

Modellering og regulering af et konstrueret pneumatisk system til håndtering af fødevarer

School of Engineering and Science
Mechanical and Manufacturing Engineering

16. Januar 2014
Mads Vang



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

I samarbejde med:
 **Nordland**
automatic a/s



▪ Fibigerstræde 16 ▪ DK 9220 Aalborg Ø ▪

Titel: Modellering og regulering af et konstrueret pneumatisk system til håndtering af fødevare

Tema: Specialisering for Diplomingeniør ved Industri og produktion

Projekt periode: 4.nov 2013 til 16. januar 2014

Virksomhed: Nordland Automatic A/S, Kummerowsvej 3, 9400 Nørresundby

Deltagere:

Synopsis

Mads Vang

Universitets vejledere:

Sigurd Villumsen

Institut for Mekanik og Produktion

Ewa Kristiansen

Institut for Mekanik og Produktion

Oplag: 5 stk.

Antal sider: 58

Afleveret: 16-01-2014

Dette projekt omhandler udviklingen af en regulering til at styre vakuumtrykket på et pneumatisk system, der anvendes til håndtering af fødevare.

På systemet anvendes der vakuumejektorer, som skaber et stort tryktab i systemet. Dette tryktab er skyld i at andre komponenter i systemet ikke virker korrekt.

Til udviklingen af reguleringen, er der konstrueret en testopstilling, som gengiver problemstillingen fra det virkelige system. Herefter er der anvendt "black box" metoden til at modellere et matematisk model til gengivelse af testopstillingens opførsel. Der er endvidere udviklet en PI-Regulering på baggrund af denne model og reguleringen er herefter implementeret på systemet med en programmerbar microcontroller som styreenhed.

Ved at underskrive dette dokument bekræfter hvert enkelt gruppemedlem, at alle har deltaget lige i projektarbejdet og at alle således hæfter kollektivt for rapportens indhold.

FORORD

Dette er en specialiserings opgave i forbindelse med uddannelsen til diplom ingeniør inden for industri og produktion ved Aalborg universitet.

Opgaven er lavet i samarbejde med virksomheden Nordland Automatic A/S, der har været yderst hjælpsomme under processen. Både når det gælder et behov for fysiske komponenter, men også i forbindelse med sparring med de forskellige medarbejdere. Denne sparring har været en meget stor hjælp. Derfor en stor tak til virksomheden og alle medarbejderne.

Teknisk sælger Lars Sejling Nielsen fra Festo, har også været en stor hjælp, særligt i forhold til udlåning af sensorer til systemet.

I teksten er kilder angivet med Harvard metoden, dvs. kilder er angivet i teksten med forfatter og årstal i en firkantet klamme. Bagerst i rapporten er litteraturlisten vist, hvor al den anvendte litteratur kan findes. Figurer og tabeller er angivet med to tal. Første tal angiver hvilket kapitel/appendiks figuren eller tabellen er placeret i, og det andet angiver hvilket nummer figuren eller tabellen har i det pågældende kapitel.

I rapportens bilag [E.6](#) findes en elektronisk kopi af denne rapport.

God fornøjelse.

Mads Vang

INDHOLD

Forord	v
Indhold	vii
Nomenklaturliste	ix
1 Indledning	1
2 Problemanalyse	3
3 Problemformulering	9
4 Simplificering af problemet	11
4.1 Konstruktion af Testopstillingen	11
4.2 Programmering dataopsamlingsudstyr	21
4.3 Forsøgsudførelse	23
5 Modellering af systemet	31
5.1 Metoden og Teorien om System identification	32
5.2 Anvendelse af System Identification	33
5.3 Analyse af model	38
6 Udvikling af regulering	41
6.1 Regulator type	41
6.2 Udvikling af regulering	44
6.3 Klargøring til implementering af regulering	47
6.4 Implementering af regulering	51
7 Konklusion	53

8 Perspektivering	55
Litteratur	57
A Pneumatisk diagram	59
B El diagram	61
C PLC Ladder diagram	63
D Arduino kode for regulering	65
E CD	69
E.1 Datablade på pneumatiske komponenter	69
E.2 Måledata	69
E.3 Arduino programmer	70
E.4 PLC program	70
E.5 Måledata - med regulering	70
E.6 Elektronisk kopi af rapport	70

NOMENKLATURLISTE

Symbol	Beksrivelse	Enhed
A	Areal	$[m^2]$
a	Acceleration	$[\frac{m}{s^2}]$
F	Kraft	$[N]$
F_{cylmax}	Kraft	$[N]$
f_s	Frekvens	$[Hz]$
g	Tyngde acceleration	$[\frac{m}{s^2}]$
GM	Gain margin	$[dB]$
K_i	PI konstant	
K_p	Pi konstant	
M	Masse	$[Kg]$
m_{byrde}	Masse	$[Kg]$
P	Tryk	$[Pa]$
$P0$	Tryk	$[Bar]$
$P1$	Tryk	$[Bar]$
$P2$	Tryk	$[Bar]$
$P3$	Tryk	$[Bar]$
$P3_{ref}$	Tryk	$[Bar]$
PM	Fase margin	$[deg]$
$PR0$	Tryk	$[Bar]$
PM	Fase margin	$[deg]$
$PR0$	Tryk	$[Bar]$

Symbol	Beksrivelse	Enhed
s	Laplace operator	
T	Tid	[s]
t	Tid	[s]
y	Afstand	[m]
z	Diskret operator	
ϕ_m	Vinkel	[deg]
θ	Vinkel	[deg]
ω_1	Frekvens	$[\frac{rad}{s}]$
ω_s	Frekvens	$[\frac{rad}{s}]$
ω_{bw}	Frekvens	$[\frac{rad}{s}]$

INDLEDNING

I Danmark har produktionsvirksomhederne stadig større og større fokus på automatiserede løsninger, der kan øge virksomhedernes konkurrenceevne [Sørensen, 31. aug 2012].

Automations løsninger, afhænger meget af hvilken virksomhed, og ikke mindst den proces, en virksomhed ønsker automatiseret. Når en proces skal automatiseres, er det ofte attraktivt at anvende allerede kendte teknologier, til løsning af forskellige elementer. Her vinder robotter mere og mere ind, da det er en anerkendt teknologi der er meget alsidig til løsning af mange forskellige problemstillinger.

Det samme gælder vakuum teknologien, der også vinder større og større indpas i forskellige automatiserede løsninger.

Praktikopholdet i forbindelse med uddannelsen til diplomingeniør inden for industri og produktion hos Nordland Automatic A/S som udvikler automations løsninger, bød på mange udfordringer netop med anvendelsen af vakuum teknologi.

På en af løsningerne der sig problemer i form af et stort tryktab, ved anvendelsen af vakuum generende komponenter. Med baggrund i disse problemer opstod ideen til at analysere problemet og ved hjælp af reguleringsteknik, forsøge at løse dette problem, således der ikke var nødvendigt at udskifte en lang række komponenter.

Derudover var lærings processen også meget attraktiv, i det en sådan løsning ville kræve mange forskellige ingeniørmæssige kompetencer.

PROBLEMANALYSE

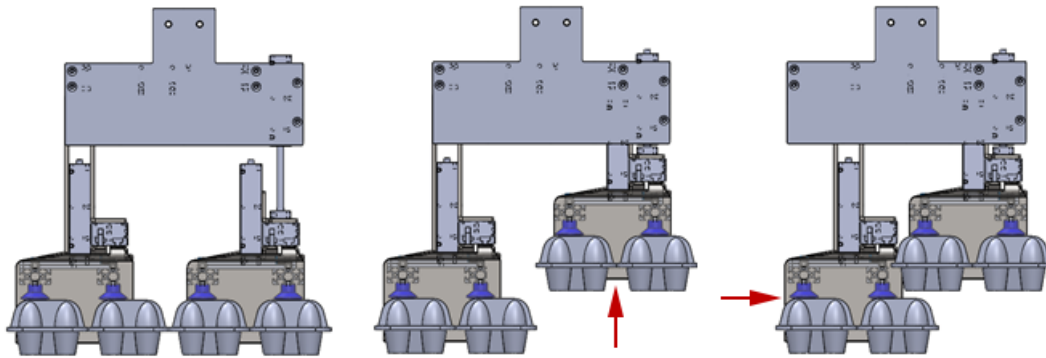
Hos virksomheden Nordland Automatic A/S har man udviklet et robotværktøj der kan gribe en række forskellige æggebakker typer i forskellige konfigurationer. På robothovedet anvendes der sugekopper samt gribere, til at holde æggebakkerne. Ved én af konfigurationerne, skal værktøjet gribe fire æggebakker på én gang og herefter placere dem i et stålbur som vist på figur 2.1.



Figur 2.1: Stålbur til pakning af æggebakker

Burene kan på grund af slid og grov håndtering, variere i bredden. På en række bure er bredden målt til at ligge mellem 380[mm] og 400[mm]. Når robotværktøjet griber de fire æggebakker fra transportbåndet, har de tilsammen en bredde på 420[mm]. De fire æggebakker, skal altså placeres i et stål bur der er op mod 40[mm] mindre end bakkernes samlede bredde.

For at imødekomme denne problemstilling, udviklede Nordland Automatic A/S et robothoved, der ved hjælp af flere pneumatiske cylinder gjorde det muligt at komprimere æggebakkernes bredde under nedkørsel i buret til 360[mm]. Ved aflevering, bliver de fire æggebakker fysisk presset ud til burets sider og samtidig trykket ud af robothovedet, således de tvinges på plads i stål buret. På figur 2.2 vises konceptet af griberen og hvorledes den reducerer bredden af æggebakkerne.



- (a) Robotten aktivere vakuum som ansuger æggebakkerne. Samt gribere skydes ind på siderne af bakkerne.
- (b) Ved hjælp af en pneumatisk cylinder hæver robothovedet to bakker 80mm
- (c) Når bakkerne er hævet, skyder robothovedet de to nederste bakker ind under de to hævede.

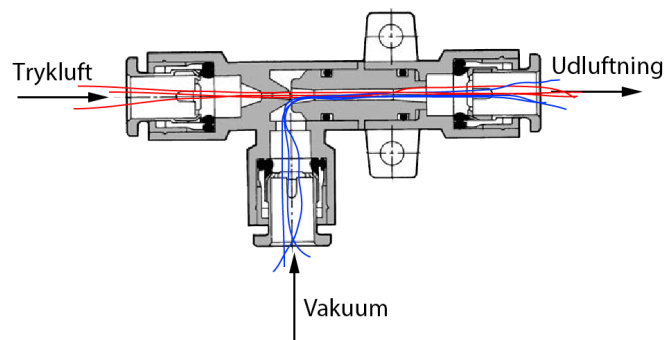
Figur 2.2: Robothovedets bevægelser for at kunne minimere æggebakkernes bredde.

Det viste sig imidlertid, at bevægelsen der beskrives på figur 2.2b ikke altid kunne udføres korrekt. Cylinderen havde ikke konsekvent kræfter nok til at løfte byrden, og det varierede hvor højt æggebakkerne blev løftet op. Dette var på trods af at cylinderen teoretisk var stærk nok. Undersøgelser af problemet har vist at problemet kun opstod mens vakuum var aktiveret.

Hos Nordland Automatic blev problemet, med at cylinderen ikke altid kunne hæves, løst ved en omkonstruktion af værktøjet, således det var muligt at montere en større cylinder. Dette ændre dog ikke interessen i problemet, da det er en spændene problemstilling og en løsning sandsynligvis kan have anvendelse i kommende projekter hos Nordland Automatic A/S.

På robothovedet er der monteret en ventilblok, der forsyner alle robothovedets pneumatiske komponenter med trykluft. Forsyningstrykket til ventilblokken er $7[\text{bar}]$, og er derfor også det tryk de forskellige komponenter har adgang til.

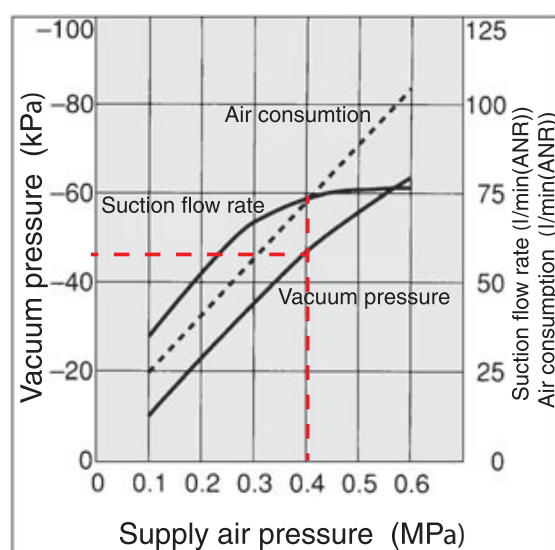
Til at generere vakuum på robothovedet anvendes der vakuum ejektorer. Vakuum ejektorer er en meget simpel måde at skabe vakuum på. Som vist på figur 2.3 skabes der et undertryk ved at blæse trykluft gennem en dysse, når tryklufften passere gennem dyssen, skabes der et negativt tryk på bagsiden og dermed et vakuum, der kan udnøttes i en proces. Dyssens størrelse samt indgangstrykket, bestemmer hvor stort dette vakuum tryk er.



Figur 2.3: Principskitse af vakuumejektor [SMC, Ukendt årgang]

På robotoovedet anvendes der vakuumejektorer fra producenten SMC, ejektoren der er valgt har en dysse diameter på $1,3\text{[mm]}$. Dette betyder der er åbent hul fra trykluft systemet og ud til atmosfæren igennem et hul med $\text{Ø}1,3\text{[mm]}$. Vakuumejektorerne der anvendes er såkaldte large-flow ejektorer, der har et højt flow, hvilket gør dem velegnede til at suge pap, papir og andre materialer der ikke er lufttætte.

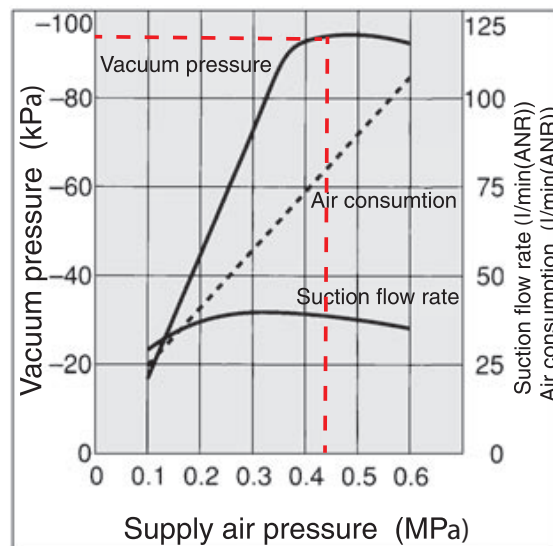
På figur 2.4 er karakteristikken for vakuumejektoren vist. Her ses det at kurven "Suction flow rate", som er flowet på vakuumsiden af ejektoren, flader ud ved et indgangstryk omkring 4[bar] , dette punkt er markeret med en rød stiplede linje. Ved dette punkt er vakuumejektorens effekt mest effektiv, i forhold til indgangstrykket, og en forøgelse af indgangstryk, vil ikke øge effektivitet. Ved dette punkt kan vakuumejektoren skabe et undertryk på ca. -45[kPa] .



Figur 2.4: Karakteristikken for ZH13DL [SMC, Ukendt årgang]

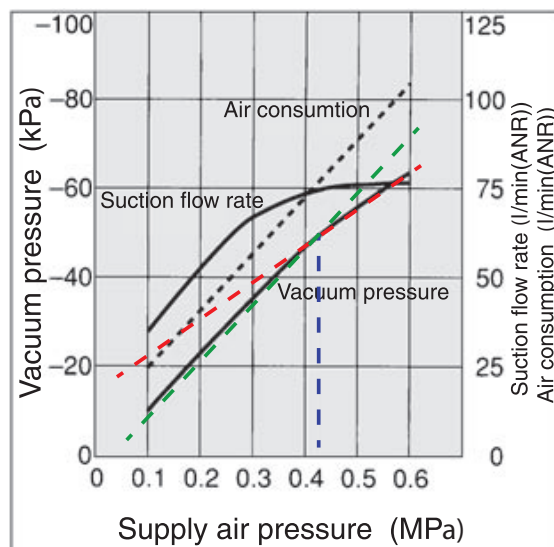
Det ses også at der er et betydeligt luftforbrug, når en vakuumejektorer er aktiveret. Dette luftforbrug kan være med til at forklare hvorfor cylinderen ikke kan løfte byrden, når vakuumejektorerne er aktiveret. Da det bidrager til et stort tryk tab i systemet.

Karakteristikken for standard vakuumejektorer, altså ikke large-flow, viser at den kan generere større vakuum, mens Suction flow rate ikke ændres betydeligt. Ved standard ejektorer er det dog kurven for vakuum trykket der flader ud, ved et indgangstryk på ca. 4,5 [bar], som vist på figur 2.5 med en rød stipleet linje.



Figur 2.5: Karakteristikken for ZH13DS [SMC, Ukendt årgang]

Fælles for de to typer er, at der er forbundet et højt luftforbrug og et potentielt stort tryk tab forbundet med anvendelsen af vakuumejektorer, uanset hvilken type der vælges. Derudover udviser de også et u lineært arbejdsområde når indgangstrykket overstiger et bestemt niveau. På figur 2.6 er kurven for vakuumejektoren vist, her ses det at kurven for vakuumtrykket ændre hældning ved et indgangstryk på ca. 4[bar]. Denne ændring er vist på figur 2.6 ved den røde og grønne linje ikke er parallelle, denne ændring viser at der findes et u lineært arbejdsområde.



Figur 2.6: Karakteristikken for ZH13DL [SMC, Ukendt årgang]

De er dog stadig et populært valg, da de er lette og billige at implementere i både nye og eksisterende applikationer.

