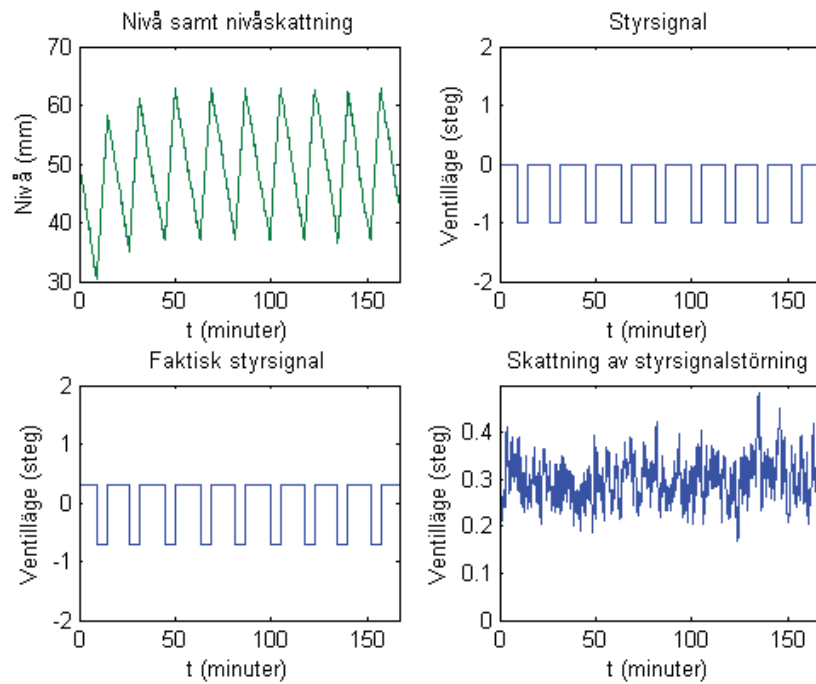
Matlabkod 7.1 Den integrering som utförs av styrsignalinkrementet.

Simuleringsresultat

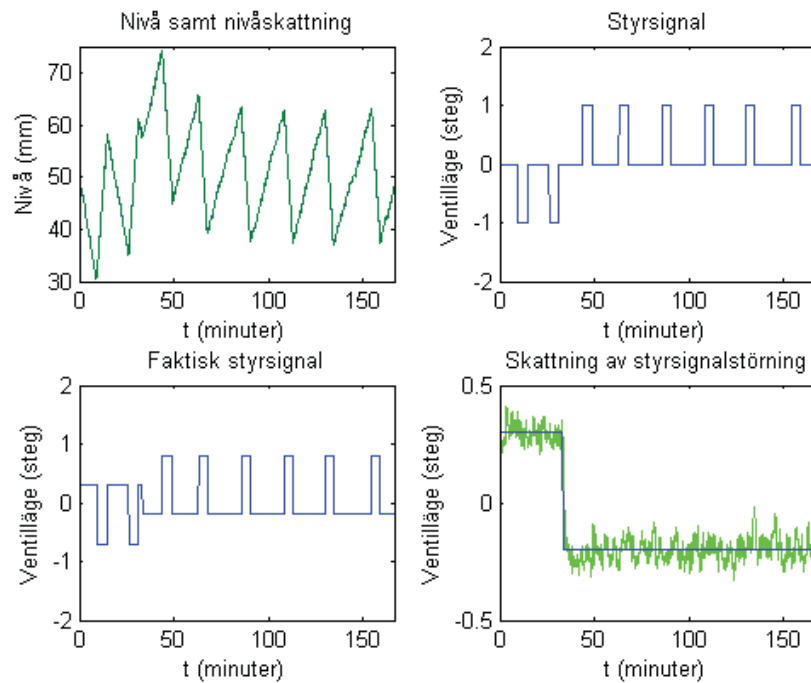
Med simulink är det väldigt lätt att snabbt utvärdera olika designval, av både Kalmanfilter och straffmatriser till LQ-regleringen. Det visar sig att ett väldigt litet straff på avvikelser i nivån tillsammans med ett väldigt stort straff på ändring av ventilläget ger en önskvärd reglering. Kalmanfiltret har valts så att mätbruset antas ha något större varians än processbruset på tillstånden. Detta designval ger resultat enligt figur 7.16, 7.17, 7.18 och 7.19. I de tre förstnämnda figurerna antas ventilen ändras i helsteg och i den sista figuren antas ventilen ändras i åttondels steg.

Figur 7.16 illustrerar effekten av en konstant styrsignalstörning. Detta motsvarar det faktum att det inte finns något ventilläge som ger rätt fördelning av inflöde och recirkulationsflöde. Detta tvingar ventilen att alternera mellan två lägen som gör att nivån varierar mellan att sjunka och stiga. Det som skulle kunna vara användbart är att det är åtminstone 5 minuter mellan varje ventiländring, som förhoppningsvis innebär ett stabilt flöde uppströms. Möjlighet finns även att låta nivån variera mer, och på så sätt öka tiden mellan ventiländringarna ytterligare. I det riktiga systemet finns det även möjlighet att använda pumpen för viss styrning av nivån, och detta är ännu en möjlighet att utöka tiden mellan ventiländringarna. Studeras de olika diagrammen i figur 7.16 närmare kan det konstateras att Kalmanfiltret gör ett bra jobb, då det inte går att urskilja någon skillnad mellan nivån och skattningen av den. Styrsignalstörningen som använts har legat på 0.3 steg, vilket kan ses som skillnaden mellan den faktiska styrsignalen (som processen utsatts för) och den av regulatorn beräknade styrsignalen. Skattningen av denna parameter fungerar som det undre högra diagrammet visar bra.

Lutningen på nivåkurvan mellan ventiländringarna är konstant, se övre vänstra diagrammet i figur 7.16. Om utflödet ur avgasningskammaren är konstant innebär detta att inflödet till avgasningssystemet måste vara konstant, men skilja sig något från utflödet. Denna skillnad kan beräknas då kammarens dimensioner är kända. Sådana räkningar ger att då nivån sjunker är inflödet ungefär 4 ml/min mindre än utflödet och då nivån stiger är inflödet ungefär 17 ml/min större.

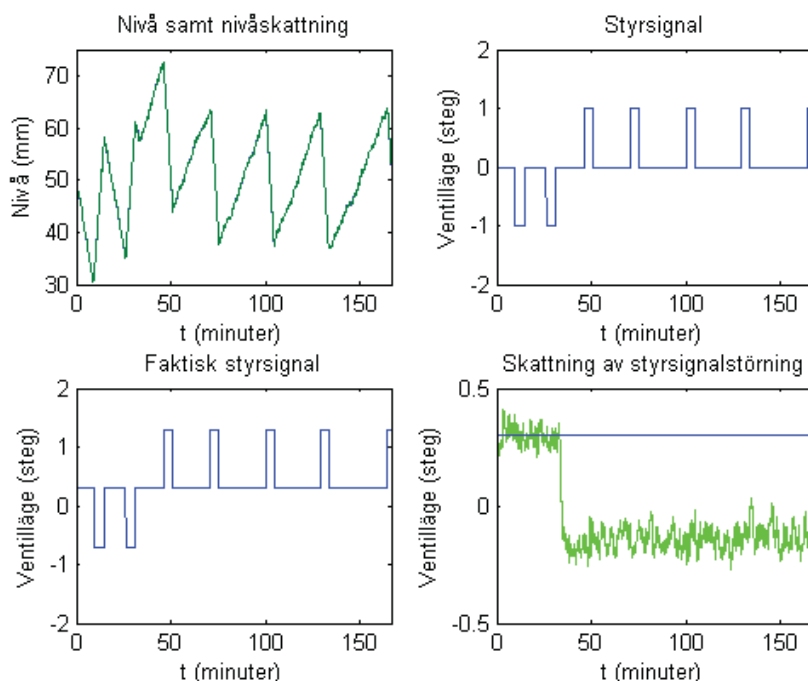


Figur 7.16 Simulering av nivåsystemet då endast en konstant styrsignalstörning verkat på systemet. Ventilen har antagits vara inställd på helsteg.



Figur 7.17 Simulering av nivåsystemet då det förutom en konstant stegstörning dessutom finns en stegstörning av styrsignalen, vid tiden 33 minuter. Ventilen har antagits vara inställd på helsteg.

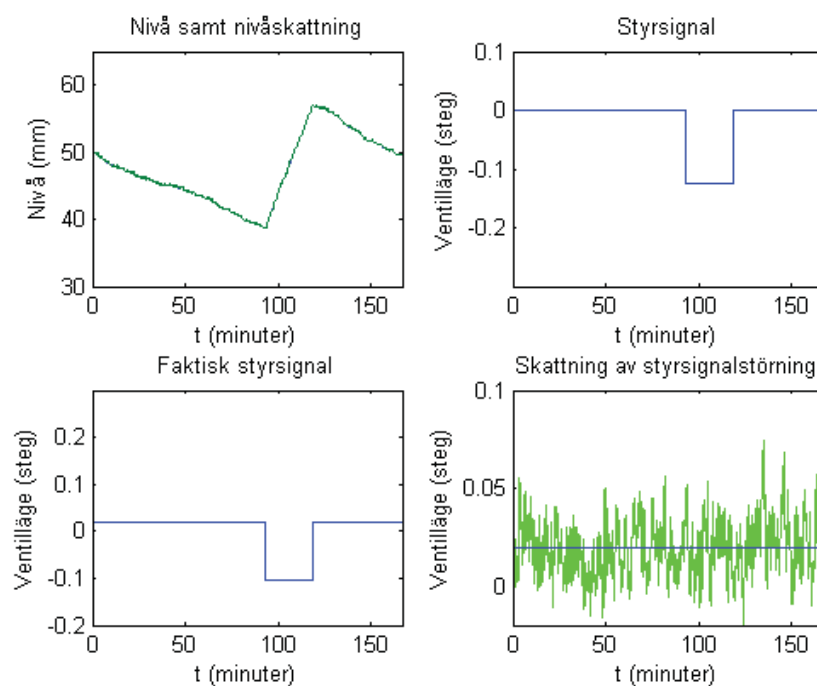
Effekten av en stegstörning på styrsignalen, utöver den konstanta störningen, visas i figur 7.17. Detta skulle rent fysikaliskt kunna motsvara att stegmotorn t.ex. missar ett steg. Följden blir att nivån drifrar iväg lite väl långt, och det hade kanske varit önskvärt att regulatorn skulle ha reagerat lite tidigare. Å andra sidan är det svårt att avgöra hur pass realistisk den applicerade störningen är och därför är det förmodligen bättre att vänta med att ändra i regulatordesignen tills tester gjorts på den riktiga processen. Styrsignalen reagerar endast genom att den får byta mellan vilka lägen den alternerar. Skattningen av styrsignalstörningen är både bra och snabb, vilket kan beskådas i det nedre högra diagrammet.