På markedet findes der mange forskellige løsninger på til at styre og regulere vakuumtryk og luftforbruget ved anvendelsen af vakuum teknologi. Én af de ofte anvendte løsninger tager udgangspunkt i metoden, hvor trykket og flowet til vakuum ejektoren afbrydes når det ønskede vakuum tryk er opnået og låses ved hjælp af en kontraventil. Hvis vakuumtrykket skulle stige, åbnes der igen for tryk og flow, som så opbygger det ønskede tryk igen.

PROBLEMFORMULERING

Er det muligt at konstruere en testopstilling, der genskaber problemet og ved hjælp af reguleringsteknik lave en regulering der styrer trykket til en vakuumejektor, således at tryktabet formindskes og ikke har konsekvenser for systemets øvrige komponenter?

Herudover ønskes det at besvare følgende igennem rapporten:

Konstruktion:

- Hvordan kan en testopstilling konstrueres således samme karakteristik som beskrevet ved robothovedet genskabes?
- Hvordan planlægges et forsøg, således det er de relevante data der kommer til udtryk og arbejdes videre med?

Modellering:

- Hvordan konstrueres en matematisk model af et system, på baggrund af målinger og observationer?

Regulering:

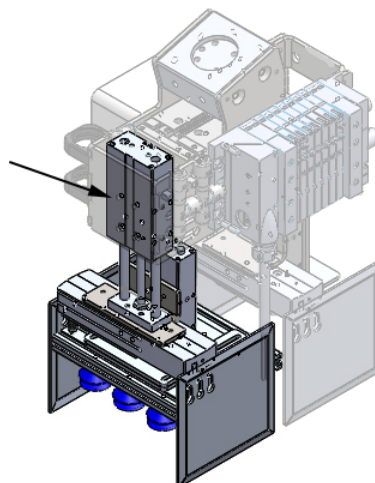
- Hvordan udvikles en regulering på baggrund af en matematisk model?
- Hvordan implementeres en regulering på den fysiske testopstilling?

SIMPLIFICERING AF PROBLEMET

4.1 Konstruktion af Testopstillingen

For at simplificere problemet, er det valgt at konstruere en testopstilling, der gengiver problemstillingen fra kapitel 2. Ved at konstruere en testopstilling, opnås muligheden for at montere sensorer vilkårlige steder i systemet. Dette ville ikke være muligt på det faktiske robothoved, da der ikke fysisk ville være plads til måleinstrumenterne. Desuden foregår alt styring af ventiler og aflæsning af diverse sensorer på robothovedet igennem robotens styringsenhed, som ikke understøtter analoge signaler og desuden kun har 12 I/O porte.

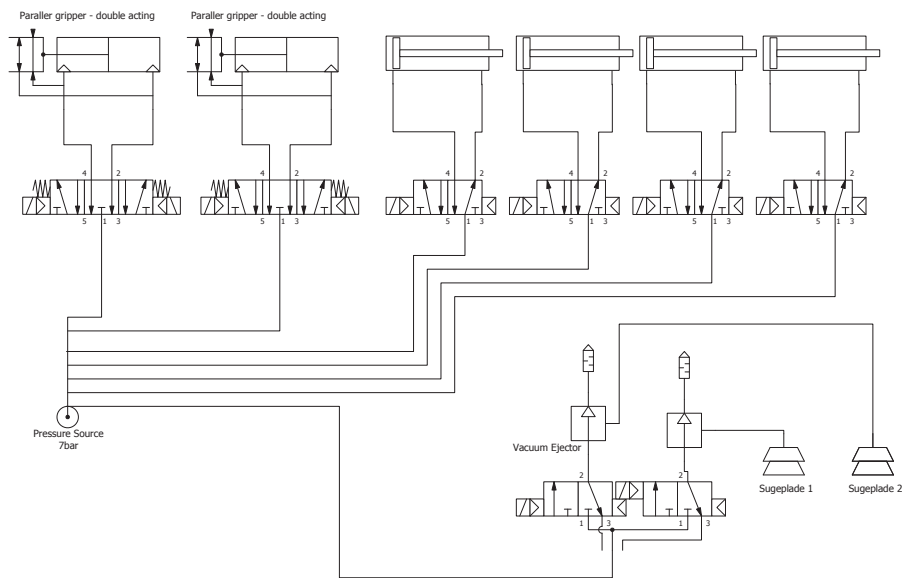
Testopstillingen skal gengive robothovedets bevægelse, hvor den løfter to bakker, mens vakuumejektorerne er aktive. Det er dog ikke kun æggebakkernes vægt der skal løftes, den pneumatiske cylinder skal løfte hele griber- og sugeplade konstruktionen, som vist på figur 4.1



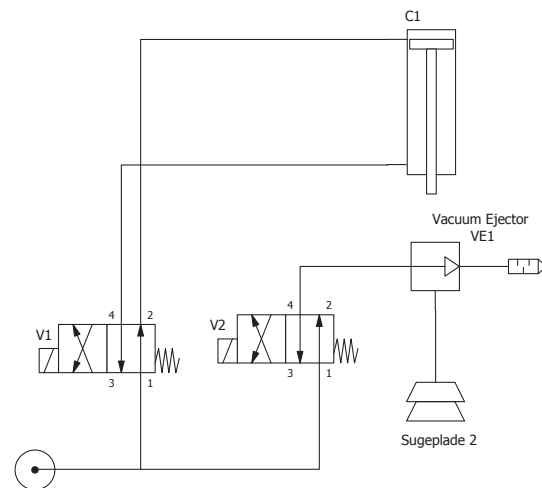
Figur 4.1: Robothovede, hvor de komponenter cylinderen skal løfte er fremhævet.

Det er ikke alle pneumatiske komponenter fra robothovedet der er nødvendige at medtage

i testopstillingen, da det kun er to af komponenterne der er aktive i denne proces. Derfor simplificeres det oprindelige pneumatiske system som vist på figur 4.2 til systemet vist på figur 4.3, som kun indeholder de involverede komponenter.



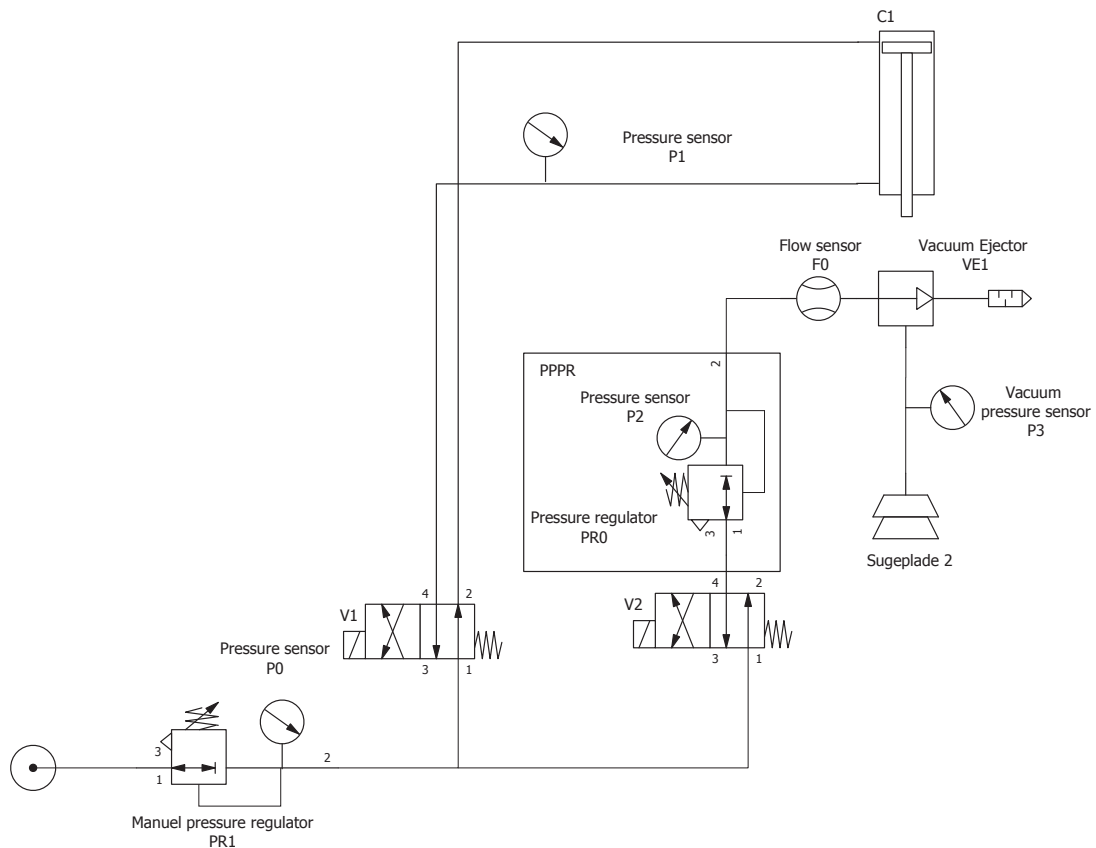
Figur 4.2: Pneumatisk diagram for det originale robotoved



Figur 4.3: Pneumatisk diagram for det simplificerede system (uden sensore)

For at være i stand til at måle hvordan tryk og flow fordeles i det simplificerede system, placeres en række forskellige sensorer i systemet. Herudover placeres der en manuel trykregulator, *PR1*, ved indgangen til systemet, for at være i stand til at kontrollere systemets indgangstryk.

Som beskrevet i kapitel 2, er vakuumtrykket afhængig af indgangstrykket til vakuumejektorene. Samtidig er det et ønske for testopstillingen at det skal være muligt at regulere på trykket til vakuumejektoren, derfor er der placeret en elektronisk proportionalventil før vakuumejektoren i systemet. Det simplificerede pneumatiske diagram, med de forskellige sensorers placering er vist på figur 4.4, samt bilag A.



Figur 4.4: Pneumatisk diagram for det simpulificerede system, inkl sensorernes placering

Der er i systemet placeret fire tryk sensorer, som måler trykket forskellige steder i systemet, de er navngivet P_0 , P_1 , P_2 , P_3 . P_0 er systemets indgangstryk, denne sensor er placeret for at kende udgangspunktet for trykket. P_1 er placeret mellem ventilen og cylinderen, dette er for at måle hvilket tryk der virker på cylinderen. P_2 er en tryksensor der måler udgangstrykket, og er indbygget i proportionalventilen. P_3 er modsat de andre sensorer en vakuum sensor, den kan måle et negativt tryk, og på baggrund af denne, er det muligt at se hvor stort et vakuum tryk der opbygges i systemet.

Udover tryksensorer er der også placeret en flowsensor, F_0 . Denne sensor er placeret umiddelbart

før vakuum ejektoren, da det er interessant at se hvordan flowet gennem vakuum ejektoren reagerer, når trykket varierer.

Som vist på figur 2.2 skal cylinderen løfte to æggebakker samt konstruktionen af sugepladen og griberene. Samlet har dette en vægt på $m_{byrde} = 4[kg]$, derfor skal det sikres at den valgt cylinder kan løfte denne byrde.

I følge databladet på cylinderen, som kan findes i bilag E.1, kan cylinderen trækkes sammen med en kraft på $F_{cyl-max} = 51[N]$ ved $6[bar]$. I formel 4.1 beregnes kraften som skal anvendes for at løfte byrden, denne beregnede værdi, skal være mindre end cylinderes kraft, før cylinderen kan anvendes.

$$F_{byrde} = m_{byrde} \cdot g \quad (4.1)$$

Hvor

- m_{byrde} Massen af konstruktion
- F_{byrde} Kraften som byrden udøver på cylinder
- g Tyngdeacceleration

Ved at indsætte værdierne i formel 4.1, findes det at:

$$F_{byrde} = 4[kg] \cdot 9.82 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 39.28[N]$$

Cylinderen er valgt, da $F_{byrde} < F_{cyl-max}$ ved et tryk på $6[bar]$.

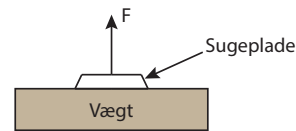
Ud af de $4[kg]$, som cylinderen skal løfte er $1,5[kg]$ æggebakker med æg, som skal holdes med sugekopper. På sugepladen, er der monteret to $\text{Ø}32[mm]$ sugekopper, sugekopperne er af same type som anvendes på robothovedet, dog anvendes der seks sugekopper på én sugeplade på robothovedet. Når det på testopstillingen er valgt, kun at anvende to sugekopper, er det ud fra en betragtning om, at der ikke er risiko for at enkelte sugekopper ikke er dækket af emne. Der vil på det virkelige robothoved, kunne opstå situationer, hvor ikke alle sugekopper vil slutte tæt omkring emnet, og derfor er det nødvendigt med flere sugekopper i forhold til en testopstilling.

Ud fra disse oplysninger er det muligt at beregne, hvor stort vakuum tryk der skal anvendes for at kunne løfte og holde bakkerne [Vaccon, Ukendt årgang] og [Festo, Ukendt årgang].

2 stk $\text{Ø}32[\text{mm}]$ sugekopper

Vægt: $1,5[\text{kg}]$

Sikkerhedsfaktor i forhold til belastningssituation og materiale: 2, vist på figur



4.5

Figur 4.5: Belastningssituation for sugekopper

$$F = A \cdot P \quad (4.2)$$

Hvor

- F er kraften fra byrden der skal løftes
- A Areal der dækkes af sugekopper
- P Vakuumtrykket til at løfte byrden

For at kunne beregne det nødvendige tryk, skal både arealet af sugekopperne A og kraften F bestemmes.

$$A = n_{\text{sugekopper}} \cdot \pi \frac{d^2}{4} \quad (4.3)$$

$$A = 2 \cdot \pi \frac{0.032^2}{4} = 16,085 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2]$$

Kraften som byrden og bevægelsen udøver, skal holdes af sugekopperne. Derfor medtages kraften fra både tyngdekraft og acceleration for at kunne beregnes det korrekte tryk.

Det forventes at cylinderen kan hæve byrden $80[\text{mm}]$ på $0,2[\text{s}]$. Dette er grundlaget for kraften som bevægelsen udøver [Young og Freedman, 2008].

$$y = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \implies a = \frac{2 \cdot y}{t^2} = \frac{2 \cdot 0.08[\text{m}]}{0.2^2[\text{s}]} = 4 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (4.4)$$

Hvor

- y er afstanden cylinderen bevæges
- a er accelerationen
- t er tiden for bevægelsen

Derved kan kraften F beregnes som:

$$F = m \cdot (g + a) = 1.5[kg] \cdot (9.82 \left[\frac{m}{s^2} \right] + 4 \left[\frac{m}{s^2} \right]) = 20.73[N] \quad (4.5)$$

Efter bestemmelse af arealet A i formel 4.3 og F i formel 4.5, er det nu muligt at bestemme vakuumtrykket der er nødvendigt for at holde og læfte æggebakkerne.

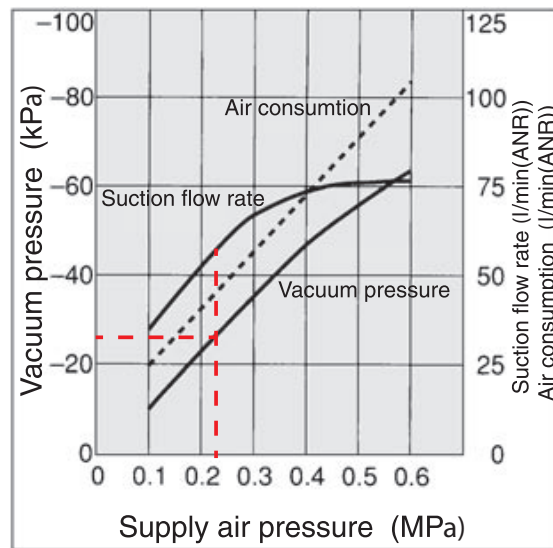
$$P = \frac{F}{A} \quad (4.6)$$

$$P = \frac{20.73[N]}{16,085 \cdot 10^{-4}[m^2]} = 12887.78 = 12.9[kPa]$$

I følge formel 4.6 skal der anvendes et vakuumtryk på $12.9[kPa]$ for at to sugekopper kan løfte $1.5[kg]$ æggebakker. Dette er dog uden den anbefalede sikkerhedsfaktor, i formel 4.7 er denne sikkerhedsfaktor tilføjet, således der findes netop det reference tryk, P_{3ref} , der skal være for at kunne løfte æggebakke.

$$P_{3ref} = P \cdot \text{Sikkerhedsfaktor} = 12.9[kPa] \cdot 2 = 25.8[kPa] \quad (4.7)$$

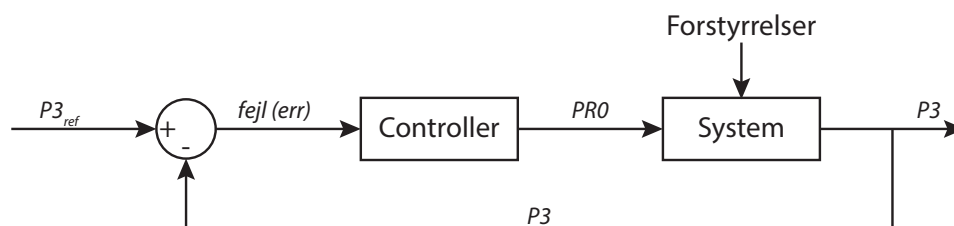
Det kan nu på figur 4.6 aflæses hvor stort indgangstryk, $PR2$, til vakuumejektoren skal være for at gennerere et vakuumtryk på ca. $26[kPa]$.



Figur 4.6: Karakteristikken for ZH13DL [SMC, Ukendt årgang]

På kurven er det aflæst, markeret med en rød stiplede linje, at vakuumejektoren skal have et indgangstryk på $2.3[\text{bar}]$ for at generere det nødvendige vakuum til at løfte æggebakkerne. Dette indgangstryk, er væsentlig mindre end det indgangstryk vakuumejektorene har på robtohovedet, som ikke er reguleret og derfor er min $6[\text{bar}]$. Derfor forventes det at, ved at nedsætte dette tryk med ca. 50 %, reduceres tryktabet i systemet, i en sådan grad at cylinderen, der skal løfte byrden har adgang til det nødvendige tryk således æggebakkerne kan løftes.

Som vist på figur 4.7 indsættes der en controller, der regulerer indgangstrykket, $PR0$, til vakuumejektorene. Controllerens feedback er vakuumtrykket, $P3$, som måles og herefter vil controlleren regulerer indgangstrykket, $PR0$, til vakuumejektoren således det ønskede vakuum tryk, $P3_{ref}$, som beregnet i formel 4.7, altid er opnået.



Figur 4.7: Blokdiagram for systemet

Som nævnt er det valgt at anende vakuumtrykket, $P3$, som styrende variabel for regulering af systemet. Systemet er samlingen af alle pneumatiske komponenter der findes i opstillingen, som vist på figur 4.4. Under drift er systemet udsat for forskellige forstyrrelser, en forstyrrelse kan være et andet pneumatisk komponent der aktiveres, eksempelvis en cylinder. En forstyrrelse kan også være et forbrug uden for netop denne opstilling, som resulterer i et generelt tab på hele systemtrykket, og derfor kan være medvirkende til en u hensigtsmæssig opførsel.









Det er kun valgt fokusere på vakuumtrykket, $P3$, da det vurderes at dette er det vigtigste tryk at opretholde i systemet, da et svigt her vil resultere i at robotten taber æggebakkerne.

Valg af pneumatiske komponenter

Komponenterne på testopstillingen er i nogen grad givet på forhånd, da testopstillingen skal repræsentere komponenterne på robothovedet. Herudover er testopstillingen konstrueret i samarbejde med Nordland Automatic A/S som havde forskellige komponenter på lager der kunne benyttes. Kun måleinstrumenterne var komponenter, virksomheden ikke havde på lager. Samtidig var der mulighed for at diskutere med de forskellige medarbejdere, om hvorledes en testopstilling kunne konstrueres. På baggrund af både de tilgængelige komponenter og diverse råd og vejledning fra medarbejderne, blev testopstillingen konstrueret.

I samarbejde med producenten af forskellige pneumatiske komponenter, Festo, og deres tekniske sælger blev kravene til måleinstrumenterne omhyggeligt diskuteret, med figur 4.4 som udgangspunkt. De forskellige sensorer blev i samarbejde udvalgt således de opfyldte behovene til både det pneumatiske system, men også til det valgte dataopsamlingsudstyr.

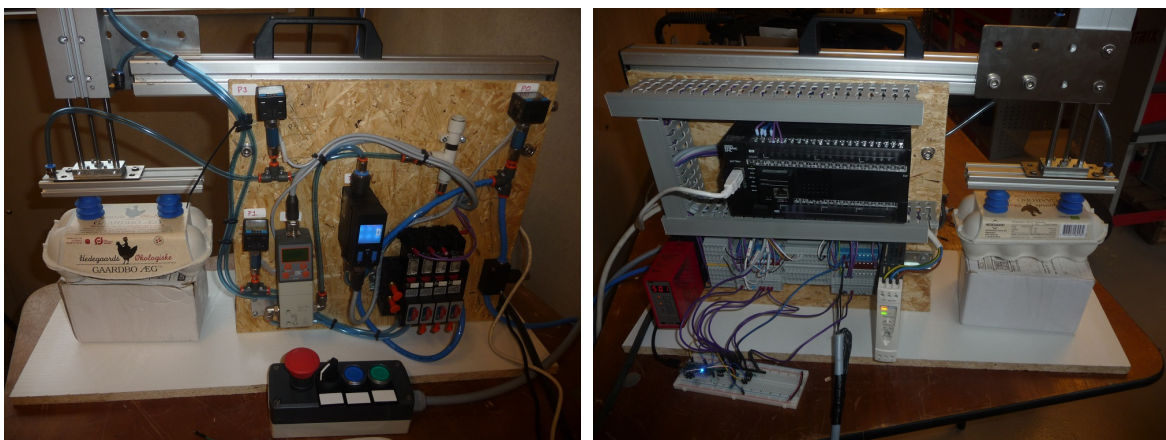
Alle pneumatiske komponenter der indgår i testopstillingen er vist i tabel 4.1. Databalde og supplerende information om komponenterne kan findes i bilag E.1.

Billede	Fabrikant og varenr	Beskrivelse
 <p>http://festo.com</p>	Festo DFM-12-80-P-A-KF	Cylinder der anvendes på robothoved
 <p>http://festo.com</p>	Festo SPAB-P10-G18-PB-L1	Tryksensor, til positivt tryk. måler inden for 0..10 [bar] og sender et analog signal mellem 1..5V.
 <p>http://festo.com</p>	Festo SPAB-B2R-G18-PB-L1	Tryksensor, til negativ tryk. måler inden for -1..1 [bar] og sender et analog signal mellem 1..5V.
 <p>http://festo.com</p>	Festo SFAB-200U-WQ8-2SV- M12	Flowsensor, der måler inden for området 2..200 [l/min] og sender et analog signal melle 0..10V
 <p>http://smc.eu</p>	SMC ZH-13-D-L	Vakuüm ejektor der anvendes på robothoved
 <p>http://metalwork.dk</p>	MetalWork	Elektronisk trykregulator, med indbygget tryksensor.
 <p>http://festo.com</p>	Festo LR-QS-8	Manuel trykregulator, der regulere trykket mellem 0..8 [bar]
 <p>http://coval.com</p>	Coval VS32STN	Sugekop, der anvendes på robothoved

Tabel 4.1: Liste over pneumatiske komponenter der indgår i testopstillingen.

således det er muligt at lave en cyklus for cylinderen og vakuumejektoren, og derved måle systemets dynamiske opførsel under drift. Herudover giver det også mulighed for at afprøve og implementere en regulering af vakuumejektoren.

Fysisk er testopstillingen bygget på en ramme af aluminiumsprofiler, hvor cylinderen med sugepladen er monteret på en udliggende arm. Som vist på figur 4.9 er der på hver side af rammen fastgjort en træplade, hvori alle resterende komponenter er fastgjort. Hele rammen er fastgjort på en plade, således testopstillingen let kan flyttes.



(a) Billede af testopstillingens pneumatiske side

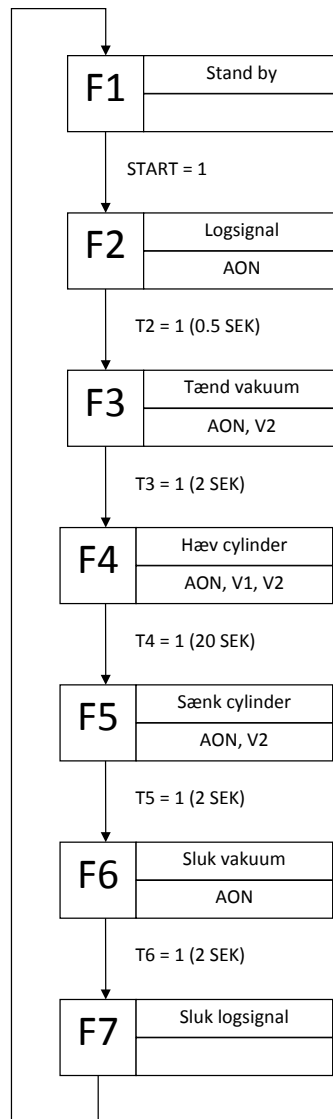
(b) Billede af testopstillingens elektriske side

Figur 4.9: Billede af testopstillingen der er konstrueret

4.2 Programmering dataopsamlingsudstyr

Til dataopsamlingen er der programmeret en cyklus som plc'en håndterer og styrer. Dette gøres for at have muligheden for at aktivere forskellige komponenter igennem en måleserie, således at forstyrrelser i systemet også kan medtages i en måleserie. En forstyrrelse kan eksempelvis være en cylinder der aktiveres. Samtidig er det også PLCens opgave at sende et signal til arduinoen om at en cyklus er startet og der skal logges data. Imens plc'en sender et signal til arduinoen, er det arduinoens opgave at styre indgangstrykket, *PRO* til vakuumejektoren.

Plc'en er programmeret efter fasediagrammet [Heilmann, 2008] som figur 4.10, et fasediagram er en visuel måde at præsentere en cyklus for et system. I fasediagrammet er det angivet hvilke udgange der er aktiveret i de forskellige faser, samt hvilke indgange der aktiverer de forskellige faser i en cyklus.

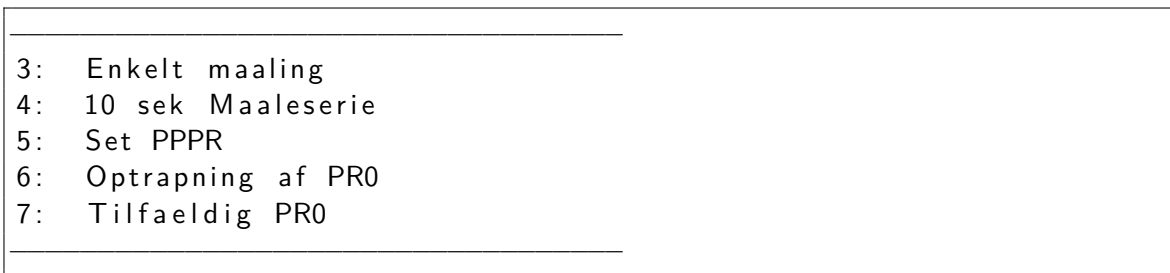


Figur 4.10: Fasediagram for PLC

Cyklussen består af syv faser, som hver har en bestemt funktion. Den første fase F1, er udgangspunktet og systemet er klar. Ved et tryk på en knap aktiveres variabelen START og den næste fase F2 aktiveres. I F2 sendes der et signal til arduinoen om at starte datalogning. Efter 0.5 sek skiftes der videre til F3 hvor ventilen til vakuumejektoren (V2) aktiveres. Efter 2 sek går systemet videre til F4, hvor cylinderen aktiveres. Her er cylinderen hævet i 20 sek, før der skiftes til fase 5. I F5 sænkes cylinderen og efter 2 sek slukkes vakuuummet i F6. I den 7 og sidste fase slukkes signalet til arduinoen og cyklussen returnerer til udgangspunktet og venter på at blive aktiveret ved tryk på start knappen. Ladder diagrammet for PLC programmet kan findes i bilag C, og original programmet, programmeret i CX-programmer kan findes i bilag E.4.

Arduinoen er programmeret til at have 5 forskellige funktioner. Funktionerne vælges igennem et program på en PC som kommuniker med arduinoen. Arduinoen måler data med en frekvens på 250 Hz, da dette var den hurtigste frekvens hvorved computeren kunne modtage fejlfrie data.

På figur 4.11, er menuen fra arduinoen vist.



Figur 4.11: Funktionsmenu fra Arduino

Der er som vist fem funktioner:

3. **Enkelt måling** - Tager en enkelt måling af systemets værdier
4. **10 sek Maaleserie** – Foretager en måleserie i 10 sek. Denne funktion anvendes særlig under indkøring og kalibreringen af de forskellige tryk sensorer, da den kan aktiveres uden signal fra PLC.
5. **Set PPPR** – Indstil trykket PR0 manuelt. Her er der mulighed for at taste en værdi i [bar], til indstilling af PR0.
6. **Optrapning af PR0** – Starter måleserie ved signal fra PLC. Herefter køre der en løkke på arduinoen der optrapper PR0 med 1 [bar] hvert andet sek.
7. **Tilfældig PR0** – Starter måleserie ved signal fra PLC. Herefter starter der en løkke på arduinoen, der vælger en tilfældig værdi af PR0 mellem 1 og 5 [bar] hvert andet sek.

Hele dette program, kan ses i bilag E.3.

4.3 Forsøgsudførelse

Det planlægges at udføre to forsøg med fire gentagelser af hver. Altså skal der udføres otte kørsler i alt. Dette gøres for at være i stand til at vurdere om der er betydelig variation mellem de enkelte måleserier af samme type.

De to forsøg der udføres er henholdsvis forsøg hvor indgangstrykket, $PR0$, til vakuum ejektoren øges gradvist og forsøg hvor systemet vælger en tilfældig værdi for $PR0$.

Dette gøres for at være i stand til at modellere systemet matematisk og kunne verificere modellen.

Ved en hver udførelse af et forsøg, vil der være forstyrrelser. I dette tilfælde kan en forstyrrelse eksempelvis være, at der anvendes trykluft et andet sted i systemet. Dette vil kunne skabe forstyrrelser i målingerne og vil ikke være noget der umiddelbar kan kontrolleres.

I tabel 4.2 er de otte planlagte forsøg nummereret og navngivet, herudover er de forskellige værdier for $PR0$ angivet.

Forsøgs nr.	Forsøgsnavn	Indstilling af $PR0$
1	Optrap 1	1, 2, 3, 4, 5, 6 [bar]
2	Optrap 2	1, 2, 3, 4, 5, 6 [bar]
3	Optrap 3	1, 2, 3, 4, 5, 6 [bar]
4	Optrap 4	1, 2, 3, 4, 5, 6 [bar]
5	Tilfældig 1	Vælges tilfældigt af arduino 1-5[bar]
6	Tilfældig 2	Vælges tilfældigt af arduino 1-5[bar]
7	Tilfældig 3	Vælges tilfældigt af arduino 1-5[bar]
8	Tilfældig 4	Vælges tilfældigt af arduino 1-5[bar]

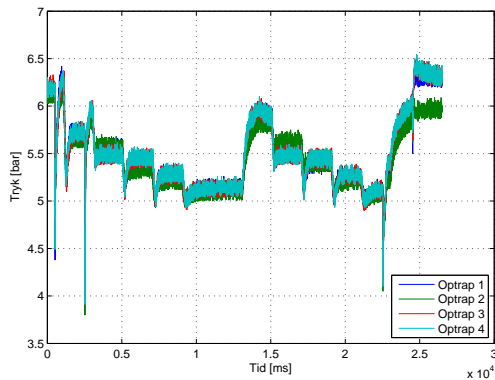
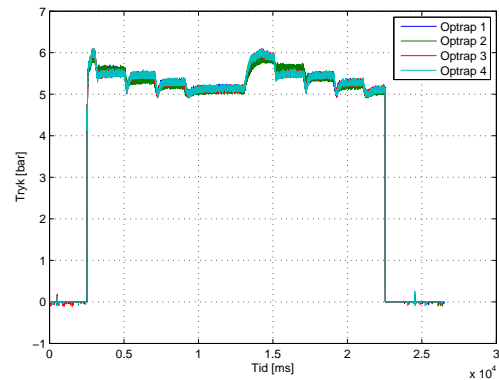
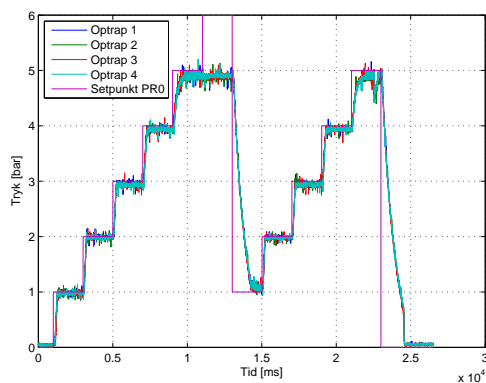
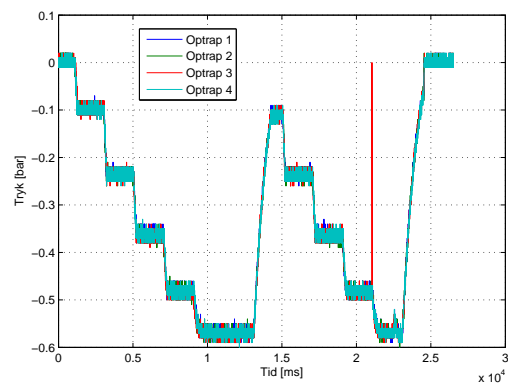
Tabel 4.2: Forsøgsnummerer

Ved at anvende Randomization teknikken på forsøgsrækkefølgen [Montgomery, 2013], er det med til at sikre de enkelte måleserier ikke udsættes for samme forstyrrelse og dermed fejl. Dette kan herefter bidrage til identifikation af forskellige fejlfaktorer, som der senere kan indgå i overvejelserne. Ved hjælp af Microsoft Excel er de otte forsøg sorteret i tilfældig rækkefølge, således de ikke udføres i en ordnet rækkefølge.

Rækkefølgen forsøgene udføres i er: 7, 4, 2, 5, 3, 6, 8, og 1.

Efter forsøgene er udført, plottes de rå data for at kunne sammenligne de enkelte kørsler. På disse grafer vurderes der på, om de forskellige forsøg viser samme tendenser og niveauer. Da

betydelige variation heri kan vidne om unøjagtige målinger og skiftende forhold for systemets virke. På figur 4.12 er målingerne fra de fire forsøg, hvor indgangstrykket, $PR0$, til vakuumejektoren gradvist optrappes, altså forsøg nr. 1, 2, 3 og 4 vist.

(a) $P0$ fra de fire forsøg, hvor $PR0$ optrappes(b) $P1$ fra de fire forsøg, hvor $PR0$ optrappes(c) $P2$ fra de fire forsøg, hvor $PR0$ optrappes(d) $P3$ fra de fire forsøg, hvor $PR0$ optrappes

Figur 4.12: Resultat af de fire måleserier hvor $PR0$ optrappes gradvist

På figur 4.12a, er systemtrykket, $P0$, vist for de fire forsøg. Hver gang trykket falder, er det en konsekvens af et forbrug, et sted i systemet. Det ses at, $P0$, falder som en trappe, dette sker som følge af trykket til vakuumejektoren hæves og derved skaber et tryktab i systemet.