Figur 7.18 Simulering av nivåsystemet då en ramp agerat som en laststörning vid tiden 50 minuter. Ventilen har antagits vara inställd på helsteg.

I figur 7.18 har det antagits komma en rampstörning på nivåsignalen. Detta motsvarar att storleken på flödet nedströms ändras. I det undersökta fallet har flödet antagits öka, vilket leder till att nivån sjunker. Nivån blir något för låg, vilket är en följd av alltför försiktig reglering. Precis som i det föregående fallet är det dock svårt att veta om störningen är rimlig, och därför görs ingen ändring av regulatordesignen än. Intressant är annars att en rampstörning på nivån kan tolkas som en konstant störning på styrsignalen, vilket kan ses i det nedre högra diagrammet, jämför med det nedre högra diagrammet i figur 7.17. En lösning för att erhålla ett läge där ventilen nästan inte behöver ändras alls är alltså att ändra storleken på flödet nedströms. Detta är också möjligt att göra, och något som bör testas vid körning på dialysmaskinen.

I figur 7.19 visas en simulering då ventilen har antagits vara styrd med åttondels steg. Resultatet är väldigt mycket bättre än för ventilen styrd med helsteg. Ventilläget behöver ändras endast två gånger under simuleringstiden på drygt 160 minuter, och detta måste anses vara mycket bra. Beräknas skillnaden i inflödet för när nivån sjunker erhålls värdet 0.4 ml/min och skillnaden när nivån stiger är 2.3 ml/min.



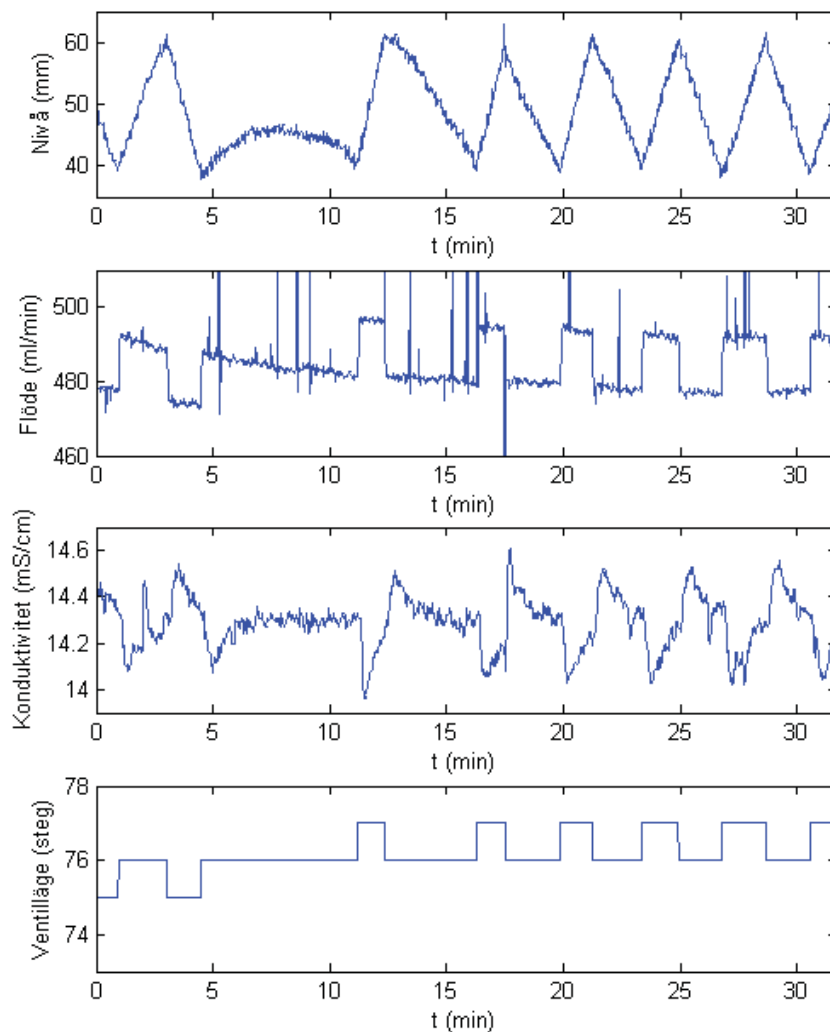
Figur 7.19 Simulering av nivåsystemet då endast en konstant styrsignalstörning verkat på systemet. Ventilen har antagits vara inställd på åttondels steg.

Körning i dialysmaskinen

Försök att implementera LQG-regulatorn på dialysmaskinen har inte alls gett samma resultat som i simulering. Förmodligen beror detta på begränsad numerisk precision, väldigt små inkrement summeras ihop tills ett ventilsteg uppnåts.

Principen för regleringen har dock kunnat testköras. Ventilen har därför styrts manuellt och endast ändrats då nivån gått under 40 mm eller över 60 mm. Resultatet av en sådan körning visas i figur 7.20. Som figuren visar är resultatet väldigt likt det som gavs i simulering. Ventilen jobbar mellan i huvudsak två stycken lägen och nivån varierar nästan linjärt mellan två lägen. I simulering användes att felet på ventilläget var konstant, men så verkar det inte vara i dialysmaskinen där felet istället verkar variera med tiden. Mellan 5 och 10 minuter går nivån från att vara stigande till att bli sjunkande utan att ventilläget ändras, vilket gör att ventilen får byta mellan vilka lägen den arbetar. Variationen av felet efter den inledande stora förändringen är mindre men fortfarande finns den kvar, vilket syns i att ventilen inte ändras enligt ett periodiskt mönster. Studeras ändringen av flödet kan man dock få intrycket av att det handlar om ett insvängningsförlopp, då flödet mot slutet stabiliserat sig. Tiden mellan ventilländringarna är mindre än de förutspådda i simulering, vilket inte är särskilt lovande.

Förutom att flödet gör stora hopp när ventilen ändras är det i princip konstant mellan ändringarna, även om variationen av ventillägesfelet ger en långsam trend. Konduktiviteten drabbas av stora hopp då flödet ändras och därefter tar det ganska lång tid innan den är tillbaka vid börvärdet. Ett sätt att förbättra konduktivetsregleringen skulle kunna vara att använda en framkoppling från ventilläget. Denna skulle med fördel kunna göras adaptiv, t.ex. kan styrsignalen då konduktiviteten nått börvärdet för varje ventilläge sparas undan och sedan appliceras momentant då ventilläget nås nästa gång. Variationen av ventillägesfelet gör att en adaptiv framkoppling är nöd-



Figur 7.20 Nivå, flöde, konduktivitet och ventilläge då en manuell variant av LQG-regulatorn testkörts.

vändig, då flödet för varje ventilläge varierar och därmed varierar även hur mycket koncentrat som måste tillsättas.

Att ändra dialysvätskeflödet har inte testats, men att göra det en gång vid uppstart kommer förmodligen inte att räcka, då ventillägesfelet varierar. Långsamma ändringar av dialysvätskeflödet som inte är alltför stora kan dock tillåtas kontinuerligt, och då finns det en möjlighet att använda den här tekniken. Skulle det vara så att variationen handlar om ett insvängningsförlopp kommer dialysvätskeflödesändringen bara utnyttjas i början av behandlingen och sedan hållas konstant, vilket är bäst för maskinen.

7.5 Ventilen med åttondels steg

Elektroniken i maskinen är konstruerad så att stegmotorn som styr trevägsventilen endast kan styras med helsteg och för att möjliggöra tester med stegmotorn styrd i åttondels steg fick stegmotorn styras via en extern dator. Mätningar av tryck och nivå från maskinen hämtades via ett loggingprogram som sedan skickade dessa vidare till LabView, som användes för styrning av stegmotorn. Maskinen får styra stegmotorn under uppstartsförloppet och ta tryck och nivå till det önskade läget innan maskinens sladd till stegmotorn byts ut mot den som kommer från datorn. Detta är möjligt att göra då dels stegmotorn styrs i öppen loop, dvs. maskinen märker inte att den inte längre styr stegmotorn, och dels därför att stegmotorn stannar i sitt aktuella läge då sladden kopplas ur. Maskinen fortsätter att styra pumpen och den tror alltså att den även styr ventilen. Ett problem med den beskrivna metoden att styra trevägsventilen är att samplingstiden blir lång. Som tidigare nämnts kan loggingprogrammet endast hämta värden ungefär en gång i sekunden och därutöver tillkommer viss fördröjning då värdena ska importeras till LabView och vara basen till ändringar av ventilläget.

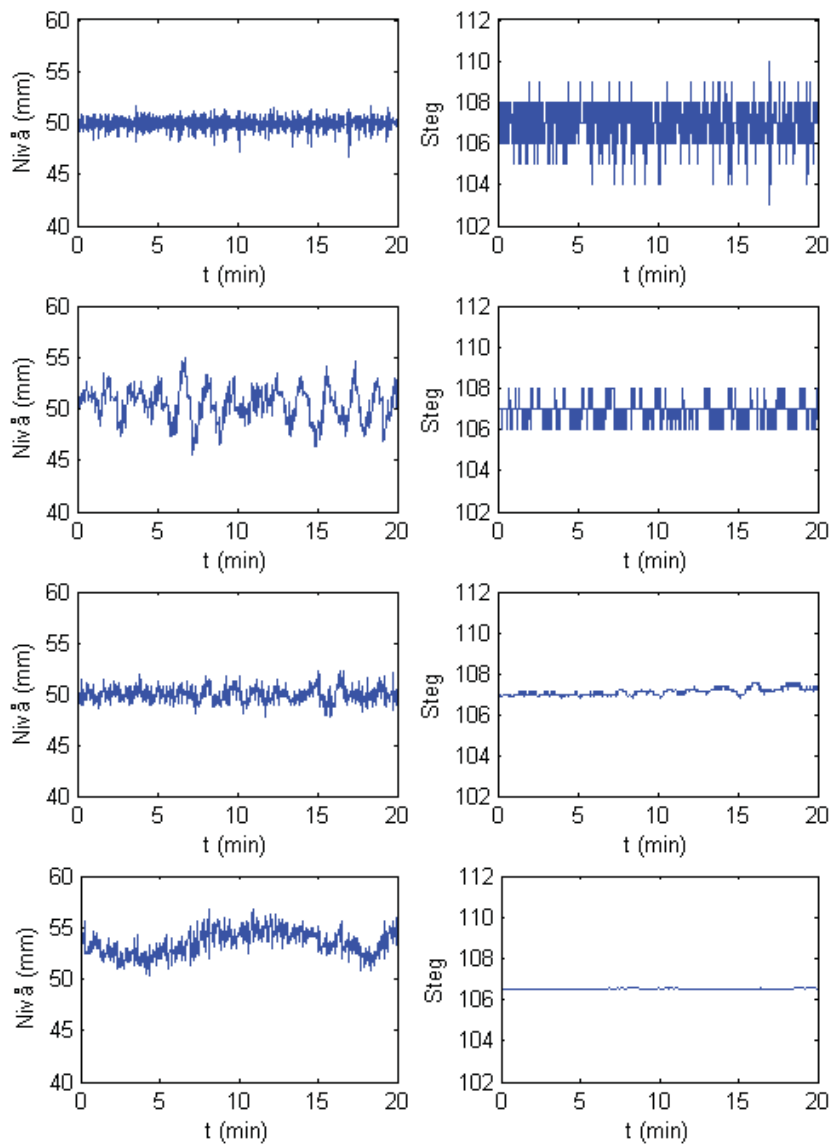
Utöver styrningen av trevägsventilen har en extern flödesmätare kopplats in i maskinen, för att möjliggöra mätning av inflödet till avgasningssystemet. Det visade sig vara olämpligt att koppla in mätaren precis innan trevägsventilen av rent praktiska skäl och därför fick kopplingen istället göras lite längre uppströms. En lämplig placering visade sig vara precis före indoseringen av saltkoncentratet, detta gör att det inte är det totala inflödet till avgasningssystemet som mäts, utan inflödet minus doseringen av koncentrat. Ett konstant flöde ska dock ge en konstant dosering av koncentrat och därför är det möjligt av en flödesmätning innan doseringen bedöma om flödet är tillräckligt jämnt eller ej.