Derudover er der nogle kraftige udsving, som beskrives nærmere på side 28.

På grafen for $P0$, ses det at alle målinger har samme tendens og udformning. Der er dog udsving, særligt ved den grønne kurve, som viser målingerne fra forsøget "Optrap 2". Denne kurve har et væsentligt lavere slut niveau end de resterende målinger, men følger generelt de tre andre kurver, dog forskudt. Dette kan skyldes, at der på netop dette tidspunkt har været et svingende forbrug

på et andet sted på den centrale luftforsyning, der forsyner testopstillingen med trykluft.

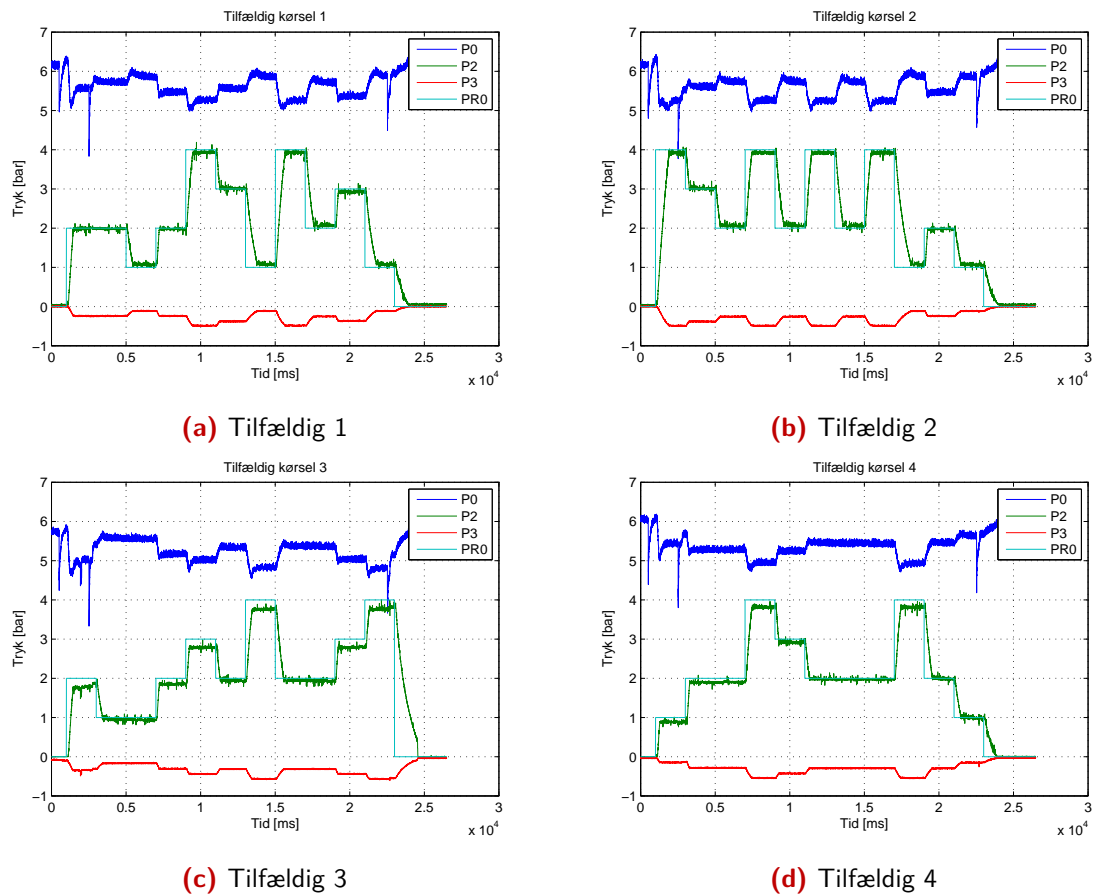
På figur 4.12b vises trykket $P1$, som er trykket til cylinderen. Her ses det på samme måde at trykket falder når trykket til vakuumejektoren hæves og på den måde nedsættes cylinderens kræfter. Igen ses det at målingerne fra forsøget "Optrap 2" ikke har samme niveau som de resterende måleserier.

Figur 4.12c er det indgangstrykket til vakuumejektoren, $P2$, der er vist. Her ses det at kurverne fra de fire forsøg stemmer godt overens, da de alle rammer samme niveau og udviser samme tendens for alle målinger.

Setpunktet, som er vist med lilla på figur 4.12c, er det ønskede tryk arduinoen har sendt til proportionalventilen. Når denne sættes til 6[bar] ændres trykket ikke, på trods af det nye setpunkt. Denne opførsel er beskrevet nærmere på 28.

Vakuumtrykket, $P3$, som vil fungere som feedback variabel for reguleringen er vist på figur 4.12d. Her ses der på samme måde som ved $P2$ en fornuftig overensstemmelse mellem de forskellige måleserier, da kurverne fra de forskellige forsøg følges og falder til ro ved samme stationære værdier. Der viser sig dog en enkelt outlier, altså fejlmåling, i målingerne fra forsøget "Optrap 3", som viser sig ved et peak på den røde kurve, ca efter 21[s].

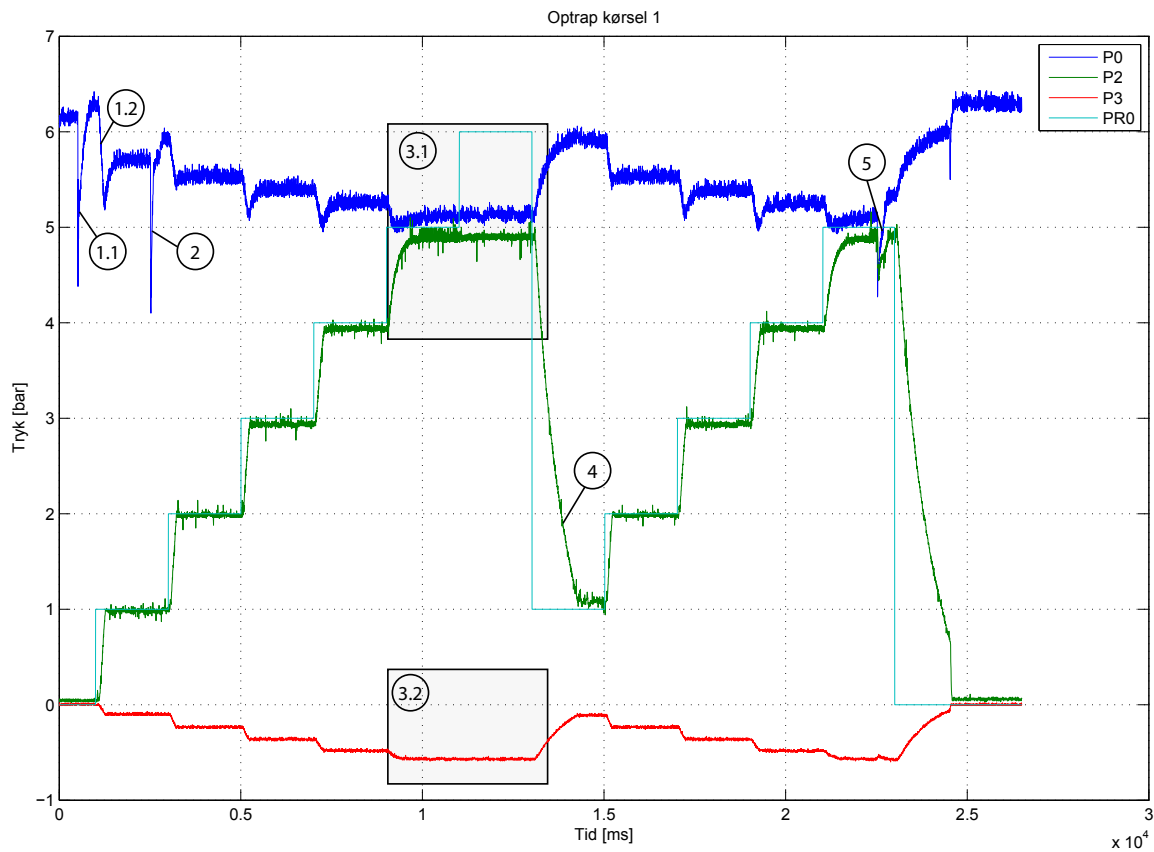
Ved forsøgene, hvor $PR0$ indstilles tilfældigt viser der sig større variation mellem de forskellige målinger og forsøgene imellem. På figur 4.13 er alle målinger, fra hvert forsøg vist i samme graf, for må den måde vise hvordan de forskellige tryk er i forhold til hinanden. Det viser sig her tydeligt, hvordan systemtrykket, $P0$, variere og er afhængig af niveauet af $P2$.



Figur 4.13: Resultat af de fire måleserier hvor PR0 tilfældigt vælges

Det ses også at $P2$, særligt på figur 4.13c og figur 4.13d, ikke konsekvent opnår samme niveau som setpunktet $PR0$. Denne afvigelse vil sandsynligvis kunne mindskes eller helt fjernes ved implementering af en regulering. Originale data og grafer kan findes i bilag E.2.

På figur 4.14 er der vist data fra forsøg nr 1, Optrap1, her er der indsat forskellige fokus punkter, for at beskrive hvilken hændelse eller forekomst der afbilledes i grafen.



Figur 4.14: Detaljeret beskrivelse af forekomster og observationer af måleserie

Det dramatiske og kortvarige trykfald på systemtrykket som vist ved (1.1) skyldes at ventilen til (V2) åbnes til proportionalventilen. Derved er der opbygges et tryk i volumet på den anden side af ventilen, hvilket viser sig i dette peak. Proportionalventilen åbnes ved peaket vist ved (1.2), det er altså efter dette punkt der er åbnet for tryk og flow til vakuum ejektoren.

Trykfaldet, markeret med (2), skabes ved at cylinderen bliver aktiveret og skal hæves.

Ved (3.1) sker der noget bemærkelsesværdigt. Her øges setpunktet til *PRO* til 6[bar], men dette har ingen virkning, da vakuumejektoren allerede har adgang til systemets maksimale tryk. Dette ses ved at kurven for *P2* og *P0* ligger meget tæt. Samtidig er det også i dette område vakuumejektoren begynder at udvise en u lineær arbejdskurve, altså kan vakuumtrykket ikke i dette område ikke beskrives med en lineær sammenhæng. Dette ses også ved (3.2) hvor vakuum trykket forbliver stationært, på trods af adgangen til systemets fulde trykressource.

Efter setpunktet har peaket ved 6 [bar], sænkes det igen til 1[bar] som det ses ved (4). Her ses det også at systemet har et relativt langsomt fald. Dette skyldes den indbyggede regulator i proportionalventilen.

Det negative peak ved (5), beskriver at cylinderen igen aktiveres. Denne gang sænkes cylinderen, og igen viser det sig som et kortvarig tryktab i systemet. Dette tryktab viser sig på både $P0$ og $P2$.

Ved analysen af måledata, blev det vist at vakuumtrykket, $P3$, ikke har en lineær sammenhæng når indgangstrykket er justeret til 5 [bar] eller derover. Det er derfor ikke muligt at modellere en lineær model for systemet hvis dette område medtages i grundlaget for modelleringen.

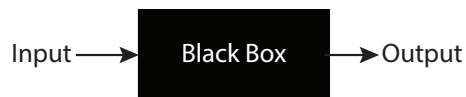
Udover at området har en u lineær opførsel er det også vist i kapitel 4.1 at dette område ligger udenfor det ønskede arbejdsområde. Derfor frasorteres alle data, hvor inputtet $PR0$ er 5 [bar] eller der over.

Dette gøres for at være i stand til at modellere en black box for det ønskede arbejdsområde, hvor indgangstrykket og $PR0$ ligger mellem 1-4 [bar].

MODELLERING AF SYSTEMET

For at kunne udvikle en regulering til systemet, er det hensigtsmæssigt at kunne beskrive systemet matematisk. Der anvendes særligt to metoder til at udvikle ligninger som kan beskrive dynamikken i et system. Den ene metode er den klassiske, hvor der opsættes dynamiske ligninger for hver enkelt komponent i et system. Disse dynamiske ligninger, stammer fra fysiske betragtninger om eksempelvis bevægelse, volumen ændringer osv.

Den anden metode, som også anvendes til bestemmelse af det aktuelle system, er "black box" metoden. Ved denne metode skabes der en model på baggrund af måledata, hvor både input og output er kendt, som illustreret på figur 5.1.



Figur 5.1: Blokdiagram af Blackbox

Der modelleres altså en matematisk model for hele systemet, alene på kendte værdier af både input og outputs. Deraf navnet "Black Box" da der til et bestemt input, høre et bestemt output, mens baggrunden for sammenhængen mellem dem er ukendt i modsætning til den klassiske modellerings metode.

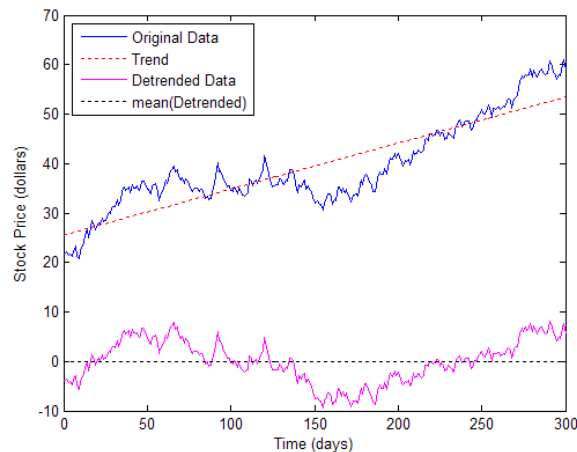
Der ønskes i dette tilfælde at modellere en overføringsfunktion, som relationen mellem inputtet og outputtet. En overføringsfunktion er matematisk repræsentation af et tidsafhængigt systems opførsel i frekvensdomænet.

I matematik programmet Matlab, er det muligt at anvende toolboxen "System Identification" til modellering af en overføringsfunktion, på baggrund af måledata. Måledataene der skal danne grundlag for overføringsfunktionen er data fra forsøgene der er beskrevet i sektion 4.3 **Forsøgsudførelse**, hvor både input og output er logget.

5.1 Metoden og Teorien om System identification

System Identification, som anvendes til modellering af systemet, er en såkaldt "best fit" metode. Ved "best fit" forstås det, at der på baggrund af måledata og forskellige algoritmer skabes modeller som har samme opførsel som de målte data. Det er dog vigtigt, ikke at se disse modeller som den rene sandhed, men nærmere som en fornuftig beskrivelse af et systems opførsel [Ljung, 1999].

Til system identification udvælges den måleserie til grundlag for en matematisk model af systemet. Herefter anbefales det at behandle måleserien, således den gennemsnitlige tendens for systems fjernes. Ved at fjerne den gennemsnitlige tendens, som illustreret på figur 5.2, kommer alle målinger til at ligge omkring 0. Dette hjælper identifications algoritmen, således det er systemets forhold til 0 der er beregningsgrundlag.



Figur 5.2: Detrending illustreret [Matlab, Ukendt årgang]

Afhængig af mængden af data der er tilgængelig for systemidentifikation er det herefter muligt at vælge to forskellige metoder.

Hvis der kun er en enkelt måleserie tilgængelig, skal denne serie anvendes til både danne en overføringsfunktion og samtidig kunne validere den. Men da en model nødvendigvis skal sammenlignes med data som den ikke er blevet dannet ud fra, skal det enkelte datasæt der er til rådighed behandles. Dette sker ved at måleserien opdeles i to dele, hvor den første del anvendes som grundlag for identifikations algoritmen, og dermed danner en overføringsfunktion som ønskes. Den anden del anvendes som valideringssæt, det er altså den anden halvdel af målingerne

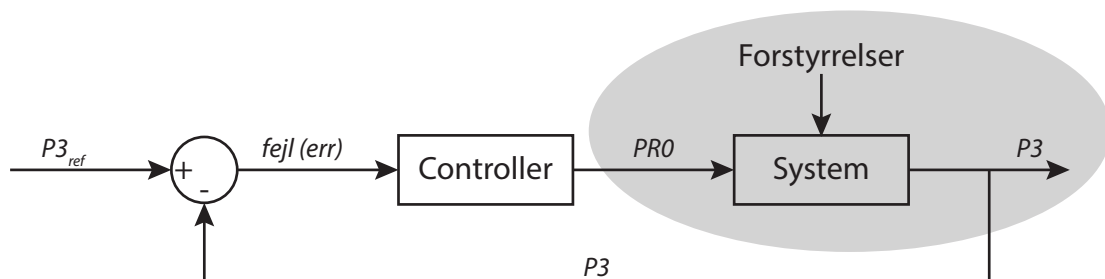
som anvendes til validering af modellen, som skabes på grundlag af det første.

På den måde stammer alle data fra den samme måleserie, og danner tilsammen både beregningsgrundlag for modellen, men også validerings data. Valideringsdataene har på den måde ikke direkte indflydelse på modellens tilblivelse. Derfor kan disse data anvendes til at validere modellen, og vurdere hvor godt modellen repræsenterer det fysiske system.

I situationen hvor der er flere måleserier tilgængelig, er det oplagt at anvende ét datasæt til beregning af modellen og et andet til validering. På den måde dannes modellen på flest muligt måledata, hvilket kan være med til modellen repræsenterer det fysiske system bedre, end hvis det kun var beregnet på det halve data.

5.2 Anvendelse af System Identification

På side 17 er der vist et blokdiagram, som viser hvorledes en controller skal virke. Ved System Identification er det blokken "system" som markeret på figur 5.3 der ønskes bestemt.