Till att börja med kan tester med PI-reglering göras. Både den nuvarande reglerstrategin (pumpen styr trycket och ventilen styr nivån) och den omvända testades med ventilen styrd både i hel- och åttondels steg. Nivå och ventilläge visas i figur 7.21 och flödet visas i figur 7.22.

Reglering med ventilen i helsteg ger ganska olika resultat beroende på reglerstrategi. Den nuvarande strategin ger en nivå som varierar snabbt men med liten amplitud, inflödet varierar dock desto mer. Med den omvända reglerstrategin blir nivån långsamt varierande med en betydligt större amplitud än tidigare, flödet varierar med ungefär lika stor amplitud men gör det betydligt lugnare. För att avgöra om den omvända regleringen är en förbättring måste den resulterande konduktiviteten undersökas, denna visas för samtliga reglerstrategier i figur 7.23. Här ser man tydligt att den omvända reglerstrategin leder till en mer varierande konduktivitet och därmed kan den inte anses leda till någon förbättrad reglering.

Då ventilen styrs i åttondels steg förbättras utseendet på flödet betydligt. Amplituden på de variationerna blir ganska liten, men ändå leder det inte till något förbättrat utseende på konduktiviteten. För den nuvarande reglerstrategin ser det istället ut som en försämring, medan den omvända ger ungefär samma resultat som den nuvarande regleringen med helsteg. Störningarna som förekommer i maskinen märks väldigt tydligt då ventilen styrs i åttondels steg, då ändring av ventilläget nu inte ger så stor påverkan på nivån kan många förändringar nu antas komma från störningar.

Det uppmätta flödet visar ganska tydligt att reglering med åttondels steg är en förbättring. PI-reglering ger dock ingen märkbar förbättring av konduktiviteten. En förklaring till detta skulle kunna vara den långa samplingstiden. I maskinen kan ventilläget ändras med mellanrum på 200 ms, men nu sker ändringar ungefär fem gånger så sällan. Med en kortare samplingstid skulle det kanske kunna vara möjligt att med ventilen styrd i åttondels steg hålla nivån konstantare och därmed också flödet konstantare, och detta leder förhoppningsvis till ett förbättrat utseende för konduktivite-

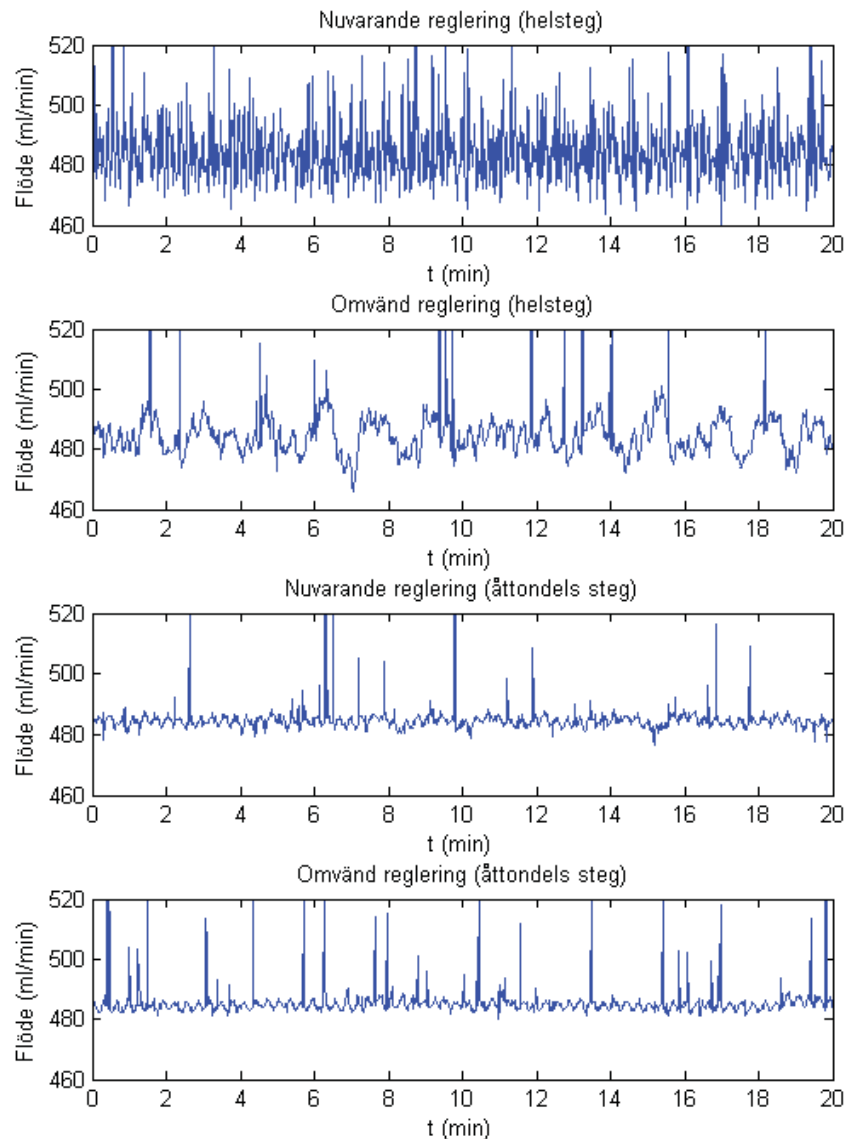


Figur 7.21 Avgasningsnivå och ventillågen för de olika körningarna med PI-regulator. De översta diagrammen visar den nuvarande reglerstrategin med ventilen styrd i helsteg, de näst översta visar den omvända reglerstrategin med ventilen styrd i helsteg, de näst nedersta visar den nuvarande regleringen med ventilen styrd i åttondels steg och de nedersta visar den omvända reglerstrategin med ventilen styrd i åttondels steg.

ten. En annan möjlighet skulle kunna vara att använda en reglerstrategi som är lite mer förutspående och på detta sätt kompenserar för den långa samplingstiden.

Simulering av fungerande omvänd reglering

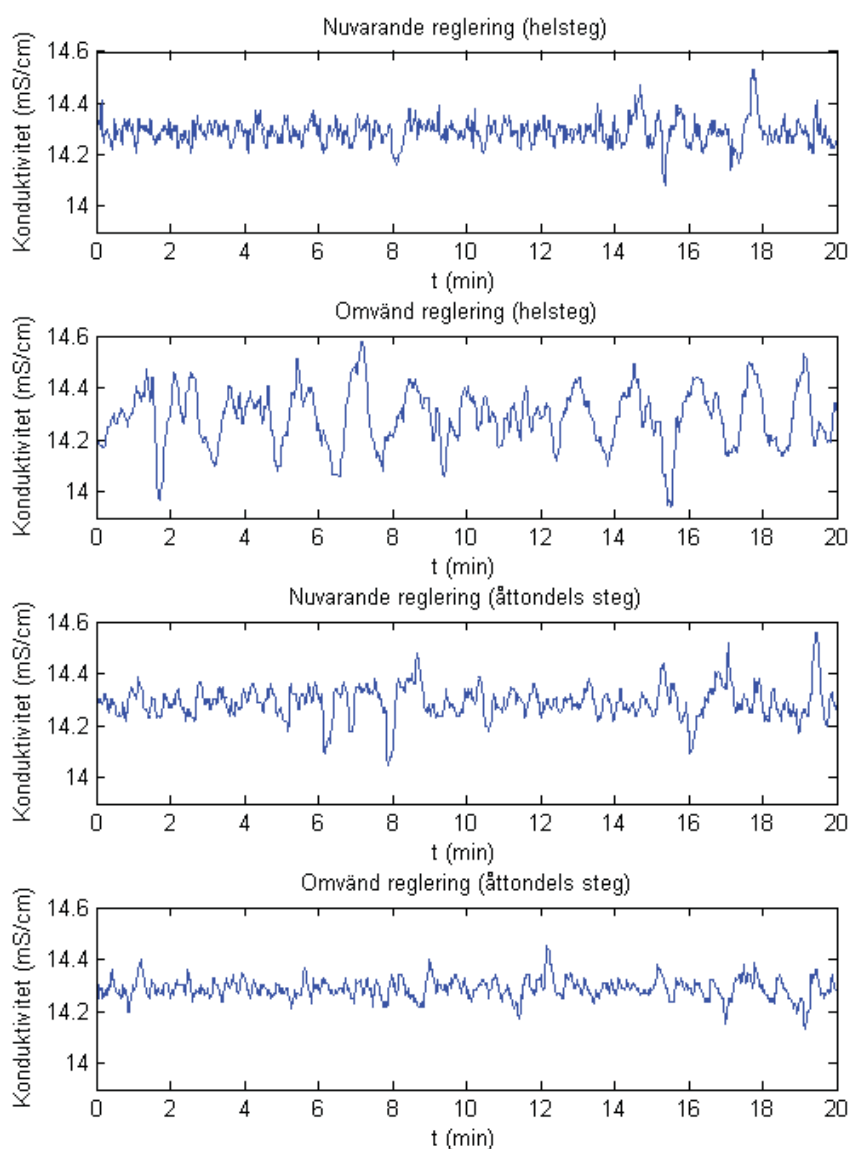
För att den omvända reglerstrategin ska kunna fungera som tänkt måste strypventilen bytas ut, så att brytpunkten i tryck-flödes-kurvan (se figur 6.4) hamnar ovanför den önskade arbetspunkten. Ett sätt att simulera strategin utan att byta ventil är dock att



Figur 7.22 Inflödet till avgasningssystemet vid de olika körningarna. De stora spikarna i diagrammen motsvarar med största sannolikhet att en luftbubbla kommit in i flödesmätaren.