Figur 5.3: Blokdiagram

På blokdiagrammet ses det at $PR0$ er input og $P3$ er outputtet. Der skal altså skabes en model som på baggrund af inputtet $PR0$, kan repræsenterer hvordan vakuumtrykket $P3$ reagere når $PR0$ ændres.

Da der er foretaget otte forsøg, fire hvor $PR0$ gradvist optrappes og fire hvor $PR0$ vælges tilfældigt, vælges det at konstruere modeller ud fra alle otte måleserier og herefter validere dem med et datasæt af modsatte type. Således modeller baseret på de fire optrap målinger valideres med en måleserie hvor $PR0$ er valgt tilfældig, og omvendt.

Når en måleserie importeres i Matlab, importeres det i tidsdomænet med de to variabler som

er hhv input og output. Det er samtidig nødvendigt at definere hvilken *Sampling rate*, altså tidsintervallet mellem målingerne, for at kunne konstruere en tidsafhængig model. Da arduinoen har målt data med 250[Hz] omregnes dette til antallet af sekunder mellem hver måling.

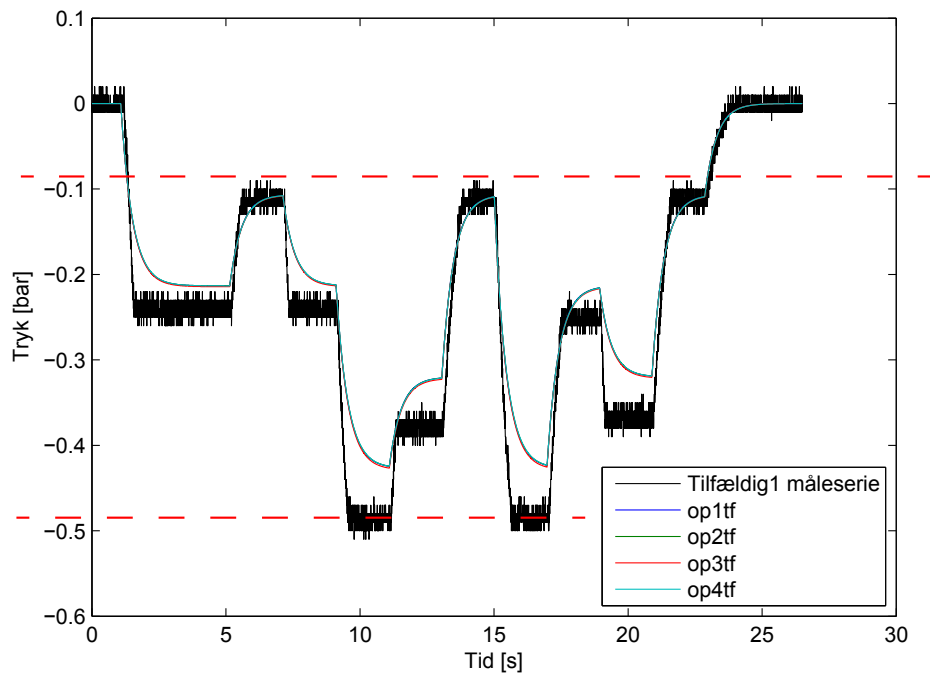
$$Samplinginterval = \frac{1[s]}{250[Hz]} = 0,004[s] \quad (5.1)$$

Ved en sampling frekvens på 250[Hz] er der, som beskrevet i formel 5.1 et samplings interval på 0,004[s] og målingerne af systemet starter ved tiden 0.

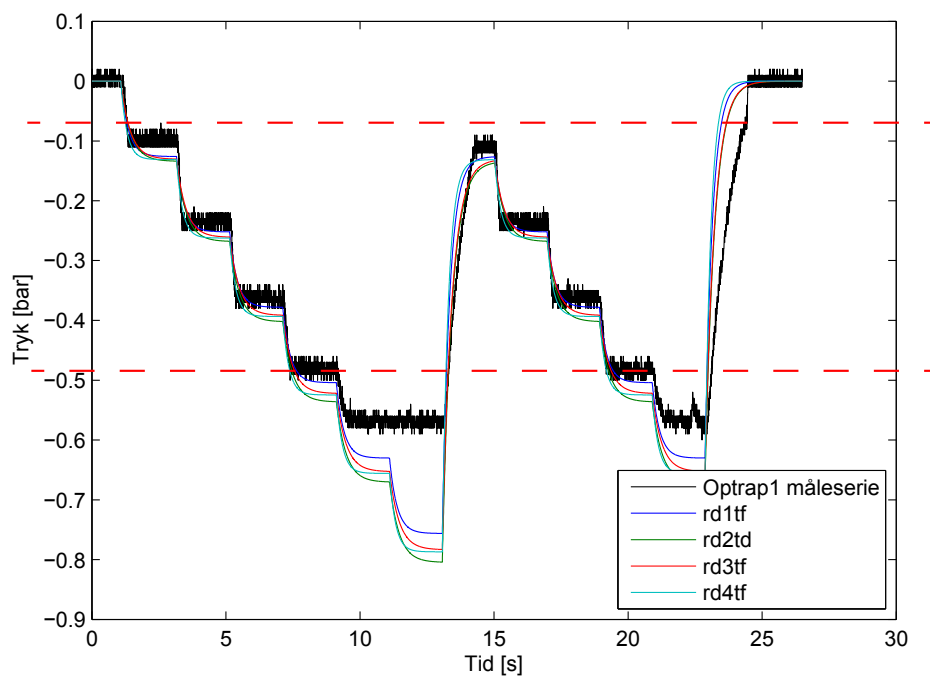
Når måleserierne er importeret i Matlab, fjernes den gennemsnitlige tendens, således alle målinger får et gennemsnit på 0, således det kun er dynamik og ændringer identifikations algoritmen arbejder med.

På figur 4.14 er systemets respons vist hvor *PR0* gradvist optrappes. Ud fra denne figur kan det ses at ved en ændring i inputtet, sker der samtidig en ændring outputtet, denne ændring er konsekvent og har umiddelbart ikke en blød og fin overgang, men en pludselig ændring, hvor kurven først ændre karakter, inden den rammer set punktet. Dette er en typisk indikation på at systemet kan beskrives ved 1. ordens overføringsfunktion.

Ud fra disse overvejelser, skabes der otte overføringsfunktioner. På figur 5.4 er overføringsfunktionerne, som er dannet på måleserier hvor *PR0* gradvist optrappes vist, sammen med valideringsdata fra måleserien tilfældig1. Mens der på figur 5.5 er vist overføringsfunktioner hvor *PR0* er valgt tilfældigt og sammen holdt med måledata fra måleserien optrap1.



Figur 5.4: Overføringsfunktioner dannet på grundlag af optrap målinger, sammenholdt med måleserien tilfældig1



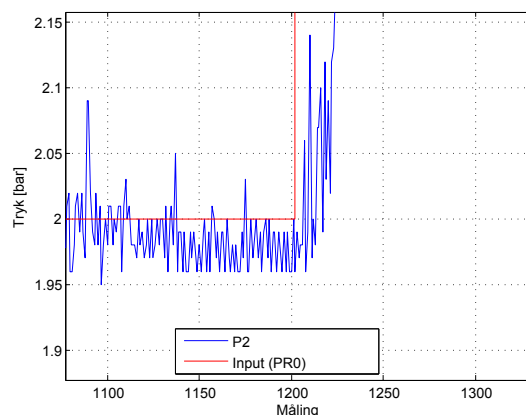
Figur 5.5: Overføringsfunktioner dannet på grundlag af tilfældig $PR0$ målinger, sammenholdt med måleserien optrap1

På begge figurer er det ønskede arbejdsområdet markeret med to røde stiplede linjer. Det er imellem disse linjer modellerne skal vurderes og valideres.

På begge figurer, er det tydeligt at ingen af de konstruerede modeller, rammer hverken dynamikken eller niveauet for de enkelte inputs. Særligt modellerne vist på figur 5.4 er meget langsommere end systemet og kun ved et input hvor $PR0 = 1$ er modellerne i niveau med systemet.

På figur 5.5 er der dog en enkelt overføringsfunktion der skiller sig ud. Overføringsfunktionen $rd1tf$ som er baseret på måledata fra datasættet tilfældig1, er umiddelbar tæt på de ønskede niveauer, desværre er dynamikken i overføringsfunktionen igen langsommere end selve systemet.

Ved dybere undersøgelser af de målte data, viser det sig at der findes en forsinkelse i systemet. Altså når inputtet ændres er der en lille tidsforskydning som, kan have indflydelse på konstruktionen af modellerne. Denne tidsforskydning viser sig, ved at kurven for $P2$ som er indgangstrykket til vakuumejektoren ændre sig senere end inputtet som vist på figur 5.6.

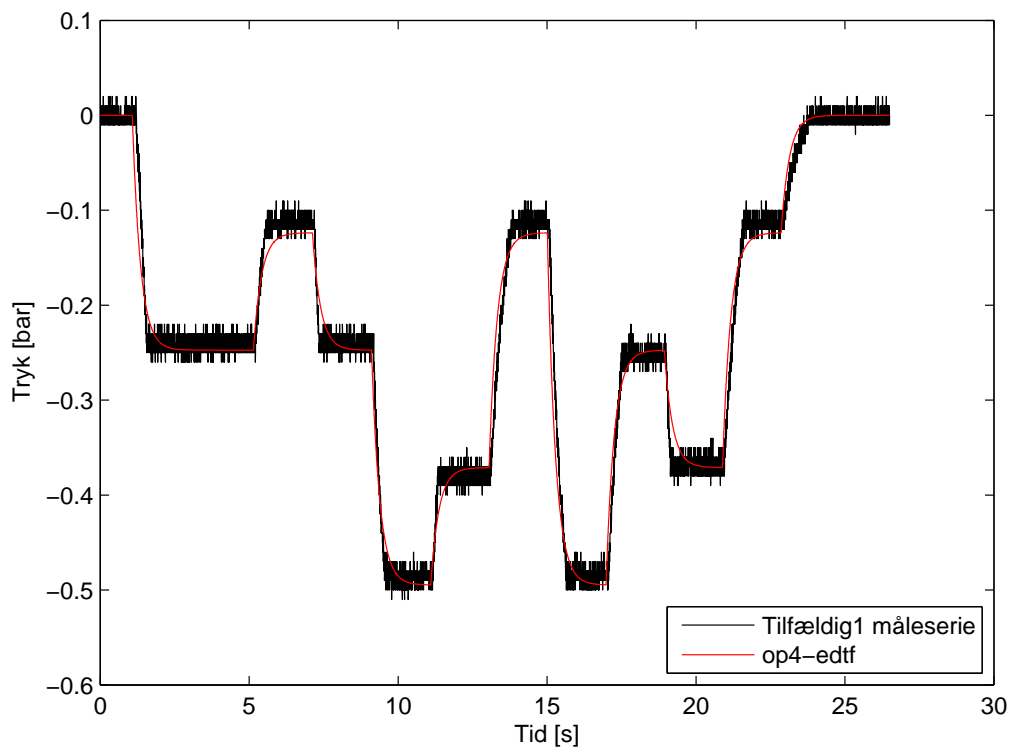


Figur 5.6: Forsinkelse af $P2$ iforhold til input

Samtidig er modellerne dannet ud fra de fulde måleserier, altså også målinger som ligger udenfor det ønskede arbejdsområde som er $PR0 = [1...4][bar]$. Derfor udvikles der en behandlet dataserie, hvor forsinkelsen mellem input og reaktion er minimeret og alle data der ligger udenfor det ønskede arbejdsområde er fjernet.

Efter gentagende forsøg med de forskellige måleserier, er der udviklet en model ud fra måleserien

optrap4, hvor der er taget højde for tidsforsinkelsen og alle måledata udenfor arbejdsområdet er frasortet. Denne model er vist på figur 5.7 og sammenholdt med måleserien tilfældig1.



Figur 5.7: Overføringsfunktion optrap-op4edtf, sammenholdt med måleserien tilfældig1

Denne model rammer niveauerne for de forskellige inputs, væsentlig bedre end de forrige. Samtidig er dynamikken i modellen også væsentlig hurtigere, men dog stadig ikke lige så hurtig som systemet.

Det vurderes dog, at det ikke er muligt at udvikle en hurtigere model, på baggrund af de målinger der er foretaget. Hastighedens nedsættelsen i modellen skyldes sandsynligvis, modelleringen over det langsomme fald, som beskrevet på figur 4.14 - (4).

På trods af denne hastighedsforskel mellem modellen og det fysiske system, vurderes det at modellen kan repræsentere det fysiske system på en tilfredsstillende måde. Da den stabiliserer sig på de rigtige niveauer og har samme karakteristik, når set punktet ændres.

5.3 Analyse af model

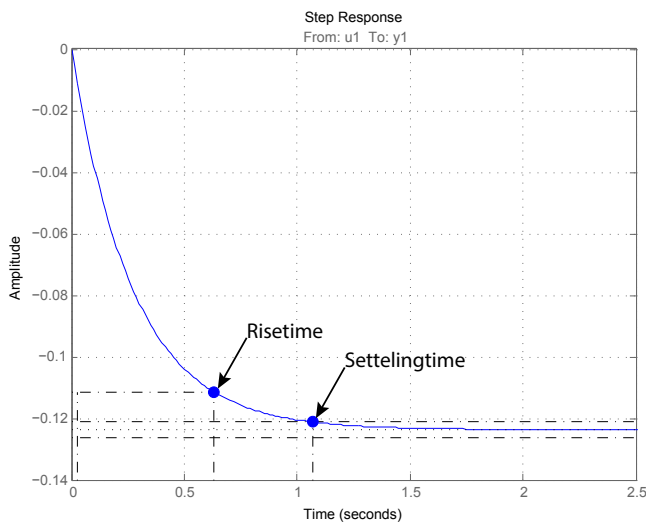
Modellen der er konstrueret har tilnærmelsesvis samme opførsel som det fysiske system. For at kunne udvikle en regulering til systemet, er det nødvendigt at udlede flere informationer om systemet.

Overføringsfunktionen der er bestemt for systemet, ved hjælp af metoden System Identification er vist i formel 5.2.

$$G_p(s) = \frac{-0.4529}{s + 3.662} \quad (5.2)$$

Ved at se på overføringsfunktionen, G_p , kan det konkluderes, at systemet ikke indeholder nul-punkter, idet tælleren er konstant. Samtidig kan det ses at der findes én pol i systemet. Denne pol er $s = -3.662$, idet dette er en rod, for den ligning der er angivet i overføringsfunktionens nævner. Ved at denne pol er negativ, og derved vil ligge i det venstre halvplan af en rodkurve, vides det allerede nu, at systemet er stabilt [Phillips og Parr, 2011].

Stepresponset for $G_p(s)$ er vist på figur 5.8, her ses det som forventet, at en positiv værdi som input resulterer i et negativt output, idet vakuumtrykket er et negativt tal. Samtidig ses det også at systemet stabiliseres omkring $1.2[kPa] \approx 0.12[bar]$, hvilket stemmer overens med vakuumejektorens karakteristik.



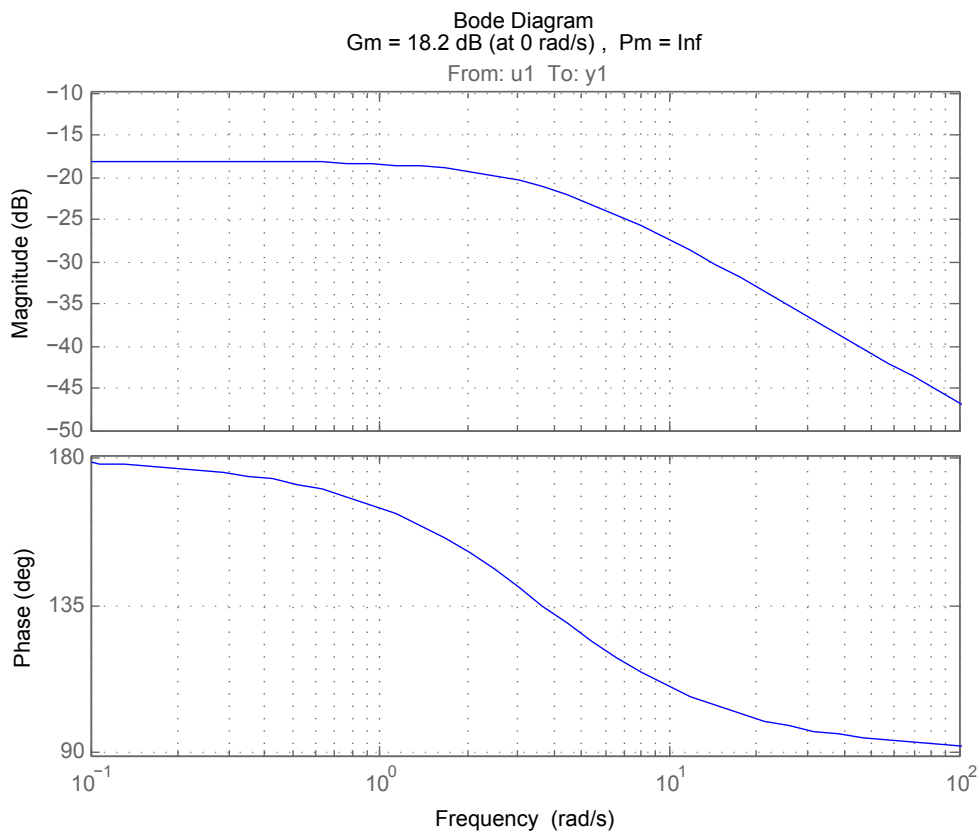
Figur 5.8: Stepresponse for G_p

Herudover er der også flere vigtige informationer der kan aflæses i stepresponset, såsom *risetime* som er den tid det tager systemet at gå fra 10% til 90% af den endelige værdi. Herudover *settling time* som beskriver tiden før systemet har opnået output der ligger inden for en margin af 2% af den endelige værdi. Disse tider er angivet i tabel 5.1.

Egenskab	Værdi
Risetime	0.6 [s]
Settling time	1.07 [s]

Tabel 5.1: Modellen G_p 's egenskaber i tidsdomænet

Udover systemets egenskaber i tidsdomænet, har systemet også egenskaber i frekvensdomænet. Frekvensresponset eller bodediagrammet for systemet er vist på figur 5.9, og vigtige oplysninger fra bodediagrammet er vist i tabel 5.2.



Figur 5.9: Bodediagram for G_p

Egenskab	Værdi
Forstærknings margin (GM)	18.2 [dB]
Fase margin (PM)	∞

Tabel 5.2: Modellen G_p 's egenskaber i frekvensdomænet

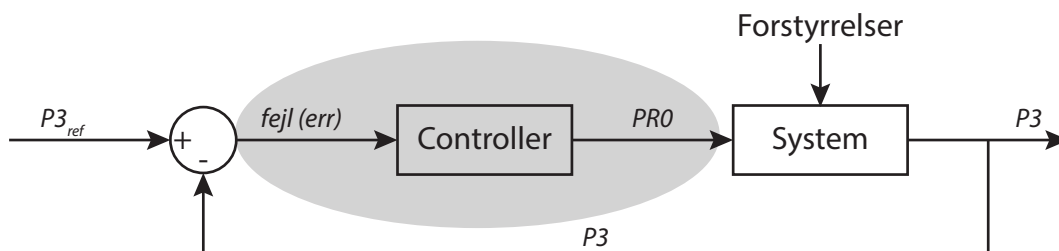
På bodediagrammet kan det ses at systemet er stabilt, idet både fase margin og forstærknings margin begge er større end 0. Samtidig skal det bemærkes at fassen næsten ændres 180° ved lave frekvenser. Dette er et resultat af at systemet har et positivt input og et negativt output. Forstærkningen er også negativ, da forstærkningen er angivet i dB, betyder det at den reelle forstærkning i systemet er under 1, ved alle frekvenser. Altså sendes der et input på 1 ind i systemet, vil der uanset frekvens returneres et tal der er mindre. Der kommer altså et output, som er mindre og med modsat fortegn. Dette stemmer godt overens med at der angives et positivt tryk i bar, P_{R0} , som input og et negativt tryk i bar, som er ca. en faktor 10 mindre som output, P_3 .

Disse informationer om systemet er vigtig, når der skal udvikles en regulering til systemet. Da der ved hjælp af endnu en overføringsfunktion indsættes nye poler og nulpunkter, som ændre på systemets frekvensrespons, og dermed gør det muligt at placere poler og nulpunkter således systemet bliver ustabil, hvilket der ikke ønskes.

UDVIKLING AF REGULERING

Formålet med at udvikle en regulering, er at gøre det fysiske system hurtigere, således der hurtigere bliver opbygget det nødvendige tryk. Herudover er det også et formål at, sikre det nødvendige tryk altid er tilstede i systemet, også i tilfælde hvor der sker uforudsete forstyrrelser i systemet.

I dette afsnit er det, som vist på figur 6.1 controlleren der er fokus på.



Figur 6.1: Blokdiagram

Ud fra blokdiagrammet kan det ses, at der skal udvikles en regulator, hvor fejlen mellem den ønskede værdi af $P3$ og den målte værdi af $P3$ er inputtet og PRO er outputtet.

6.1 Regulator type

Der findes en lang række forskellige regulator typer, som vil kunne regulere systemet. Der er her tale om et lukket sløjfe system, da den målte værdi indgår, som en del af reguleringen. Det er altså en regulering der skal anvendes og ikke en styring, da en styring som regel ikke tager hensyn til et feedback.

Af forskellige regulator typer, kan der blandt andet nævnes Phase-lead, Phase-lag og PID. Phase-

lead og Phase-lag begge regulatorer, der hver introducere én pol og et nulpunkt, og derigennem er det muligt at placere to nye knæk på bodediagrammet således forstærkning og fase kan flyttes så der opnås en ønsket fase margin og forstærkningsmargin.

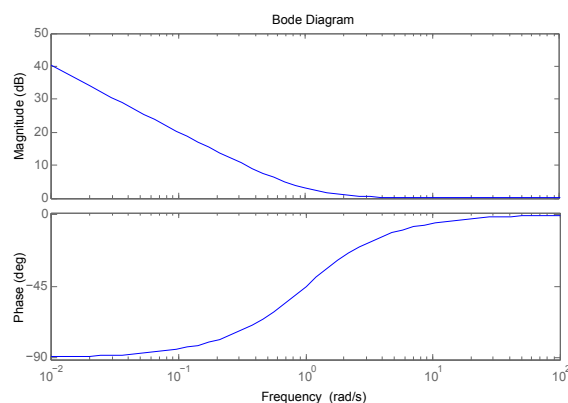
En PID regulator, giver på mange måder det samme resultat, som en kombination af Phase-lead og Phase lag. En PID regulator består af tre sammensatte regulator typer. Et **P**roportional forstærknings led, et **I**ntegrale led og et **D**ifferencerings led. Disse tre typer, kan individuelt anvendes, eller anvendes i en sammenhæng hvor det ikke er nødvendigt at anvende alle led.

Til dette system er det valgt at anvende en PI-regulator, da den introducere en proportional forstærkning samt en pol og et nulpunkt. Polen og nulpunktet kan placeres således, at overføringsfunktionen for den lukkede sløjfe med regulatoren er hurtigere og vedhjælp af integral leddet, fjernes en eventuel stationær fejl, således regulatoren altid vil arbejde på at opnå den reference værdi der ønskes.

PI-regulatorens overføringsfunktion, er vist i formel 6.1, og består af to konstanter som skal bestemmes for at regulere systemet som ønsket, nemlig K_p og K_i .

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (6.1)$$

Bodediagrammet som vist på figur 6.2, viser hvordan en PI-regulering påvirker systemet. Som det ses forstærkes signaler ved lave frekvenser, mens der ikke sker noget med høje frekvenser. Samtidig forsinkes fasen ved lave frekvenser, mens høje frekvenser, ikke behandles.



Figur 6.2: Blokdiagram

For at være i stand at udvikle og vurdere kvaliteten af den regulator der udvikles, fastsættes der krav for regulatoren.

6.1.1 Krav til regulator

Kravene har udspring i den virkelige applikation. Her tager det robotten ca. $0.8[s]$ at køre ned til æggebakkerne og skifte retning, hvorefter den køre langsomt op, denne tid er aflæst ud fra et video klip. Derudover vides det, at der er en forskel mellem det virkelige system og et modellerede. Derfor sættet kraven til risetime og settling time forholdsvis højt, idet det applikationen da kan tillades at være lidt langsommere.

Samtidig sættes kravet om *Zero steady state error*, hvilket vil sige at systemet skal stabiliseres ved det valgte set punkt. Ved implementering af denne regulering, skabes der et oversving. Her er karvet at dette oversving ikke må overstige 30%, dette er ud fra en betragtning om at et stort oversving, kan have negativ indvirke på settling time.

Kravene til reguleringen er vist i tabel 6.1.

Krav	Værdi
Zero steady state error	
Risetime	0.2 [s]
Settling time	0.8 [s]
Max Overshoot	30%
Gain margin	$\geq 10\text{dB}$
Phase margin ϕ_m	$\geq 65 [\text{deg}]$

Tabel 6.1: Krav til regulering

Udover krav i tidsdomænet, er der også krav i frekvensdomænet, da det her stabiliteten kan angives. Da forskellen på det virkelige system og modellen, kan have indvirkning, er disse krav sat forholdsvis konservativt.

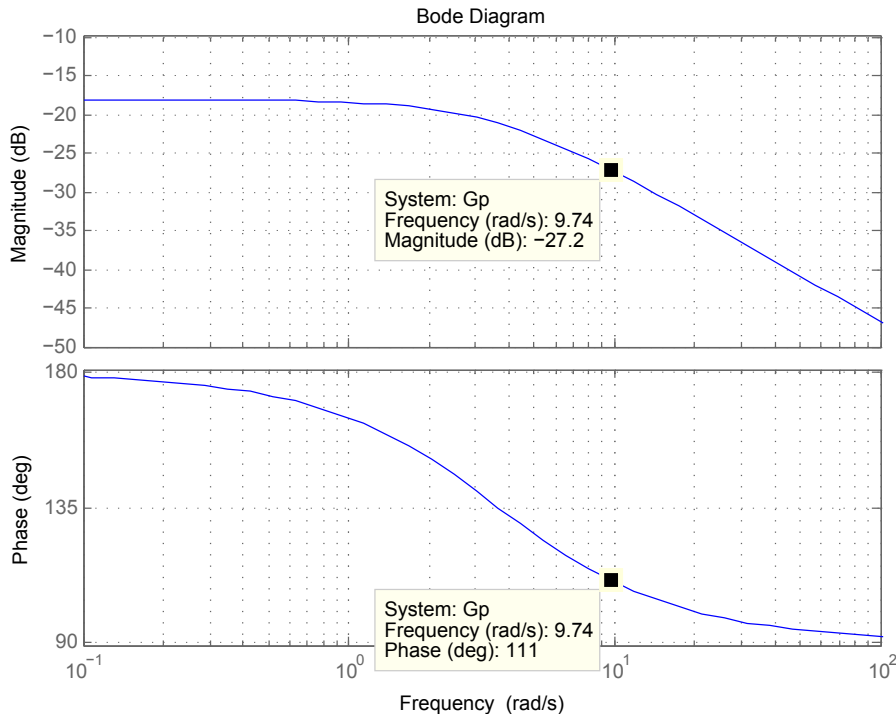
6.2 Udvikling af regulering

Som udgangspunkt ses det på figur 5.9 er fassen udelukkende positiv. Dette er atypisk for et dynamisk system. Derfor er det nødvendigt at fassen sammenholdes med 180° som den kritiske fase, i stedet for de normale -180° når der bestemmes konstanter til PI-regulatoren.

Først skal der bestemmes en frekvens hvor reguleringen skal virke. Dette gøres ved at bestemme den frekvens, som har den fase der ønskes som fasemargin. Normalt findes denne ud fra -180° , men da frekvensområdet udelukkende er positiv, findes den ud fra 180° som vist i formel 6.2, [Phillips og Parr, 2011].

$$180^\circ - \phi_m - 5^\circ = 180^\circ - 65^\circ - 5^\circ = 110^\circ \quad (6.2)$$

Frekvensen der har ca. 110° i fassen er fundet på bodediagrammet for systemet, som vist på figur 6.3 til at være $\omega_1 = 9.74 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$.



Figur 6.3: Bodediagram, hvor fassen 110° er angivet.

Det er samtidig aflæst, at forstærkningen ved denne er $-27.2[dB]$. Forstærkningen er angivet

i dB og da dB skalaen er en funktion af 10-tals logaritmen, skal den omregnes til en reel forstærkning, som vist i formel 6.3.

$$|G_p(j\omega_1)| = -27.2[dB] = 10^{\frac{-27.2}{20}} = 0.04365 \quad (6.3)$$

Samtidig, ses det også på bodediagrammet at fasen for frekvensen ω_1 er $\angle G_p(j\omega_1) = 111^\circ$.

Ud fra disse data, er det nu muligt at beregne de to konstanter til PI-reguleringen, nemlig proportional forstærkningen K_p og integral forstærkningen K_i [Platin, 2013].

Først beregnes kompensatorvinklen θ , som der skal tages højde for i beregningen af konstanterne som vist i formel 6.4.

$$\theta = -180^\circ + \phi_m - \angle G_p(j\omega_1) = -180^\circ + 65^\circ - 111^\circ = -226^\circ \quad (6.4)$$

Herefter beregnes, proportional forstærkning K_p , som vist i formel 6.5. Dette er den direkte forstærkning en fejl forstærkes med i regulatoren.

$$K_p = \frac{\cos(\theta)}{|G_p(j\omega_1)|} = \frac{\cos(-226)}{0.04365} = -15.9 \quad (6.5)$$

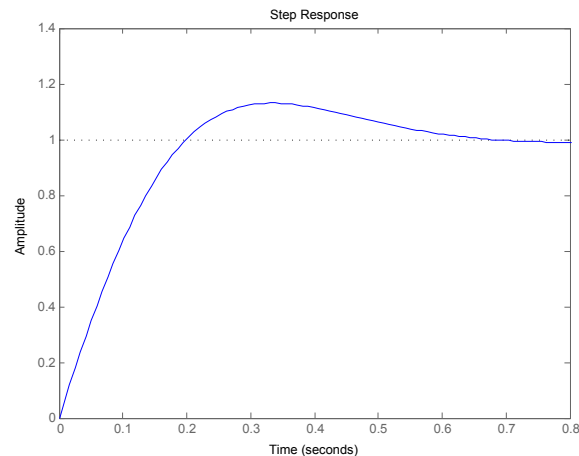
Med K_p beregnet, skal K_i beregnes, som er den faktor integral leddet i regulatoren forstærkes med. Integralforstærkningen er beregnet i formel 6.6.

$$K_i = -\omega_1 \frac{\sin(\theta)}{|G_p(j\omega_1)|} = -9.74 \cdot \frac{\sin(-226)}{0.04365} = -160.5 \quad (6.6)$$

Med disse konstanter er det nu muligt at konstruere en overføringsfunktion for PI-regulatoren, som er vist på formel 6.7.

$$G_c(s) = -15.9 \cdot \frac{-160.5}{s} \quad (6.7)$$

For at afprøve reguleringens respons på systemet, foretages der en step analyse på lukke sløjfe overføringsfunktionen for hele systemet. Dette step respons er vist på figur 6.4, derudover kan værdierne for de forskellige egenskaber ses i tabel 6.2.



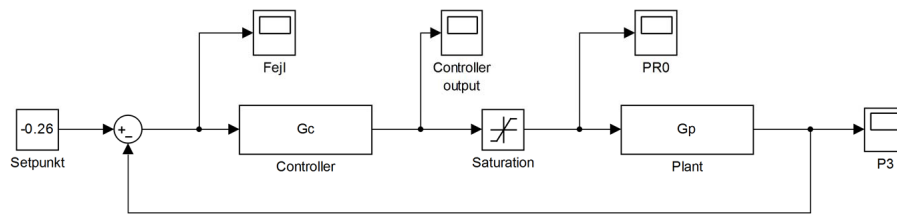
Figur 6.4: Stepresponse for lukkesløjfe overføringsfunktionen

Krav	Værdi
Zero steady state error	
Risetime	0.1491 [s]
Settling time	0.5980 [s]
Max Overshoot	13%
Gain margin	∞
Phase margin ϕ_m	128 [deg]

Tabel 6.2: Egenskaber for lukkesløjfe overføringsfunktion

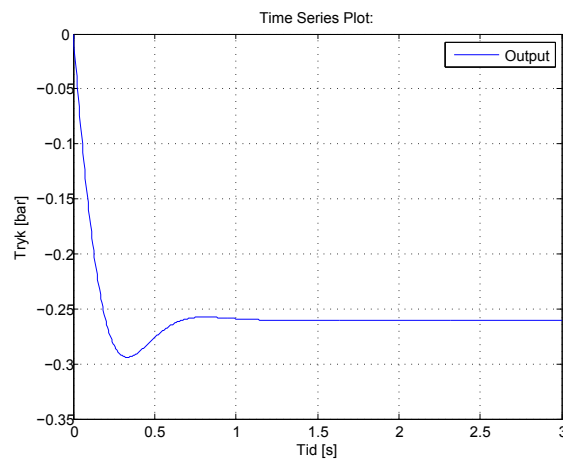
Ud fra tabellen, ses det at den udviklede regulering, matematisk overholder alle de opstillede krav. Der er dog en antydning, af at reguleringen kan tunes, således den bliver hurtigere.

Herudover er systemet programmeret i simulationssoftwaren Simulink, som er den del af Matlab. Ved at opsætte blokdiagrammet, for hele systemet, inklusiv reguleringen G_c , systemet G_p , feedback signal og reference tryk. Simulink modellen er vist på figur 6.5, hvor der også indsat målepunkter, både før og efter regulatoren. Her udover er der indsat en begrænsning, der sikre at outputtet fra reguleringen ikke overstiger det fysik mulige for proportionalventilen i systemet.



Figur 6.5: Simulink simulering af systemet

Outputtet fra Simulink modellen er vist på figur 6.6, og viser at det ønskede vakuum tryk opnås, uden fejl og er stabiliseret inden for samme tid, som angivet i tabel 6.2.



Figur 6.6: Output af $P3$ fra simulering i Simulink

Ud fra informationerne i tabel 6.2 og behandlingen i Simulink, er det valgt at arbejde videre med denne regulering, da den høje fase margin, kan være med til at sikre implementeringen ikke resultere i et ustabil system.

6.3 Klargøring til implementering af regulering

For at kunne implementere en regulering, for eksempel i en microcontroller er det vigtigt at den beregnede regulator diskretiseres. Når en overføringsfunktion diskretiseres, bliver det muligt at regulere på målinger, taget med et bestemt tidsinterval. På den måde er det ikke nødvendigt med et realtidssystem til at styre og håndtere reguleringen, som det ville kræve hvis en regulator skulle implementeres direkte fra Laplace domænet, eller s -domænet.

Når en overføringsfunktion skal diskretiseres, er det vigtigt at kende tiden mellem målingerne, også kaldet samplings tiden T . Denne kan beregnes ud fra systemets båndbredde, som kan aflæses på bodediagrammet for systemet. Båndbredden er den frekvens, som har en forstærkning på $-3[dB]$ [Geene F. Franklind, 2006].