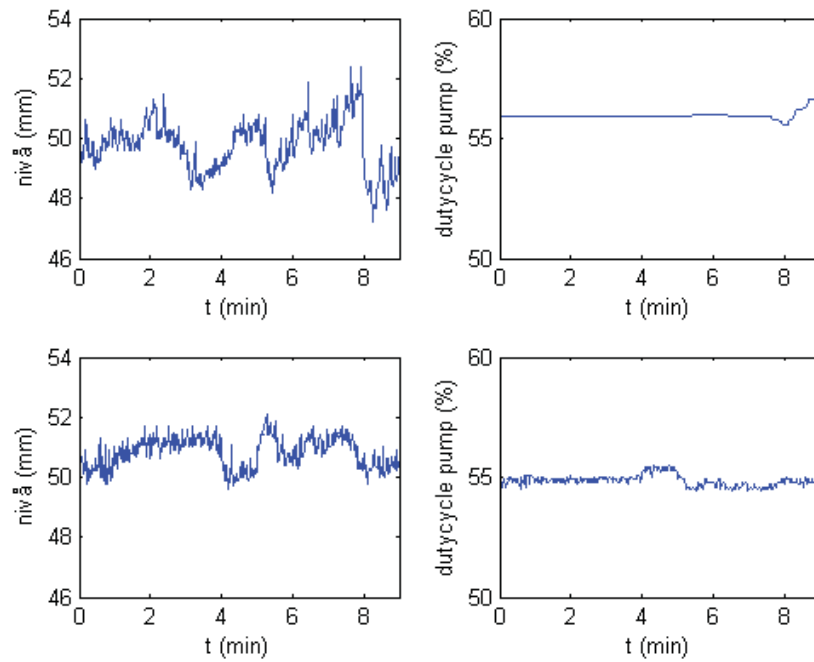
ändra det önskade avgasningstrycket. I följande testkörningar har det sänkts till drygt 500 mmHg. Ventilen har ställts i ett läge och därefter hållits konstant, och trots att pumpen har ändrat sig en del har inte trycket varierat mer än ca 20 mmHg totalt, vilket är ett acceptabelt beteende för trycket. Pumpen har styrts med en PI-regulator med lite olika parametrar, det första fallet är en försiktig regulator och det andra en mer aggressiv, i båda fallen har dock integraltiden valts lång. I figur 7.24 visas avgasningsnivån och pumpspänningen, och i figur 7.25 visas konduktivitet och flöde uppströms för systemet.

Till att börja med kan det konstateras att nivån tillåts variera ganska mycket, men dessa variationer går inte att tydligt utläsa ur flödet, vilket innebär att de till viss del

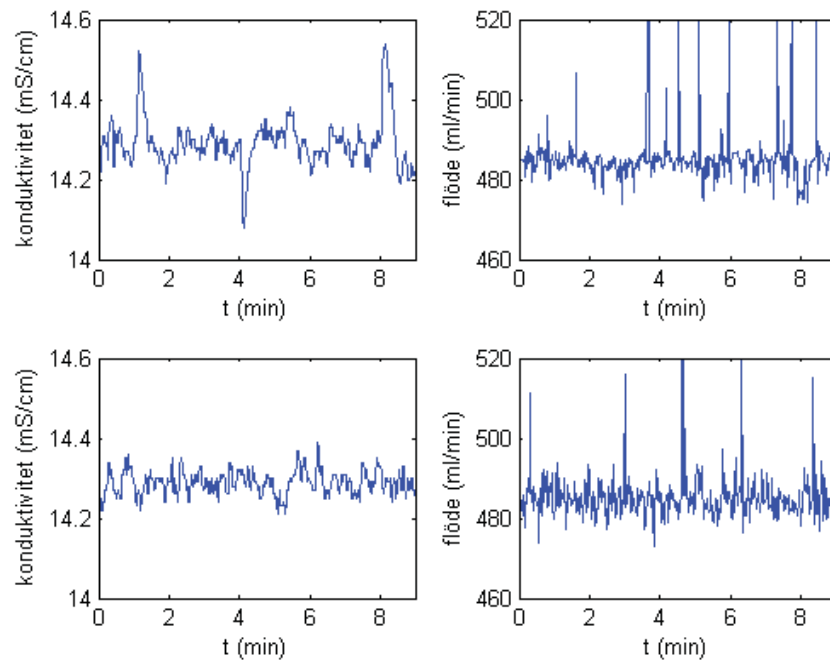


Figur 7.23 Konduktiviteten på dialysvätskan för de olika körningarna. Börvärdet är i samtliga fall 14.3 mS/cm.

måste bero på störningar av nivåmätningen. Allt är dock inte störningar, och anledningen till att de inte regleras ut är att regulatorernas integraltid valts ganska lång. Väljs den kortare regleras störningarna ut, men den resulterande konduktiviteten blir i princip likadan som med den nuvarande regleringen. Utseendet på konduktiviteten ser nämligen ut att vara något förbättrat nu, skillnaden är dock inte särskilt stor. För den första regulatorinställningen förekommer det stora spikar i signalen, vilket förmodligen beror på att det kommit in luftbubblor i konduktivitetscellen. Detta kan förmodligen förklaras med att avgasningen inte fungerar som det är tänkt när undertrycket är 100 mmHg för lågt. Studeras signalen mellan spikarna kan dock förbättringen skönjas, men den är avsevärt tydligare i det andra fallet.



Figur 7.24 Avgasningsnivå och pumpspänningssignalen för de två olika regulatorinställningarna. De övre diagrammen motsvarar en försiktig regulator, låg proportionell förstärkning och lång integraltid, medan de undre motsvarar en aggressiv regulator, hög förstärkning men fortfarande lång integraltid.



Figur 7.25 Konduktivitet och flöde uppströms för de två olika regulatorinställningarna. Simulering av fungerande omvänd reglering

Skillnaden mellan de båda studerade regulatorinställningarna är alltså aggressiviteten, vilket tydligt märks i pumpsignalen. Även i flödet kan skillnaden ses, då den aggressivare regulatoren ger ett brusigare flöde, men på konduktiviteten är dock effekten snarare den omvända. Förmodligen hade flödet för den aggressivare regulatoren förbättrats om nivåmätningen varit bättre, då mindre brus fortplantar sig till styrsignalen.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att den omvända reglerstrategin fungerar så som det var tänkt när strypventilen inte drabbas av kavitationsproblem. Ventilen kan ställas i ett läge utan att trycket varierar mer än vad som kan anses vara tillåtet, och behöver alltså knappt ändras alls. Pumpen klarar nu av att styra nivån, men för att erhålla ett förbättrat utseende på konduktiviteten måste nivån tillåtas att variera lite, dock ganska långsamt. Förbättringen är emellertid inte särskilt stor, och det kanske inte ens är den omvända regleringen som orsakat den. Det lägre avgasningstrycket som införts skulle också kunna tänkas vara orsaken, detta kanske medför gynnsammare förhållanden för bra reglering. För att kunna dra några riktiga slutsatser måste därför den befintliga strypventilen bytas ut mot en ny och tester med rätt avgasningstryck göras.

7.6 Störningar

Det förekommer en hel del störningar i dialysmaskinen, vilket är ganska väntat då det är en komplex maskin med många olika undersystem som är sammansatt till en enhet. För att kunna avgöra hur pass bra reglering som kan erhållas i avgasningssystemet är det därför lämpligt att studera störningarna och försöka klassificera dem, störningarna blir den begränsning som avgör hur pass bra det kan bli.

Flödet uppströms

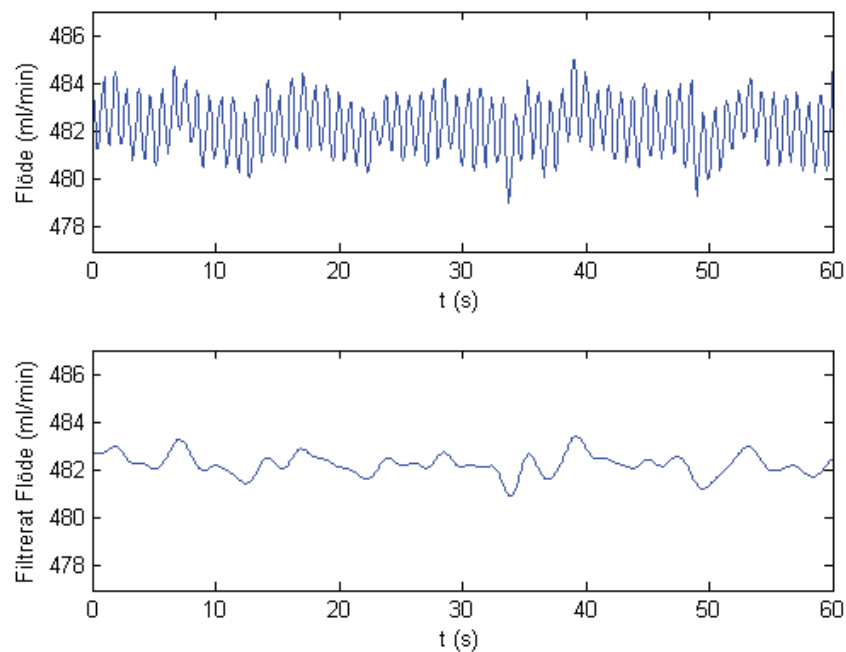
Gjorda mätningar av flödet visar ett tydligt periodiskt beteende som inte kan förklaras med ändringar av ventilläget, se de två undre diagrammen i figur 7.22. Den använda samplingstiden i den nämnda figuren är en sekund och den relativt långsamma svängningen är ett vikningsfenomen. Detta framgår tydligt då samplingstiden för flödesmätningen minskas, se det övre diagrammet i figur 7.26. För att ta reda på vilken frekvens det är kan en skattning av signalens spektrum göras, en sådan gjord med Welch metod med ett Hanningfönster [15] visas i figur 7.27. I spektrumet ses tydligt att det finns en dominerande komponent med frekvensen 1.05 Hz, att detta är den eftersökta inses lätt då t.ex. periodtiden på störningarna undersöks. Då samplingstiden är en sekund är samplingsfrekvensen 1 Hz, och därmed kommer den nu upptäckta frekvenskomponenten att vikas in i den långsammare samplade signalen. Vilken frekvens den får kan beräknas enligt (7.6) [22], där f är den fysiska frekvensen, f_{vik} den vikta frekvensen, f_s är samplingsfrekvensen och $f_N = f_s/2$ är Nyquistfrekvensen. Användning av formeln ger att den vikta frekvensen blir 0.05 Hz, vilket stämmer bra överens med den observerade frekvensen i figur 7.22.

$$f_{vik} = |(f + f_N) \bmod(f_s) - f_N| \quad (7.6)$$

Var den störande frekvensen härstammar ifrån är oklart. Trevägsventilen kan som sagt inte vara orsaken, då den inte ändrar sig periodiskt. Avgasningspumpen skulle kunna tänkas vara orsaken, och det skulle då handla om de enskilda kuggarna i den som ger upphov till fluktuationer av flödet, men den observerade frekvensen är alldeles för låg för att det ska vara denna effekt. Kvar finns pumpen som doserar koncentrat i dialysvätskan, denna snurrar med en ungefärlig frekvens på 1 Hz, och

det är därför rimligt att tro att det är den som orsakar den uppmätta störningen. Om totalflödet av dialysvätska är konstant kommer det varierande koncentratflödet (p.g.a. av den långsamma pumpningen) att orsaka ett varierande vätskeflöde, men eftersom doseringen sker nedströms från flödesmätningen är variationen kraftigt dämpad (koncentrat doseras ungefär med flödet 20 ml/min och den observerade flödesstörningen har en amplitud på 1 ml/min).