Ved dette system er båndbredden $\omega_{bw} = 13[rad/s]$, ud fra dette kan der beregnes en samplingsfrekvens, som vist i formel 6.8

$$\omega_s = 25 \cdot \omega_{bw} = 25 \cdot 13[rad/s] = 315[rad/s] \quad (6.8)$$

Herefter kan denne samplingsfrekvens beskrives i [Hz], som er antallet af målinger pr sek.

$$f_s = \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{315[rad/s]}{2\pi} = 51.8[Hz] \quad (6.9)$$

Frekvens som beregnet i formel 6.9, kan da omregnes til en samplings tid, som vist i formel 6.10

$$T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{51.8[Hz]} = 0.019[s] \quad (6.10)$$

Det er altså nødvendigt at have en samplings tid på maks. $T = 0.019[s]$ for at kunne beskrive en regulator diskret. For at sikre der tages nok samples, sættes $T = 0.01[s]$.

Med denne faktor kan de to overføringsfunktioner for hhv. systemet G_p og controlleren G_c beskrives i z-domænet som er et diskret domæne.

Til diskretisering af overføringsfunktionerne anvendes Matlab, med kommandoerne `c2d(Gp,0.01,'tustin')` og `c2d(Gc,0.01,'tustin')`. Disse kommandoer returner overføringsfunktioner i z-domænet med samplingstiden $0.01[s]$. Derudover specificeres metoden `tustin`, som er en bilinear metode til at overføre overføringsfunktioner fra s-domænet til z-domænet.

Efter overføringsfunktionerne er overført til z-domænet, kan systemet beskrives ved formel 6.11 og controlleren formel 6.12.

$$G_p D(z) = \frac{-0.002224z - 0.002224}{z - 0.964} \quad (6.11)$$

$$G_c D(z) = \frac{15.1 - 16.7z^{-1}}{z^{-1}} \quad (6.12)$$

For at kunne implementere controllerfunktionen $G_c D$, er det nødvendigt at oversætte den til en kode, som kan programmeres i en microcontroller. Ved at se på placeringen af z i $G_c D$, kan en sådan kode og dens komponenter direkte aflæses, da leddene i tælleren, fortæller hvordan fejlen skal behandles og leddene i nævneren angiver, hvordan output og forrige outputs skal behandles [Geene F. Franklind, 2006]. Når en sådan kode skal køre i et feedback loop i en microcontroller, kan der gemmes variabler der indeholder informationer fra sidste gang loopet blev afviklet. Dette er der brug for her, da det i tælleren kan aflæses at fejlen fra en aktuel gennemkørsel skal multipliceres med -16.7 og fejlen fra sidste gennemkørsel af loopet skal multipliceres med 15.1 .

På samme måde kan ses, at outputtet kun skal medtages, og ikke behandles. Den sammensatte funktion er vist i formel 6.13.

$$u(k) = u(k - 1) - 16.7e(k) + 15.1e(k - 1) \quad (6.13)$$

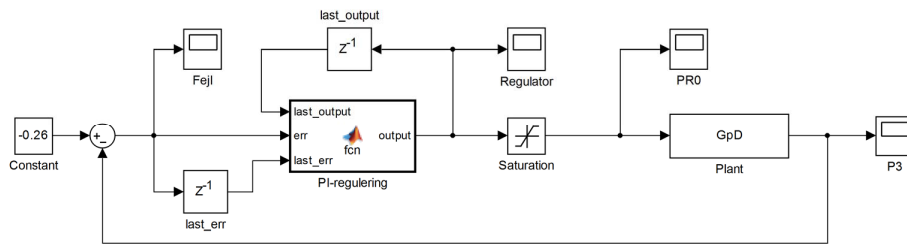
Hvor

- $u(k)$ er outputtet
- $u(k - 1)$ er outputtet fra forrige loop
- $e(k)$ er nuværende fejl
- $e(k - 1)$ er fejlen fra forrige loop

For at kunne håndtere disse, er hver ad de fire komponenter i regulatoren navngiver på følgende måde:

- $u(k)$ = output
- $u(k - 1)$ = last-output
- $e(k)$ = err
- $e(k - 1)$ last-err

For at kontrollere at systemet stadig har samme karakterstik og opførsel, konstrueres der endnu en Simulink model. Denne model arbejder diskret med en samplings tid på $0.01[s]$. Programmet er vist på figur 6.7.



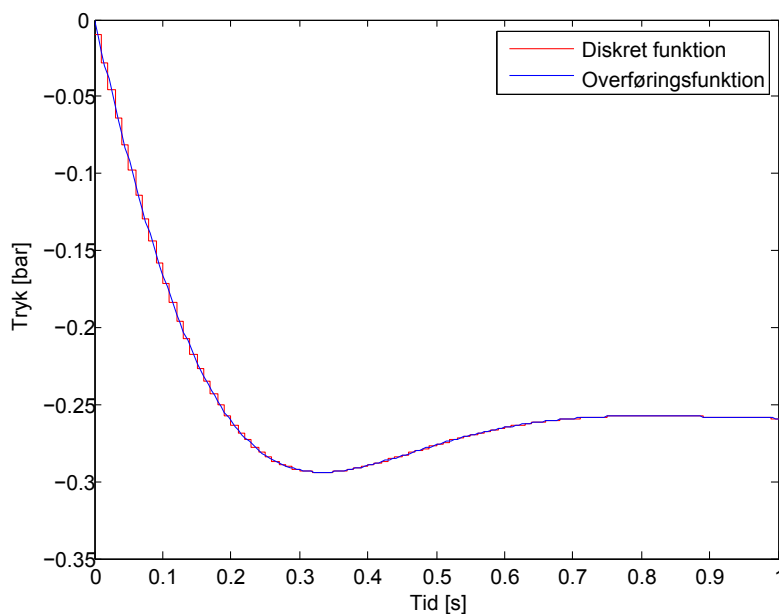
Figur 6.7: Simulink simulering af det diskrete systemet

Her er der indsat nogle nye bokse, i forhold til systemet vist på figur 6.5. Reguleringen er en kodet funktion, som tidligere bekræftet, og vist herunder.

```
function output = fcn(last_output , err , last_err)
output=last_output + (-16.7)*err + 15.1*last_err ;
```

Til PI-Reguleringen er der tre inputs, som grafisk også er vist på figur 6.7, boksede markeret med z^{-1} , gemmer en værdi til næste gang loopet gentages. Derved udgør de begge variabler, der er navngivet last.

Responset for dette det diskrete system er vist på figur 6.8. Her ses det tydeligt, hvad diskretiseringen har af indvirkning på systemet, da det er tydeligt hvordan en værdi fastholdes, og kun opdateres ved samplingstiden.



Figur 6.8: Output af $P3$ fra simulering af det diskrete system i Simulink

Herudover ses det at det diskrete system har samme opførsel som i s-domænet. Derfor vurderes det at der er valgt en korrekt samplings tid. Modellen har altså ikke ændret karakter, og derfor vurderes det at reguleringen kan implementeres på det fysiske system.

6.4 Implementering af regulering

Til implementering af reguleringen, anvendes der igen en arduino. Arduinoen programmeres på samme måde som beskrevet i Matlab. Her under er selve reguleringskoden, som programmeret i arduinoen vist. Hele koden kan ses i bilag D.

```
void callback()
{
  if(digitalRead(plcpin)==HIGH){ \\ Tjek om PLC programmet er aktiveret
  Readdata(); \\ Læs sensorenes værdi
  err = setpunkt - P3; \\ Beregn fejlen
  output=last_output+(-16.7)*err+15.1*last_err; \\Beregn output
  PRO_trin=constrain(output, 0, 5); \\ Begræns output, hvis over 5 bar

  freq=map(PRO_trin,0,10,100,10100); \\ Konverter til frekvens
  tone(freqpin, freq); \\ Send frekvens til f/i converter

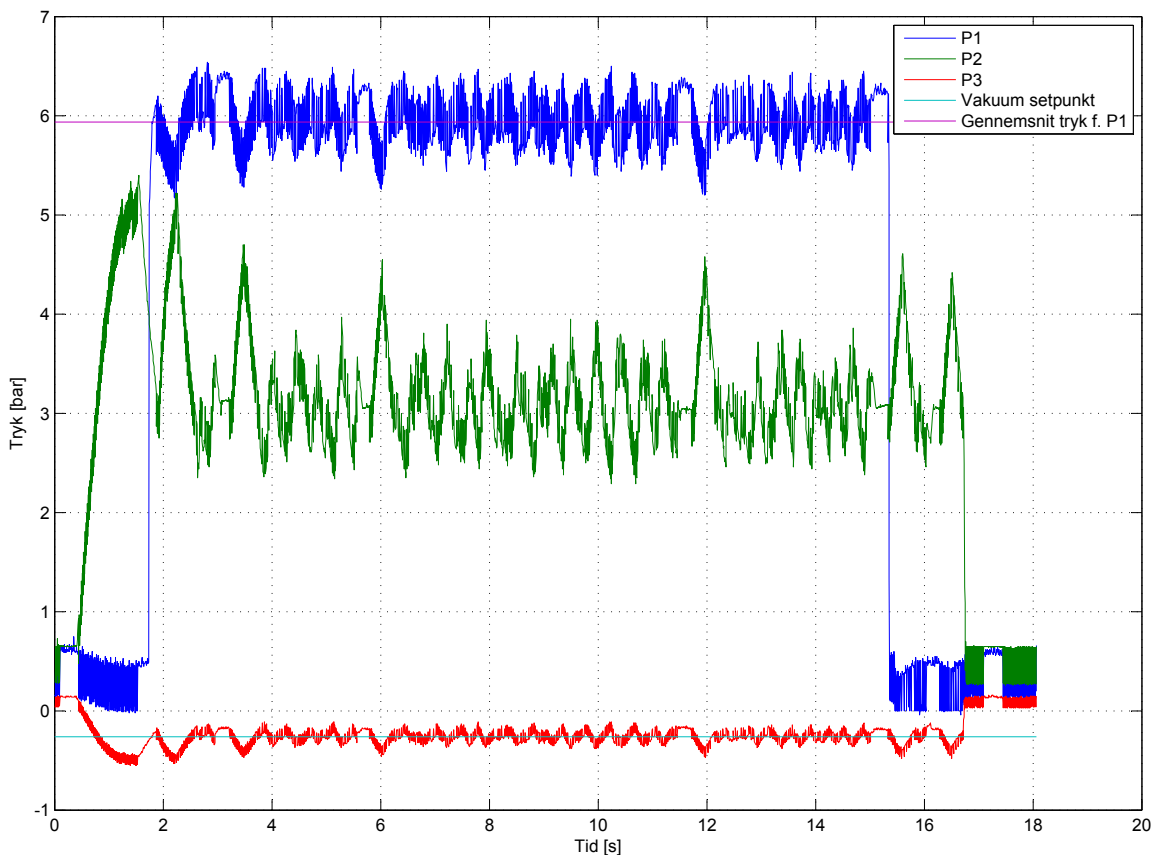
  last_output = output; \\ Opdater variabelen
  last_err = err; \ Opdater variabelen

  Printdata(); \\ log data
  }
}
```

Reguleringen er indsat som en funktion, i arduinoen. Denne funktion er dernæst tilknyttet en timer, der aktiveres hver gang der er gået $0.01[s]$. Dette sker igennem et interrupt, som betyder, at uanset hvad arduinoen ellers er kommet til i den primære loop, vil et interrupt altid have 1. prioritet, og dermed bryde ind i det loop som ellers køre på microcontrolleren.

Dette er for at sikre, at målinger bliver taget med et bestemt tidsinterval, som beskrevet i sektion 6.3. Hvis ikke dette tidsinterval overholdes, vil regulerings komponenter have en negativ indvirkning på regulerings funktion.

På figur 6.9 er målinger fra systemet, hvor reguleringen er implementeret.



Figur 6.9: Tryk i systemet, ved kørsel med regulering

På grafen er der vist tre tryk om er logget mens systemet har kørt, dette er trykket til cylinderen $P1$, indgangstrykket til vakuumejektoren $P2$ og vakuumtrykket $P3$. Herudover er set punkt for regulering af vakuumtrykket markeret, samt et beregnet gennemsnit af trykket i cylinderen.

På grafen kan det ses at vakuumtrykket generelt ligger omkring set punktet, dog med en del oscilleringer. Samtidig ses det også at der er et væsentligt større overshoot end forventet, og det tager længere tid for trykket at finde et stabilt niveau. Dette skyldes sandsynligvis at den indbyggede PID-regulator i proportionalventilen er langsommere end den implementerede. Dette vurderes også at være hovedårsagen til de oscilleringer, der ses omkring set punktet.

På grafen er der også vist et gennemsnit for det tryk der virker på cylinderen. Dette tryk er beregnet til $5.9[\text{bar}]$, hvilket er væsentligt højere, end målingerne uden regulator viste.

KONKLUSION

Hovedformålet med dette projekt, var at konstruere en testopstilling der kunne genskabe problemerne med trykfald, når vakuumejektoren var aktiveret. Derudover at undersøge om en regulering kunne mindske dette tryktab i systemet.

Der blev bygget en testopstilling, som hovedsageligt bestod af samme komponenter som kunne findes på robothovedet. Målinger viste at trykket i systemet faldt, når vakuumejektoren var aktiveret. Testopstillingen vist altså samme problemstilling som ved robothovedet.

Ud fra velovervejede og planlagte forsøg, blev der indsamlet data på baggrund af sensor værdier fra testopstillingen. De indsamlede data viste alle samme tendens.

På baggrund af de indsamlede data, blev der modelleret en matematisk model af systemet. Dette var ved hjælp af "black box" metoden og generelle teorier omkring systemidentifikation.

Til den matematiske model, blev der valgt regulerings type og opstillet krav til denne. Igennem en analytisk tilgang blev der udviklet en række komponenter til reguleringen. Reguleringen der blev udviklet kunne matematisk overholde de opstillede krav. Herefter blev reguleringen diskretiseret, således den kunne programmeres og derved implementeres på testopstillingen.

Ved implementeringen viste målinger at, tryktabet i systemet var væsentligt mindre, end målingerne uden regulator viste. Desværre viste vakuumtrykket en del oscilleringer, trykket oscillerede omkring det valgte set punkt, hvilket viser at regulatoren prøvede at opretholde det ønskede tryk.

Dette vurderes at være et fornuftigt resultat, da tryktabet i systemet er reduceret, samtidig med det ønskede vakuumtryk er opnået. Regulatoren har dog vist plads til forbedringer.

PERSPEKTIVERING

Det er i rapporten vist, at det er muligt at udvikle en regulering, således tryktabet i systemet minimeres.

Skulle denne regulering implementeres i et system, der skulle virke i en produktion ville det være nødvendigt at undersøge en alternativ proportional ventil, da det har vist sig problematisk, både at modellere og regulere en ventil med en indbygget regulering.

Når der var fundet et alternativ, ville det være nødvendigt at modellere systemet igen, her kunne det også være en fordel, at se på hvilke parametre der anvendes som input og outputs, både for regulering og system, da det umiddelbart byder på udfordringer at de to har forskellige fortegn.

Samtidig skulle der findes et alternativ til arduinoen, da den ikke er godkendt til industriel brug. Dog vil koden til at styre reguleringen kunne genbruges. Her kunne det være interessant at se på om en PLC kunne klare opgaven med den hurtige samplings tid. Da det her ville være relativt simpelt at implementere koden.

Projektet har givet stort indblik i anvendelsen af vakuum, og hvis ikke hele processen som er beskrevet i rapporten kan anvendes, så er der mange små dele og viden som uden tvivl vil kunne anvendes i andre projekter hvor der anvendes både trykluft og vakuum.

LITTERATUR

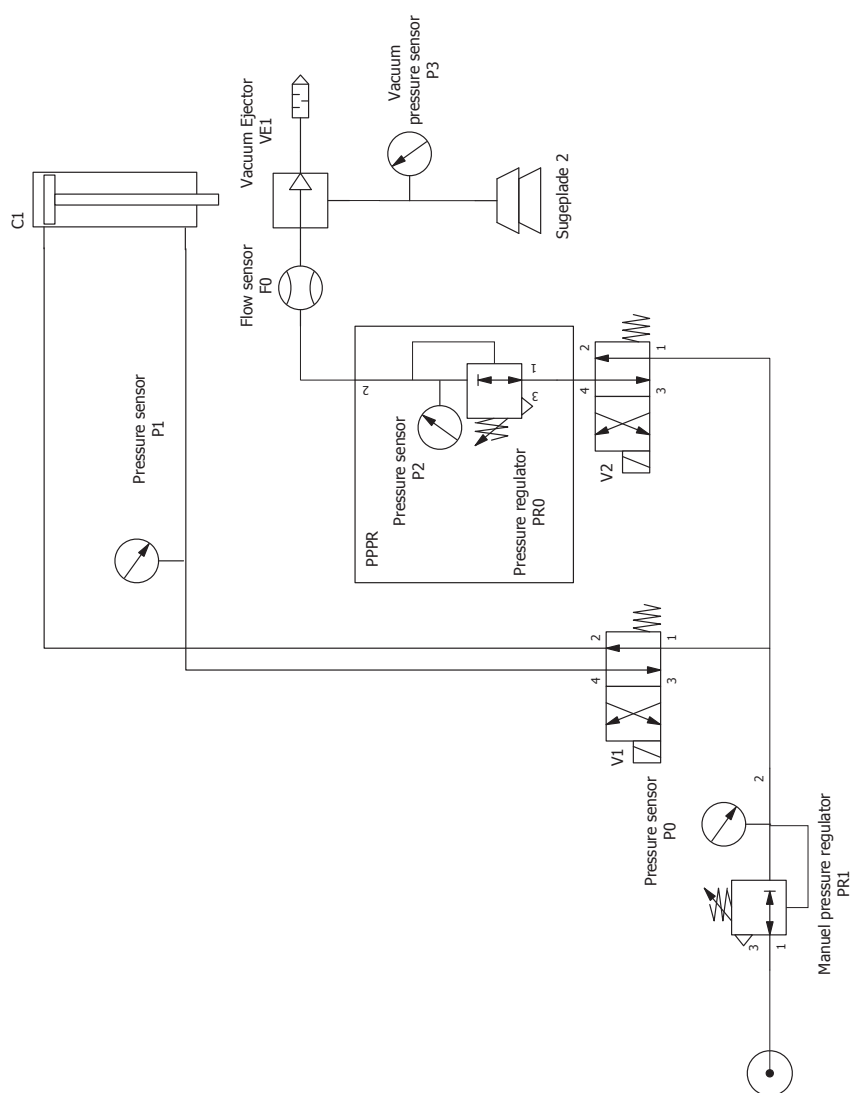
- Festo, Ukendt årgang.** Festo. *Basic principles of vacuum technology*. URL:
<http://www.festo.com/net/da.dk/SupportPortal/Downloads/10106>, Ukendt årgang.
Tilgæet: 6/12-2013.
- Geene F. Franklinn, J. David Powell, 2006.** Abbas Emamin-Naeini Geene F. Franklinn, J. David Powell. *Feedback control of Dynamic Systems*. ISBN: 0-13-149930-0, 5th edition. Pearson Prentice Hall, 2006.
- Heilmann, 2008.** Thomas Heilmann. *Logisk styring med PLC*. ISBN: 978-87-90603-13-7, 5. Udgave. Heilmanns Forlag, 2008.
- Ljung, 1999.** Lennart Ljung. *System Identification: Theory for the User*. ISBN: 978-0136566953. Prentice Hall, 1999.
- Matlab, Ukendt årgang.** Matlab. *Detrending Data*. URL:
http://www.mathworks.se/help/matlab/data_analysis/detrending-data.html, Ukendt årgang. Tilgæet: 26/12-2013.
- Montgomery, 2013.** Douglas Montgomery. *Design and Analsis of Experiments*. ISBN: 978-1-118-09793-9. John Wiley and Sons, Inc., 2013.
- Phillips og Parr, 2011.** C.L. Phillips og J.M. Parr. *Feedback Control Systems*. Prentice Hall PTR, 2011. ISBN 9780131866140.
- Platin, 2013.** Dr. Bülent Emre Platin. *Analytical Phase Lag, Phase Lead and PID Design in Frequency Domain*. URL:
[http://www.me.metu.edu.tr/courses/me442/AnalyticalLeadLagPID\(FR\).pdf](http://www.me.metu.edu.tr/courses/me442/AnalyticalLeadLagPID(FR).pdf), 2013.
- SMC, Ukendt årgang.** SMC. *Series ZH Vacuum Ejector Datablad*. URL:
http://content2.smcetech.com/pdf/ZH_EU.pdf, Ukendt årgang. Tilgæet: 6/12-2013.

Sørensen, 31. aug 2012. Eskil Sørensen. *Robotter og automation øger virksomhedernes konkurrenceevne*. Ingeniøren, 31. aug 2012. Tilgået: 14/01-2014.

Vaccon, Ukendt årgang. Vaccon. *Vacuum Cups*. URL:
<http://www.vaccon.com/pdfFiles/Cup-Selection-Guide.pdf>, Ukendt årgang. Tilgået:
6/12-2013.

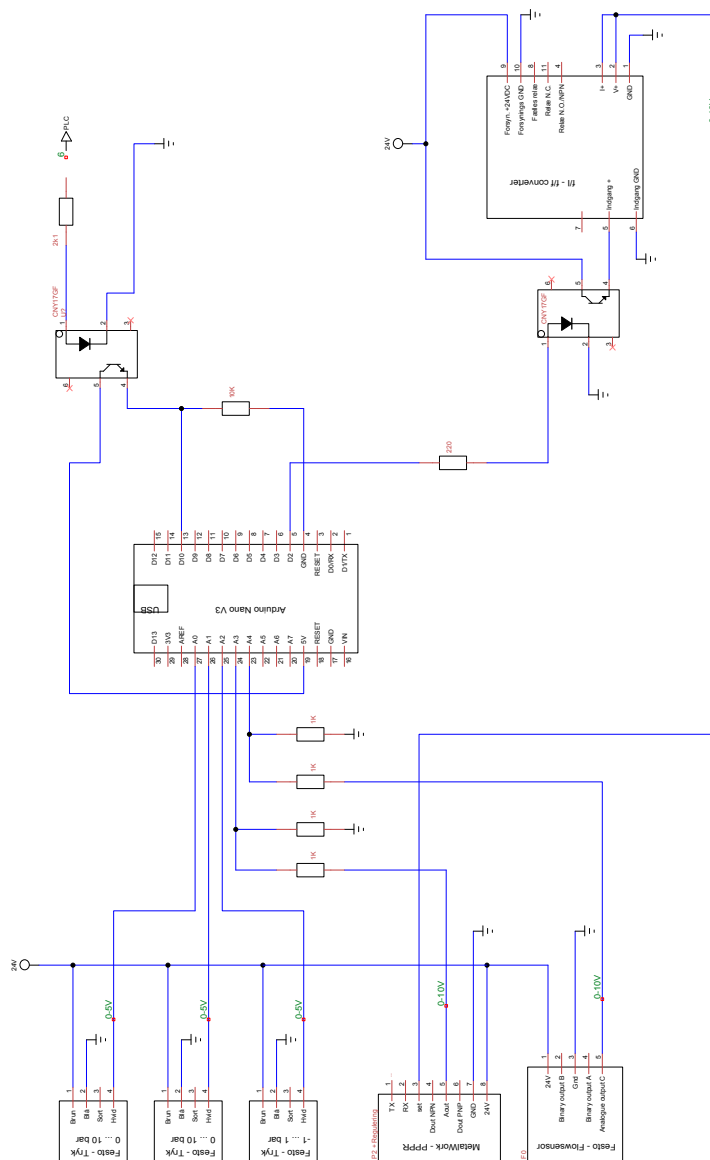
Young og Freedman, 2008. Hugh D. Young og Roger A. Freedman. *University Physics*.
ISBN-13: 978-0-321-50130-1, 12. Udgave. Pearson, 2008.

PNEUMATISK DIAGRAM



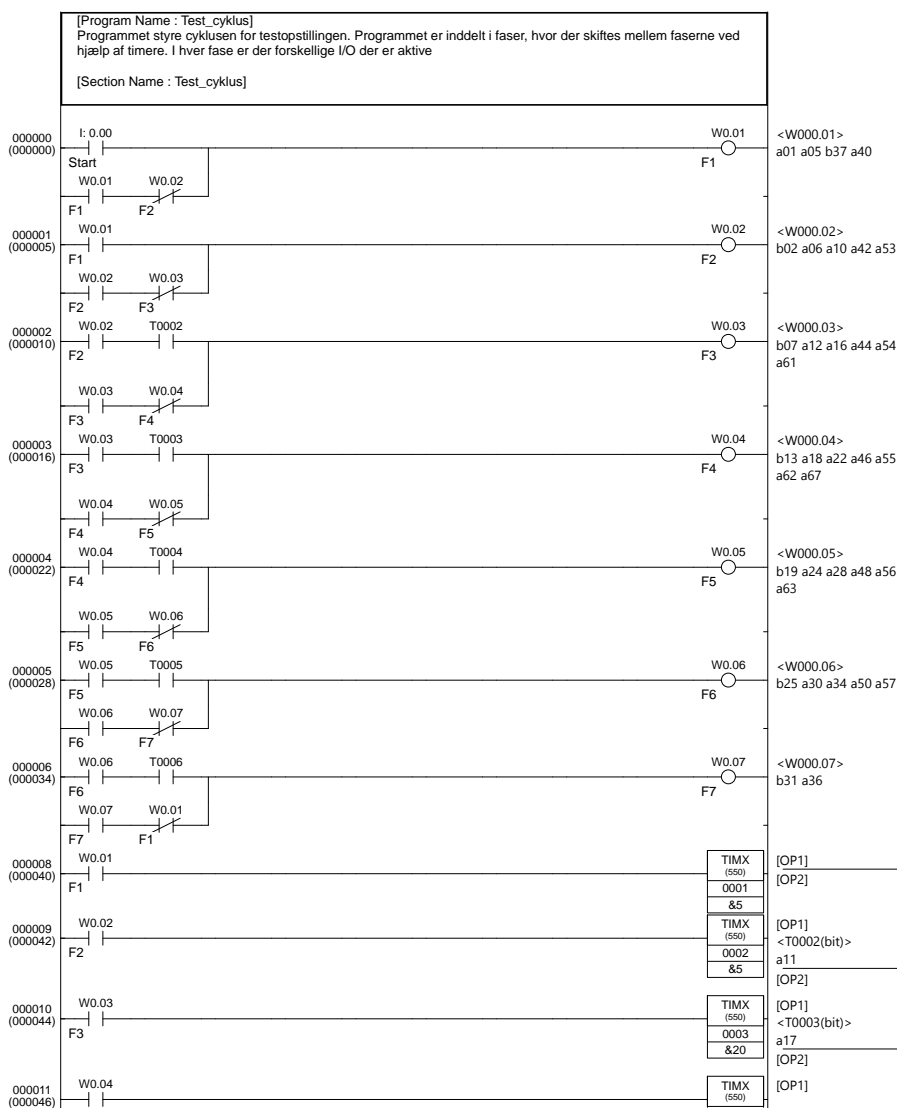
Figur A.1: Pneumatisk diagram for det simplificerede system, inkl sensorenes placering

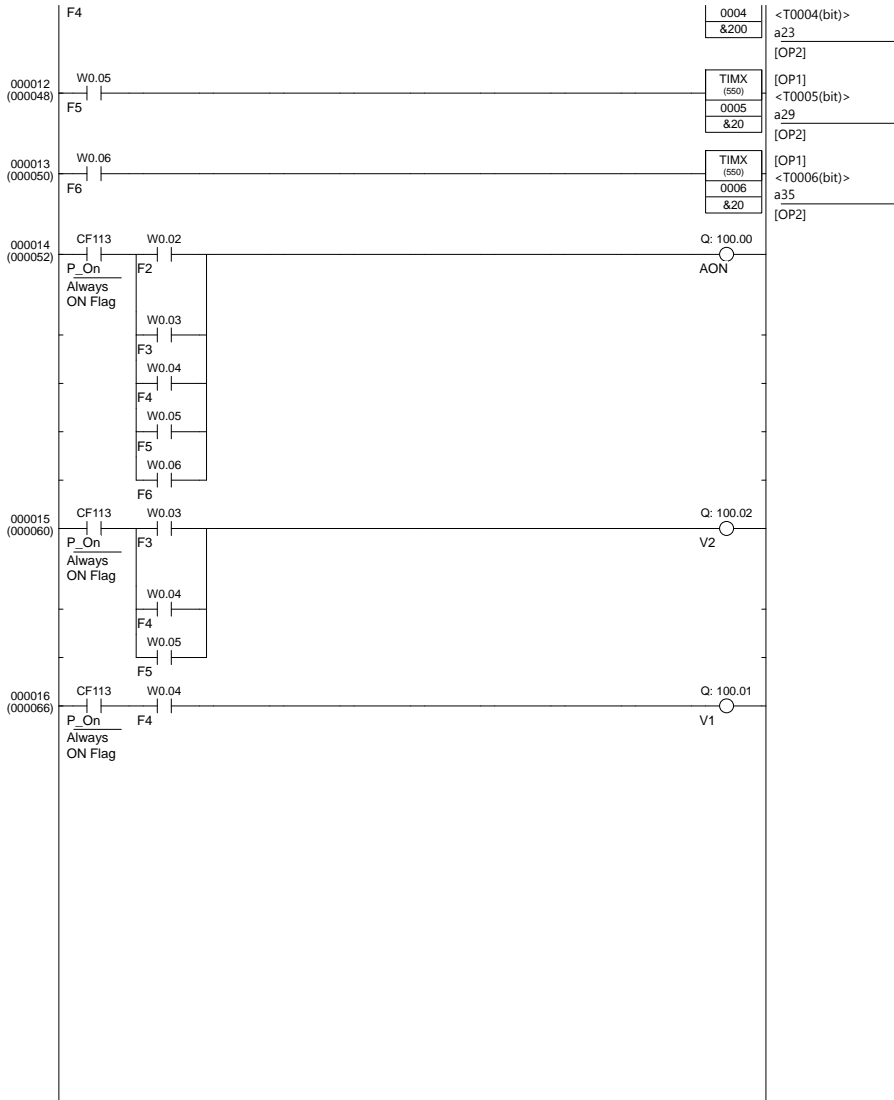
EL DIAGRAM



Figur B.1: Eldiagram for testopstilling

PLC LADDER DIAGRAM





ARDUINO KODE FOR REGULERING

```
#include <TimerOne.h> // Timer bibliotek
double P0=0.00; //Trykket P0
double P1=0.00; //Trykket P1
double P2=0.00; //Trykket P2
double P3=0.00; //Trykket P3
double time1=0.00; //Tiden

int plcpin=10; //Inputpin fra PLC
int lastplc=0; //Plc statis

float PR0_trin=0.00; //Vaerdi for PRO
unsigned int freq=0; //Frekvens til F/I
int freqpin=2; //Pin til f/I converter

unsigned long time=0;
unsigned long starttime=0;

//PI-variabler
float last_output=0.00;
float output =0.00;
float err=0.00;
float last_err=0.00;
float setpunkt=-0.26;

void setup()
{
  Serial.begin(1843200); //Start serial
  pinMode(plcpin,INPUT); //Set plcpin til Input
  Timer1.initialize(10000); // initialize timer1, til 0.01 sek
  Timer1.attachInterrupt(callback); // attaches callback() as a timer overflow interrupt
}

void loop()
{
  tone(freqpin, freq);
  lastplc=0; // Aktiver header variabel
```

```

    if(digitalRead(plcpin)==HIGH && lastplc==0){ // Send header til serial
        Serial.println("Maaleserie");
        Serial.println("-----");
        printhead();
        starttime=micros();
    }
    while(digitalRead(plcpin)==HIGH){ // Mens PLC er aktiv
        lastplc=1; // Nulstil Header variabel
        tone(freqpin, freq); // Send frekvens
    }

}

void callback()
{
    if(digitalRead(plcpin)==HIGH){ // Tjek om PLC programmet er aktiveret
        Readdata(); // Laes sensorenes vaerdi
        err = setpunkt - P3; // Beregn fejlen
        output=last_output+(-16.7)*err+15.1*last_err; //Beregn output
        PRO_trin=constrain(output, 0, 5); // Begræns output, hvis over 5 bar

        freq=map(PRO_trin,0,10,100,10100); // Konverter til frekvens
        tone(freqpin, freq); // Send frekvens til f/i converter

        last_output = output; // Opdater variabelen
        last_err = err; // Opdater variabelen

        Printdata(); // log data
    }
}

void Readdata(){
    // Kode til at foretage maalinge!
    time1=(micros()-starttime)/1000000.00;

    P0=constrain(analogRead(0),204,1023);
    P0=(P0-204)*0.012225;

    P1=constrain(analogRead(1),204,1023);
    P1=(P1-204)*0.012225;

    P2=constrain(analogRead(2),0,1023);
    P2=P2*0.0097752; // 10/1023, for at faa maaling i bar

    P3=constrain(analogRead(3),204,1023);
    P3=(P3-204)*0.0024450-1;
}

```

```
}

void Printdata(){
    //Print maalingen
    Serial.print(time1);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(PRO_trin);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(P0);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(P1);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(P2);
    Serial.print("\t");
    Serial.println(P3);
}

void printhead(){
    // Header ved ny maaling!
    Serial.print("time");
    Serial.print("\t");
    Serial.print("Input");
    Serial.print("\t");
    Serial.print("P0");
    Serial.print("\t");
    Serial.print("P1");
    Serial.print("\t");
    Serial.print("P2");
    Serial.print("\t");
    Serial.println("P3");
}
```


E.1 Datablade på pneumatiske komponenter

Indhold af mappen **Datablade på pneumatiske komponenter** på bilag cd.

- Festo DFM-12-80-P-A-KF
- Festo SPAB-P10-G18-PB-L1 / SPAB-B2R-G18-PB-L1
- Festo SFAB-200U-WQ8-2SV-M12
- SMC ZH-13-D-L
- MetalWork REGTRONIC
- Festo LR-QS-8
- Coval VS32STN

E.2 Måledata

Indhold af mappen **Måledata** på bilag cd.

- Optrap1.txt, Optrap1.pdf - Måleserier hvor PR0 gradvist optrappes
- Optrap2.txt, Optrap2.pdf
- Optrap3.txt, Optrap3.pdf
- Optrap4.txt, Optrap4.pdf
- Rand1.txt, Rand1.pdf - Måleserier hvor PR0 vælges tilfældigt
- Rand2.txt, Rand2.pdf
- Rand3.txt, Rand3.pdf
- Rand4.txt, Rand4.pdf

E.3 Arduino programmer

Indhold af mappen **Arduino programmer** på bilag cd.

- maalekode.ino - Koden anvendt til at logge måledata
- regulering.ino - Koden hvor reguleringskoden er implementeret.

E.4 PLC program

Indhold af mappen **PIC program** på bilag cd.

- Program.cxp - PLC program fra CX-Programmer

E.5 Måledata - med regulering

Indhold af mappen **Måledata - med regulering** på bilag cd.

- Implementering-run1.txt, Implementering-run1.pdf
- Implementering-run2.txt, Implementering-run2.pdf
- Implementering-run3.txt, Implementering-run3.pdf
- Implementering-run4.txt, Implementering-run4.pdf
- Implementering-run5.txt, Implementering-run5.pdf

E.6 Elektronisk kopi af rapport

Indhold af mappen **Elektronisk kopi af rapport** på bilag cd.

- Modellering og regulering af et konstrueret pneumatisk system til håndtering af fødevare.pdf