För att erhålla en mer rättvisande mätning av flödet bör signalen filtreras så att inverkan av störningen försvinner. Detta görs genom att sampla flödet med samplingstiden 100 ms och sedan skicka denna signal genom ett lågpasfilter. Den filtrerade signalen samplas sedan med samplingstiden en sekund. Jämför resultat i figur 7.22 och figur 7.28.



Figur 7.26 Ovan visas en mätning av flödet då samplingstiden varit 100 ms, vilket tydligt avslöjar en högfrekvent störning. Nedan visas en lågpasfiltrering av signalen, där filtret har designats så att frekvenser lägre än den störande frekvensen ska släppas igenom.

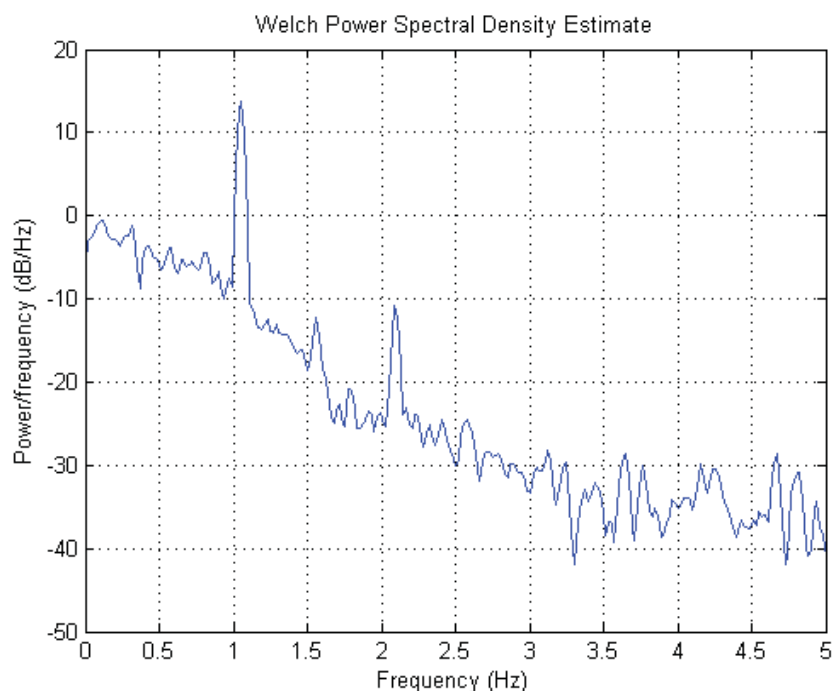
Avgasningsnivån

Nivån i avgasningskärlet mäts som tidigare nämnts genom att en ultraljudspuls skickas från kärlets botten och den tid det tar för den att komma tillbaka efter reflektion i vätskeytan ger nivån. Denna mätning blir väldigt brusig, med tanke på att det bildas vågor och skvalpar en hel del i kärlet. Detta motverkas något genom att mätningar görs ofta, med 10 ms mellanrum, och lågpasfiltreras enligt (7.7) innan de används i maskinen.

$$y_{fit}(t) = \frac{q^{-1}}{20 - 19q^{-1}}y(t) \quad (7.7)$$

Detta är ett första ordningens lågpasfilter som har en bandbredd¹ på 0.8 Hz. Det är tillräckligt för den samplingsfrekvens som används i maskinen (5 Hz), men då

¹Med bandbredd för lågpasfiltret menas den frekvens för vilket filtret ger förstärkningen -3 dB.

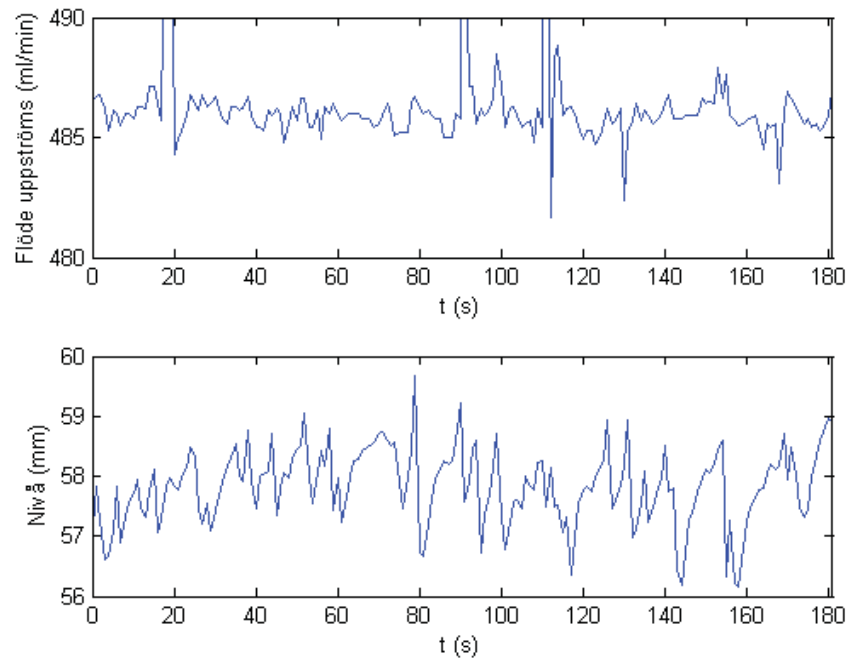


Figur 7.27 En skattning av flödessignalens spektrum gjord med Welch metod. En tydlig topp ses vid drygt 1 Hz och det är denna som tydligt kan observeras i flödet.

trevägsventilen styrs via en extern dator med en samplingsfrekvens på 1 Hz finns det risk för att höga frekvenser viks in som långsamma i mätsignalen. Detta skulle kunna vara en av förklaringarna till varför nivån drabbas av långsamma variationer när den regleras med trevägsventilen via en extern dator. Det inbyggda filtret borde justeras så att det får en högre ordning, och om samplingsfrekvensen ska ändras till 1 Hz måste även bandbredden ändras.

Trots filtreringen blir signalen väldigt brusig, och detta beror mycket på att det kommer in luft i strypventilen. Luftbubblor slås sönder i den trånga ventilen och med det undertryck som råder på den andra sidan om den expanderar fragmenten av den ursprungliga luftbubblan och ett bubbelmoln bildas i expansionskärlet, som är placerat direkt efter strypventilen. Detta kan lätt observeras och det är även lätt att höra. Fenomenet är vanligt förekommande och existerar inte bara i AK200-maskinen, utan även i de flesta andra dialysmaskiner. Luften verkar härstamma från koncentratdoseringen, men det skulle även kunna bero på att luft läcker in i systemet, vilket inte är otroligt med tanke på det stora undertryck som råder innan avgasningssystemet. Luften kan även tänkas komma från vattnet, vid uppvärmningen kan bubblor bildas som sätter sig på olika ställen och växer tills de släpper och följer med strömmen.

Det observerade bubbelmolnet fortplantar sig vidare från expansionskärlet via avgasningspumpen till avgasningskärlet, där det orsakar ännu mer skvalp än vanligt. Antalet bubbelmoln per minut är ungefär 10 och effekten av dem kan tydligt ses i nivåsignalen. Den blir väldigt spikig, störningarna är antagligen för kraftiga för att lågpasfiltreringen i maskinen ska lyckas eliminera dess effekt, se nedre delen av figur 7.28. I figuren ser man att inga tecken på att störningarna fortplantar sig till flödet, vilket rent intuitivt känns ganska rimligt. För att kunna erhålla en lugn reglering, som leder till ett lugnt flöde, går det alltså inte att reglera på nivåsignalen som den ser ut i dagsläget, utan någon form av filtrering måste appliceras.



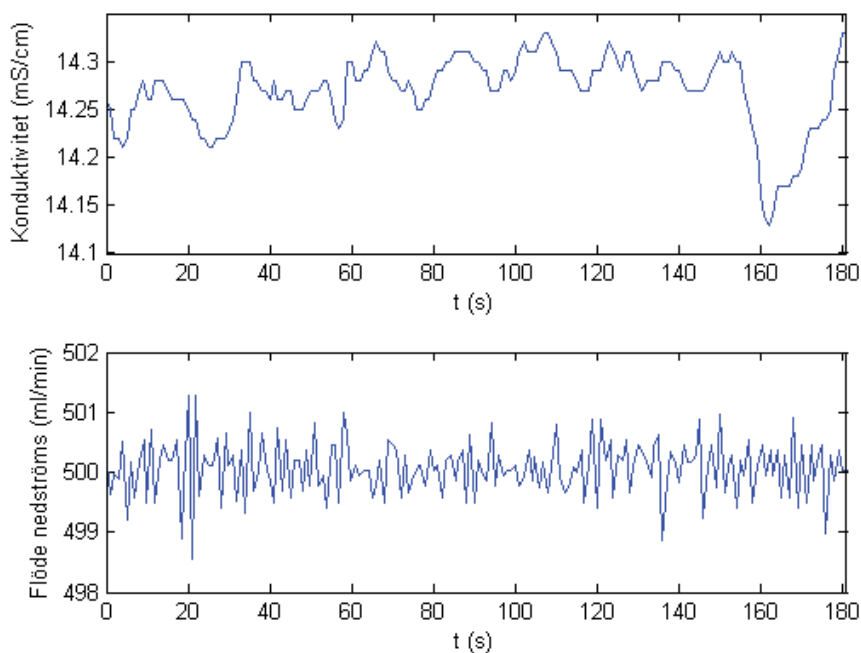
Figur 7.28 Överst visas flödet uppströms (filtrerat så att störningen med frekvensen 1.05 Hz inte inverkar). De stora spikarna (vid $t=20$, 90 och 110 s) motsvarar att luft kommit in i flödesmätaren. Nederst visas uppmätt nivå.

Konduktivitet

Studier av signalen från konduktivitetscellen visar att tre olika typer av störningar existerar. Den första och mest påtagliga är relativt snabba förändringar, med en periodtid på ungefär 20 sekunder. Dessa variationer ser inte ut att kunna förklaras av flödet, jfr figur 7.28 och 7.29. Doseringen av koncentrat utförs innan avgasningssystemet, ett större flöde uppströms bör därför leda till en minskning av konduktiviteten då samma mängd koncentrat blandas med en större mängd vätska och ett minskat flöde bör därför leda till en ökning av konduktiviteten. De små flödesvariationer som syns bör dock inte vara orsaken till de stora störningarna. Möjligen skulle det kunna tänkas att flödet inducerar små störningar som därefter förvärras av en dålig reglering av koncentratdoseringen, men detta måste utredas innan några sådana slutsatser kan dras. Konduktiviteten mäts efter avgasningssystemet och flödet genom mätcellen visas i den nedre delen av figur 7.29, inte heller härifrån kan störningarna förklaras.

Den andra typen av störningar är oförklarliga stora förändringar av konduktiviteten, se t.ex. vid $t=155$ s i figur 7.29. Inga stora förändringar i flödet är synbara och den enda tänkbara förklaringen skulle vara att det kommit in en luftbubbla i konduktivitetscellen, vilket vore märkligt då vätskan precis avgasats. Dessa störningar är ganska ovanliga men förekommer då och då.

Den sista typen av störningar är långsamma störningar med en periodtid i minutskala. Dessa långsamma förändringar beror förmodligen på flödet, då samma tendenser kan skönjas i båda signalerna. Även i nivån syns dessa långsamma förändringar, vilket borde möjliggöra en eliminering av dem. Problemet är dock den brusiga nivåsignalen som gör det svårt att upptäcka de långsamma förändringarna och därmed svårt att reglera ut dem. En bra skattning av nivån krävs alltså för att det ska vara möjligt att göra något.



Figur 7.29 Överst visas signalen från konduktivitetscellen under samma körning som illustreras i figur 7.28. Nederst visas flödet efter avgasningssystemet, där konduktivitetscellen är placerad.

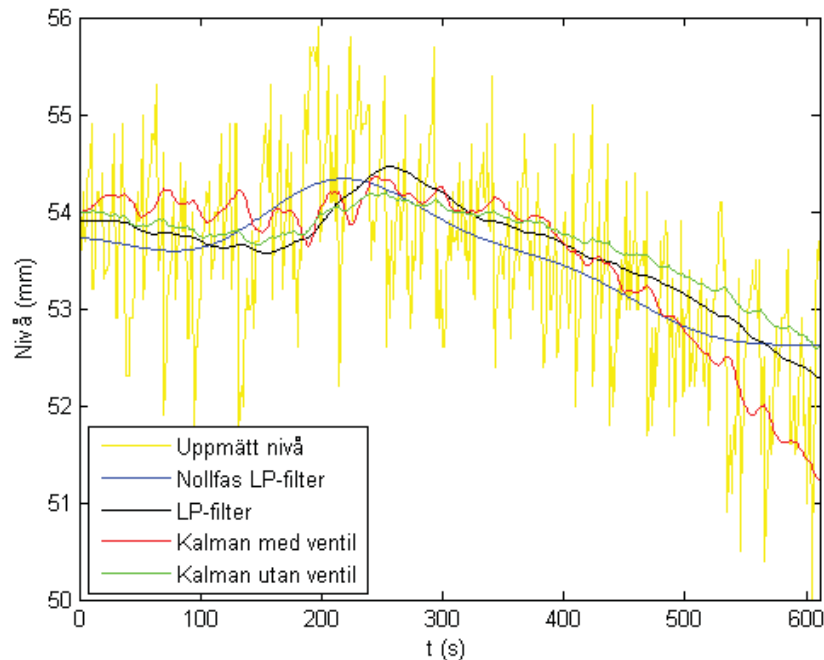
Bättre nivåmätning

Den nivåmätning som ges från maskinen är som tidigare nämnts lågpasfilterad, men stora störningar gör att den trots detta varierar väldigt mycket. I maskinen är regleringen ganska aggressiv och den försöker därmed att reglera ut störningarna. Detta är kanske anledningen till att så många ventilsteg behövs i regleringen. Det går dock inte att säga säkert att det är på det här sättet eftersom en ändring av ventilen i helsteg leder till stora flödesvariationer som i sin tur leder till variationer i nivån och dessa variationer kan dominera över störningarna.

Studeras signalen som ges från nivåmätningen ser man hur brusig den är, se figur 7.28. För att undvika en långsam variation måste denna upptäckas och för detta krävs någon form av filtrering. Ett alternativ är lågpasfiltrering, problemet med detta är dock att det introducerar en tidsfördröjning, som i sin tur kan leda till ännu fler störningar. Ett annat alternativ är att försöka sig på någon form av olinjärt filter, som känner igen störningarna och helt sonika plockar bort dem ur signalen. Försök att konstruera ett sådant har gjorts, men inget av dem har lyckats ge ett förbättrat resultat. Ytterligare ett alternativ är att använda en modellbaserad skattning med ett Kalmanfilter. Den tidigare identifierade modellen kan användas och då kan även ventilländringarna vara en del av skattningen.

Resultatet av några olika försök till filtrering visas i figur 7.30. Här ser man att klart bäst skattning erhålls när ett lågpasfilter utan fasförskjutning appliceras, detta är dock bara möjligt när all data är känd och är alltså inget alternativ för användning i maskinen. Av de övriga metoderna kan konstateras att vanlig lågpasfiltrering ger bäst resultat. Kalmanfiltreringen ger inte en lika jämn signal som lågpasfiltreringen och används ventilläget som insignal försämrar utseendet ytterligare. Kalmanfiltret kan designas så att signalen blir jämnare, men då blir följden långsammare följning,

det tar tid innan filtret reagerar på nivåändringar.



Figur 7.30 Den uppmätta nivåsignalen tillsammans med olika typer av filtrering.

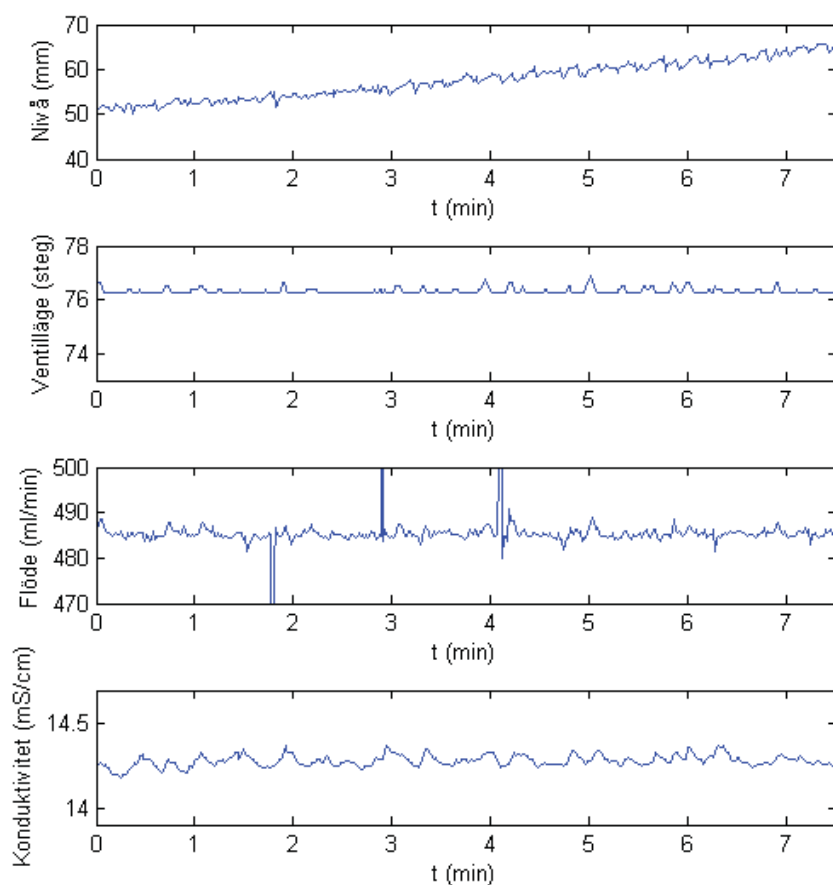
Ett genomgående drag för de olika filtreringsteknikerna är att de introducerar en stor tidsfördröjning, jämfört med filtret utan fasförskjutning ser man att fördröjningen är över 30 sekunder. Detta kommer oundvikligen att leda till oscillationer om reglering sker mot en sådan signal. För att förbättring ska kunna erhållas måste fördröjningen kapas, och detta görs nog enklast om nivån filtreras hårdare i maskinen. Den nuvarande filtreringen är ett första ordningens lågpasfilter, om detta uppgraderas till ett av andra ordningen och brytfrekvensen dessutom sänks skulle en acceptabel signal kanske kunna erhållas.

Möjligheter finns även att använda någon form av prediktiv reglerstrategi, och kompensera för tidsfördröjningen. Den enklaste varianten är att använda en PID-regulator istället för en PI-regulator.

PID-reglering av trevägsventilen

Testkörning på dialysmaskinen med PID-reglering har utförts, se figur 7.31. Nivåsignalen har skickats genom ett andra ordningens lågpasfilter med brytfrekvensen 0.05 Hz (periodtid på 20 sekunder). Integraltiden i regulatorn har valts väldigt lång, vilket har gjort att det i praktiken har handlat om en PD-regulator.

Att integraltiden är väldigt lång syns tydligt på att nivån driver iväg från börvärdet på 50 mm. Studeras ventilläget kan några tydliga toppar ses, då regulatorn har försökt att förhindra nivån från att ändra sig för snabbt. Dessa toppar kan även på vissa ställen ses i flödet och därför borde också konduktiviteten ha påverkats, men så verkar inte vara fallet. Konduktiviteten drabbas av samma typ av störningar som tidigare observerats och signalen är jämbördig med hur den ser ut i dagsläget, ingen märkbar förbättring har alltså erhållits.

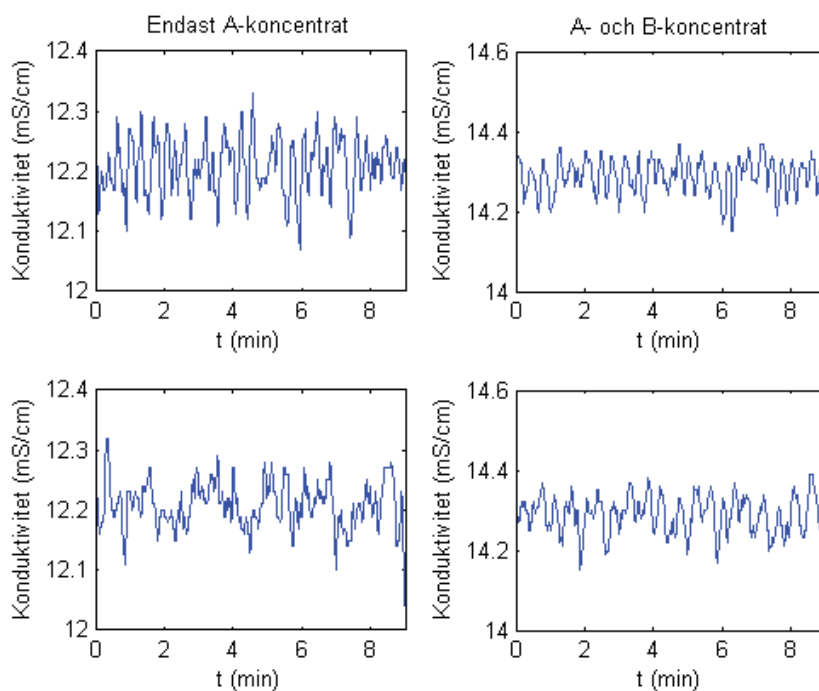


Figur 7.31 Nivå, ventilläge, flöde och konduktivitet då ventilen styrts av en PID-regulator. Innan nivån skickats till regulatorn har en låpassfiltrering utförts.

7.7 Konduktivitet vid bikarbonatkörning

All data för konduktiviteten som hittills har presenterats har varit från körningar då endast ett koncentrat har använts, acetatkörningar. Det normala vid dialysbehandling är dock att två koncentrat används, acetat här ersatt av bikarbonat. Båda koncentraten indoseras före avgasningssystemet och för att undersöka om det förbättrade flödet har gett någon förbättring av konduktiviteten har en testkörning gjorts. Resultatet av denna återfinns i figur 7.32.

Den förbättrade flödesregleringen lyckas plocka bort en del snabba förändringar i konduktiviteten för dialysvätskan då A-koncentratet doserats, men långsamma förändringar kvarstår. För konduktiviteten då båda koncentraten doserats är det svårt att se om det skett någon förändring, då signalerna väldigt mycket liknar varandra. Man kan alltså konstatera att trots att flödet förbättrats har detsamma inte blivit fallet med konduktiviteten, oavsett om ett eller två koncentrat används.

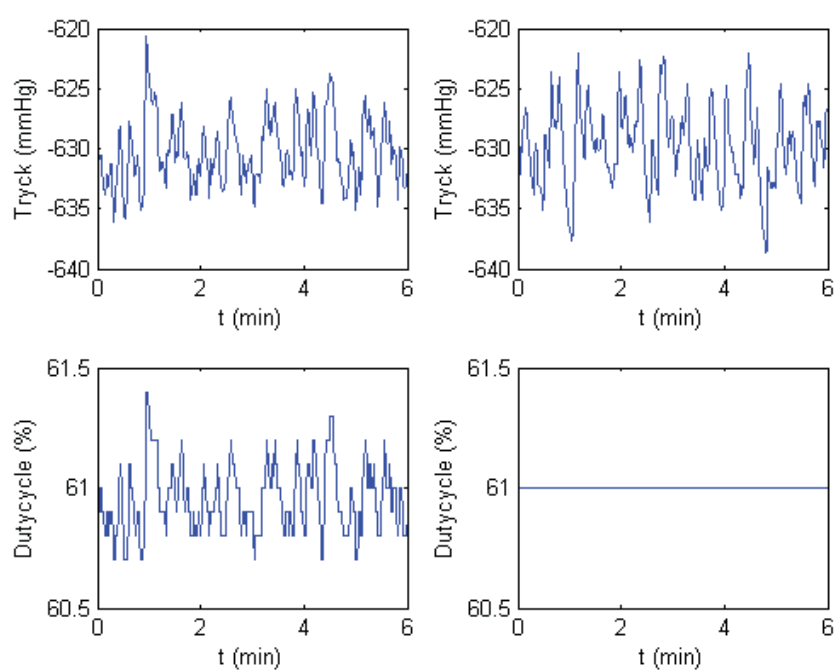


Figur 7.32 De övre diagrammen visar konduktiviteten med nuvarande reglering (med ventilen i helsteg) och de undre visar då ventilen styrts med åttondels steg. A-koncentratet består av samtliga salter förutom bikarbonat, som istället finns i B-koncentratet.

7.8 Pumpreglering

I den nuvarande reglerstrategin styr pumpen undertrycket. Detta görs med en ganska aggressiv PI-regulator, vilket visat sig inte vara nödvändigt. I figur 7.33 visas signalen till pumpen och det resulterande trycket för dels den nuvarande PI-regulatorn och dels för en mycket lugnare PI-regulator. Trycket varierar kanske något mer för den lugnare regulatorn, men signalen som skickats till pumpen skiljer sig desto mer. Pumpen bör må betydligt bättre av att få en konstant styrsignal. Dessutom kan det vara så att en väldigt ryckig pumpsignal kan påverka flödet negativt, någon sådan koppling har dock inte gjorts.

Tester har endast gjort då ventilen styrts med åttondels steg, men förmodligen är resultatet liknande då ventilen styrs med helsteg.



Figur 7.33 Till vänster visas tryck och pumpsignal med maskinens nuvarande reglerstrategi och till höger visas motsvarande signaler med den nya reglerstrategin.

8. Diskussion

Målet med examensarbetet har varit att genom att ändra regleringen av avgasnings-systemet förbättra utseendet på flödet uppströms. Ett antal olika alternativ har föreslagits och de testkörningar som har varit möjliga att göra har utförts.

Den enskilt största orsaken till att flödet uppströms varierar har visat sig vara ändringar av trevägsventilens inställning, åtminstone om den som i maskinen styrs med helsteg. Ett första sätt att erhålla ett bättre flöde uppströms är därför att undvika att använda ventilen i den mån det bara går. Resultatet blir en avgasningsnivå som långsamt driver antingen upp eller ner. Flödet ändrar sig nästan momentant då ventilläget ändras, men mellan ventillägesändringarna är flödet i princip konstant och detta är en klar förbättring mot hur det såg ut tidigare. Målet med att förbättra utseendet på flödet har varit att erhålla en stabilare konduktivitet på dialysvätskan, men då flödet ändras i steg drabbas konduktiviteten av stora störningar. Konduktivetsregleringen försöker att kompensera för flödesändringen men hinner knappt nå tillbaka till börvärdet innan flödet p.g.a. av en ventillägesändring ändras igen. Med den nuvarande konduktivetsregleringen är alltså den föreslagna reglerstrategin inget bra alternativ, men om en framkoppling från ventillägesändring till konduktivetsreglering kan implementeras kan den tänkas vara ett alternativ. Problemet är dock att det förekommer störningar på konduktiviteten som med största sannolikhet inte härstammar från avgasningssystemet och för att erhålla en ordentlig förbättring på konduktiviteten måste effekten av dessa störningar elimineras.

Ett alternativ till att undvika ändringar av trevägsventilen är att minska varje ändrings påverkan på flödet. Detta är möjligt genom att öka upplösningen på den stegmotor som styr ventilen. Genom att styra stegmotorn med flera strömnivåer kan varje steg delas upp i åtta delsteg. För att göra detta möjligt i dialysmaskinen måste ändringar i elektroniken göras, vilket inte har varit möjligt. Däremot har det varit möjligt att styra stegmotorn med en dator via en extern drivkrets. Sådana testkörningar har gjorts och de visar ett flöde som förbättrats väldigt mycket. En ventillägesändring ger nu en knappt märkbar ändring av flödet och det som istället begränsar hur stabilt flödet kan bli är mätningen av avgasningsnivån. Denna påverkas av stora störningar, som huvudsakligen orsakas av vågbildning i avgasningskärlet men även av att det kommer in luft i avgasningssystemet. Mätningen lågpasfilteras i maskinen, men detta filter är anpassat till den i maskinen använda samplingsfrekvensen, då ventilen styrs externt måste samplingen göras långsammare och risker finns därför att snabba frekvenser viks in som långsamma i den använda mätsignalen. Filtret i maskinen är av första ordningen, vilket inte är tillräckligt då störningarna ger en signal som är väldigt taggig och ojämn, ett högre ordningens filter vore alltså önskvärt. Filtret i maskinen har inte kunnat ändras, men ytterligare filtrering har kunnat appliceras i datorn vid den externa styrningen av trevägsventilen, men det leder till en stor tidsfördröjning. Försiktig PI-reglering med den i maskinen lågpasfilterade mätsignalen och PID-reglering av den två gånger lågpasfilterade signalen ger likvärdiga resultat, ett flöde som är konstant förutom vissa små avvikelser. För PI-regulatorn beror avvikelserna förmodligen på att den reagerar på en störning och för PID-regulatorn är det snarare tidsfördröjningen som är orsaken. Utseendet på konduktiviteten är i princip likadant i bägge fallen och jämfört med den nuvarande implementationen i dialysmaskinen är ingen skillnad synlig för blotta ögat.

Ett ytterligare sätt att minska påverkan på flödet av ventillägesändringar är att byta arbetsområde för trevägsventilen. Experiment har visat att den nästan är linjär för ventillägen kring mitten av arbetsområdet och när man närmar sig ytterlägena blir

ventilen allt mer olinjär. Arbetsområdet bestäms av flödet i avgasningssystemet och detta påverkas genom valet av strypventil. På den undersökta labuppställningen har ett förbättrat flöde kunnat visas, i dialysmaskinen har dock inga tester kunnat göras.

Anledningen till att ventilen måste ligga och arbeta för att hålla nivån konstant är för att det inte finns något ventilläge som ger rätt flöde vid rätt undertryck. Simulering visar att det går att justera dialysvätskeflödet, dvs. utflödet från avgasningskammaren, så att ett visst ventilläge blir rätt. Testkörningar på dialysmaskinen har dock visat att avvikelser från det rätta ventilläget varierar, men det finns tecken som tyder på att variationen är ett insvängningsförlopp, vilket skulle underlätta kompenseringen. Dialysvätskeflödet kan tänkas vara tillåtet att ändras kontinuerligt i maskinen, bara variationen är långsam och ändringarnas amplitud inte är alltför stora. Några tester i dialysmaskinen har dock inte kunnat göras.

Vid examensarbetets början var ett alternativ att vända på regleringen, så att pumpen styr nivån och ventilen styr trycket. Tanken var att det nu skulle gå att hitta ett stabilt läge som gav en konstant nivå och ett tryck som låg i närheten av det givna börvärdet. Med den nuvarande strypventilen visade detta sig dock vara svårt att implementera, då den med stor sannolikhet drabbas av kavitation då undertrycket och flödet blir högt. Flödet genom den blir i princip konstant för alla stora undertryck. Den i dialysmaskinen tänkta arbetspunkten befinner sig just i detta område och pumpen kan därför inte påverka flödet särskilt mycket. Reglerstrategin är dock lovande och experiment med lite olika strypventiler har visat att om diametern på ventilen ökas kan det oönskade området flyttas, och genom att ändra strypventilens längd kan förmodligen samma strypning erhållas vid liknande flöden. Om det går att flytta området tillräckligt mycket har inte kunnat testas, då inte tillräckligt många olika strypventiler har funnits tillgängliga.

Den regulator som styr trycket med pumpen i den nuvarande implementationen är ganska aggressiv. Tester har visat att denna regulator kan göras betydligt lugnare utan att utseendet på trycksignalen försämras särskilt mycket. Den stora vinsten är att styrsignalen till pumpen blir nästan konstant och ändras knappt inte alls.

8.1 Möjliga åtgärder för att erhålla bättre flöde och konduktivitet

1. Designa om strypventilen, görs den längre och större kan ett fördelaktigare samband mellan tryck och flöde erhållas. Även vilket arbetsområde trevägsventilen hamnar i kan påverkas.
2. Ändra stegmotorstyrningen från helsteg till åttondels steg, då varje stegändring då ger betydligt mindre effekt på flödet.
3. Förbättra filtreringen av nivåsignalen, få en bättre mätning och se till att inte höga frekvenser viks in i den signal som används för styrning.
4. Låt utflödet avvika från 500 ml/min, detta kompenserar att trevägsventilen är kvantiserad.
5. Testa omvänd reglering (kräver att punkten 1. är uppfylld), upplösningen på regulatorns integraldel kan behöva ökas.
6. Konduktivitsregleringen behöver anpassas efter den nya flödesregleringen, den nuvarande implementeringen är gjord för stora flödesvariationer.
7. Styr ventilen så att nivån tillåts driva och med en framkoppling justera koncentratdoseringen då ventilläget behöver ändras.

9. Litteraturförteckning

- [1] *Nationalencyklopedin*. Bra böcker, 1994. Band 14, uppslagsord: njure.
- [2] *Gambro Basics*. Gambro, 1997.
- [3] J. T. Daugirdas, P. G. Blake, och T. S. Ing. *Handbook of Dialysis*. Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
- [4] Gambro. "The Gambro Story." <http://www.gambro.com/int/About-Gambro/The-Gambro-Story/>. Besökt 21 oktober 2009.
- [5] Gambro. *AK200 Service Education/Basic Course*, 1999.
- [6] Gambro. *AK200S Technical Description*, 2003.
- [7] Gambro. *AK200S Handhavandemanual Programversion 9.xx*, 2007.
- [8] Gambro. "Introduction to Gambro." General Presentation. 2009.
- [9] T. Glad och L. Ljung. *Reglerteori - Flervariabla och olinjära metoder*. Studentlitteratur, 2007.
- [10] T. Glad och L. Ljung. *Reglerteknik - Grundläggande teori*. Studentlitteratur, 2008.
- [11] W. H. Hörl, K. M. Koch, R. M. Lindsay, C. Ronco, och J. F. Winchester. *Replacement of renal function by dialysis*. Kluwer Academic Publishers BV, 2004.
- [12] R. Johansson. *Predictive and Adaptive Control*. Institutionen för Reglerteknik, LTH, Lunds Universitet, 2008.
- [13] R. Johansson. *System Modeling & Identification*. Institutionen för Reglerteknik, LTH, Lunds Universitet, 2009.
- [14] H. Klinkmann. "Renal Therapy in Lund: Homage to Dr. Nils Alwall." <http://www.hdcn.com/symp/lund/klin.htm>. Besökt 21 oktober 2009.
- [15] G. Lindgren och H. Rootzén. *Stationära stokastiska processer*. Matematisk Statistik, Matematikcentrum, LTH, Lunds Universitet, 2005.
- [16] H. Madsen. *Time Series Analysis*. Chapman & Hall/CRC, 2008.
- [17] Nanotec. "Stepper motor - Animation." http://en.nanotec.com/steppermotor_animation.html. Besökt 5 november 2009.
- [18] B. Rippe. "Hypertension, Dialysis & Clinical Nephrology, Nordiska njurdagar, selected lectures." <http://www.hdcn.com/symlund.htm>. Besökt 21 oktober 2009.
- [19] Z. Technologies. "Stepper Motor Microstepping Tutorial." <http://knol.google.com/k/zaber-technologies/stepper-motor-microstepping-tutorial/108cmw9-eh3e0t/3#>. Besökt 16 september 2009.
- [20] H. Westling. "Nils Alwall, den konstgjorda njuren och Gambro." http://www.med.lu.se/om_fakulteten/fakultetens_milstolpar/nils_alwall. Besökt 21 oktober 2009.
- [21] F. M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2008.

- [22] B. Wittenmark, K. J. Åström, och K.-E. Årzén. *Computer Control: An Overview, Educational Version 2008*. Institutionen för Reglerteknik, LTH, Lunds Universitet, 2008.

A. Identifierade modeller

A.1 Labsystemet

MIMO¹-modell

Modellen identifieras i avsnitt 6.7. Den är på tillståndsform enligt (A.1), där den första insignalen är pumpspänningen och den andra är ventilläget, den första utsignalen är nivån och den andra är trycket. Matriserna (med standardavvikelser) enligt (A.2)-(A.6) och variansen hos det vita bruset $e(t)$ ges av (A.7). Samplingstiden h är 0.4 sekunder.

$$\begin{cases} x(t+h) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.8043(\pm 0.049) & 1.8034(\pm 0.049) \\ 0 & 0 \\ -5.6494(\pm 1.5) & 5.6928(\pm 1.5) \\ 0 & 0 \\ 0.001378(\pm 0.00047) & -0.002022(\pm 0.00065) \\ 0 & 1 \\ -0.4851(\pm 0.016) & 1.4273(\pm 0.024) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.03455(\pm 0.024) & 0.2422(\pm 0.044) \\ -0.001725(\pm 0.015) & 0.2668(\pm 0.04) \\ -58.78(\pm 0.84) & 1.672(\pm 1.4) \\ -32.33(\pm 0.57) & -0.1268(\pm 0.82) \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.9019(\pm 0.046) & -0.01378(\pm 0.00071) \\ 0.9997(\pm 0.054) & -0.002323(\pm 0.00099) \\ 3.974(\pm 1.4) & 0.9467(\pm 0.028) \\ 6.518(\pm 1.7) & 0.8336(\pm 0.039) \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{var}(e(t)) = \begin{bmatrix} 0.0020 & 0.0029 \\ 0.0029 & 3.4725 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

¹MIMO = Multiple Input Multiple Output - Flera insignaler och flera utsignaler

SISO²-modeller

Pump till tryck Modellen identifieras i avsnitt 6.8 och är ARMAX-modell enligt (A.8), polynomens koefficienter (med standardavvikelser) ges enligt tabell A.1 och variansen för det vita bruset $e(t)$ ges av (A.9). Samplingstiden h är 0.4 sekunder.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-1}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad (\text{A.8})$$

a_0	a_1	a_2
1	-0.7098 (± 0.0127)	0.1252 (± 0.0125)
b_0		c_0
-55.25 (± 0.745)		1
c_1	c_2	c_3
0.04666 (± 0.0521)	0.04066 (± 0.0510)	0.221 (± 0.0507)

Tabell A.1 Polynomkoefficienter till modellen (A.8).

$$\text{var}(e(t)) = 5.618 \quad (\text{A.9})$$

Ventil till nivå Modellen identifieras i avsnitt 6.8 och är en ARMAX-modell enligt (A.10), där parametern k är en skalparameter som motsvarar termen T_s/A i (6.9) och dess värde ges i (A.11), polynomens koefficienter (med standardavvikelser) ges enligt tabell A.2 och variansen för det vita bruset $e(t)$ ges av (A.12). Samplingstiden h är 0.4 sekunder.

$$A(q^{-1})(1 - q^{-1})y(t) = k \cdot q^{-2}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad (\text{A.10})$$

$$k = 0.0212 \quad (\text{A.11})$$

a_0	a_1	a_2
1	-0.4546 (± 0.00542)	0.1549 (± 0.00632)
a_3		b_0
-0.03648 (± 0.00418)		11.45 (± 0.0519)
c_0	c_1	c_2
1	-0.08408 (± 0.0568)	0.3661 (± 0.0573)

Tabell A.2 Polynomkoefficienter till modellen (A.10).

$$\text{var}(e(t)) = 0.0945 \quad (\text{A.12})$$

²SISO = Single Input Single Output - En insignal och en utsignal

A.2 Dialysmaskinen

Pump till tryck

Modellen identifieras i avsnitt 7.3 och är en ARX-modell enligt (A.13), polynomens koefficienter (med standardavvikelse) ges enligt tabell A.3 och variansen för det vita bruset $e(t)$ ges av (A.14). Samplingstiden h är 1 sekund.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-1}B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (\text{A.13})$$

a_0	a_1	a_2
1	-1.101 (± 0.0624)	0.2205 (± 0.0566)
b_0	b_1	
-1.442 (± 0.179)	-0.7687 (± 0.248)	

Tabell A.3 Polynomkoefficienter till modellen (A.13).

$$\text{var}(e(t)) = 2.8790 \quad (\text{A.14})$$

Ventil till nivå

Modellen identifieras i avsnitt 7.3 och är en ARX-modell enligt (A.15), polynomens koefficienter (med standardavvikelse) ges enligt tabell A.4 och variansen för det vita bruset $e(t)$ ges av (A.16). Samplingstiden h är 1 sekund.

$$A(q^{-1})(1 - q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (\text{A.15})$$

a_0	a_1	a_2
1	-1.512 (± 0.0350)	0.8029 (± 0.0269)
b_0	b_1	
-0.03038 (± 0.00415)	-0.002678 (± 0.00453)	

Tabell A.4 Polynomkoefficienter till modellen (A.15).

$$\text{var}(e(t)) = 0.0014 \quad (\text{A.16})$$

Pump till nivå

Modellen identifieras i avsnitt 7.3 och är en ARX-modell enligt (A.17), polynomens koefficienter (med standardavvikelse) ges enligt tabell A.5 och variansen för det vita bruset $e(t)$ ges av (A.18). Samplingstiden h är 1 sekund.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (\text{A.17})$$

$$\text{var}(e(t)) = 0.0926 \quad (\text{A.18})$$

a_0	a_1	a_2
1	-1.027 (± 0.0647)	0.3632 (± 0.0433)
b_0	b_1	
0.481 (± 0.0338)	-0.1072 (± 0.0525)	

Tabell A.5 Polynomkoefficienter till modellen (A.17).