



UNIVERSITY OF AGDER

KONSTRUKSJON OG STYRING AV FRIFORM RØRBØYEMASKIN

<Undertittel>

**Ine Lee Steinsland
Yasin Chris Aure Fiaz**

Supervisor
Morten Ottestad

University of Agder, 2018
Faculty of Engineering and Science
Department of Engineering Sciences

Takksigelser

Morten Ottestad, Morten Kjeld Ebbesen, Tore Saua, Helge Falkum Igus for hjelp med lager og sponsing(?) av dette.

Abstrakt

Innhold

List of Figures	vii
List of Tables	viii
1 Introduksjon	1
1.1 Metodikk	1
1.2 Avgrensning	1
1.3 Eksisterende rørbøyeteknikker	1
2 Teori	2
2.1 CNC-styring	2
2.2 Kaldbearbeiding	2
2.3 Gripemekanisme	2
2.4 Belastninger	2
3 Konstruksjon og styring	7
3.1 Utstyr	7
3.2 Design	7
3.3 Materialer	8
3.4 Mating av rør	9
3.4.1 Gripehus	11
3.4.2 Opplagring	12
3.5 Rotasjon av rør	12
3.5.1 Elektrisk sylinder	14
3.6 Bøyemekanisme	14
3.6.1 Sfærisk lager	14
3.7 XY-bord	14
3.7.1 Ledeskinne	15
3.7.2 Ledeskruer	15
3.7.3 Motorer	15
3.8 Motordrivere	15
3.9 Mach3-software	17
3.9.1 CAD til G-code	20
4 Resultater	21
4.1 Analyse	21
4.2 Testing av rør	21
5 Diskusjon	22
5.1 Prinsipper, Forhold, Generaliseringer	22
5.2 Presentasjon av analyse, modell eller teori	22
5.3 (Utfordringer)	22
5.4 (Mulige forbedringer)	22
6 Konklusjon	23

Tillegg A Arduino kode for enkoder	24
Tillegg B Matlab kode	26

Figurer

2.1	Krefter på rør	3
2.2	Plastisk deformasjon	4
2.3	Elastisk deformasjon	5
3.1	Konsept 1	7
3.2	Konsept 2	8
3.3	Full illustrasjon av design	8
3.4	Skinner	9
3.5	Gripemekanisme 1	9
3.6	Gripemekanisme 2	10
3.7	Gripemekanisme 3	10
3.8	Graf	11
3.9	Sylinder 1	13
3.10	Sylinder 2	13
3.11	Y-mekanisme	14
3.12	X-mekanisme	14
3.13	Enkoderkobling	17
3.14	Driver	18

Tabeller

Kapittel 1

Introduksjon

Denne oppgaven er tildelt av fakultet for teknologi og realfag ved Universitet i Agder. Det skal anvendes kunnskap som står i tråd med læringsmålene for en treårig bachelor i mekatronikk.

1.1 Metodikk

Dette prosjektet tar for seg å designe og programmere en rørbøyemaskin som skal kunne forme rør uavhengig av lengde, og slike løsninger finnes det lite informasjon om. De fleste rørbøyemaskiner er installert med en dyttemekanisme i bakenden, som resulterer i at de blir store og tar mye plass om de skal kunne ta lange rør. Det ble derfor tatt i bruk SketchUp og SolidWorks for å lage gode løsninger i 3D-format.

1.2 Avgrensning

Hovedoppgaven var å designe og konstruere hele rørbøyemaskinen. Gruppen ble dessverre svekket, da et medlem måtte hoppe av prosjektet. Dette gikk utover arbeidsfordelingen som opprinnelig var planlagt. Sammen med veileder ble da oppgaven kortet ned til å kun konsentrere seg om fremparten av maskinen, det gruppen har valgt å kalle XY-bordet.

1.3 Eksisterende rørbøyeteknikker

Rørbøyning har lenge vært en del av historien, og har vært i stadig utvikling. Det er relativt ukomplisert å bøye et rør. En metode er å gjøre det manuelt ved hjelp av en hydraulisk presse. Man kan bytte ut diene, og dermed enkelt kunne bøye rør med forskjellig diameter. Med disse manuelle pressene settes det begrensninger til utforming av røret, da de kun bøyer i én frihetsgrad. Det er i tillegg tidkrevende.

Et annet alternativ er automatisk hydraulisk rørbøyer. Det er denne type teknikk som vil være den mest sammenlignbare metoden, opp mot oppgavens elektroniske CNC-maskin. En hydraulisk aktuator vil kunne oppnå et høyt moment på små maskiner [W. Pawlus \[2016\]](#). Den vil ta litt større plass da aktuatoren må stå ved maskinen, hvor en elektrisk styrt aktuator kan plasseres uavhengig av maskinen. Det vil være noen fordeler med en hydraulisk maskin, men de mange fordelene med elektronikk vil veie mot. Slik som at en hydraulisk maskin vil ha høyere støynivå, vedlikehold med oljeskift og presisjon.

Kapittel 2

Teori

2.1 CNC-styring

Computer Numerical Control er elektroniske maskiner som utfører arbeid etter et forhåndsinnstilt program. CNC-styring er avkomet etter Computer Aided Design og Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) produksjoner [Network](#).

De første numerisk styrte maskinene ble utviklet i USA på 1950-tallet. Det ble behov for maskiner som kunne produsere kompliserte og nøyaktige deler til fly. Etterhvert som elektronikken fikk mer innflytelse i maskinindustrien ble det tatt i bruk mikroprosessorer. Dette la grunnlaget for dagens databasert numeriske maskiner (CNC)[Industriskolen](#). Mikroprosessorene gjorde det mulig å lagre opp til flere forhåndsprogrammerte programmer i hukommelsen til maskinen og lettere å rette opp feil i programmet. Hvor man tidligere måtte lage nye program kunne man nå rette dem opp i hukommelsen. Man tok også i bruk datamaskinens regnekunnskaper for å lettere regne ut koordinatene til maskinens posisjon.

Programformatet for bruk av coding i CNC-styrte maskiner er regulert av den internasjonale standarden ISO 6983/1 og ISO 6983/2. Dette språket består av G- og M-funksjoner. G-funksjonene er forberedende funksjoner som plassering i X,Y,Z-planet, økende/minkende, høyre/venstre, valg av lengde/hastighet og slike ting. M-funksjonene er hjelpende funksjoner som stopp/start, på/av [Industriskolen](#).

2.2 Kaldbearbeiding

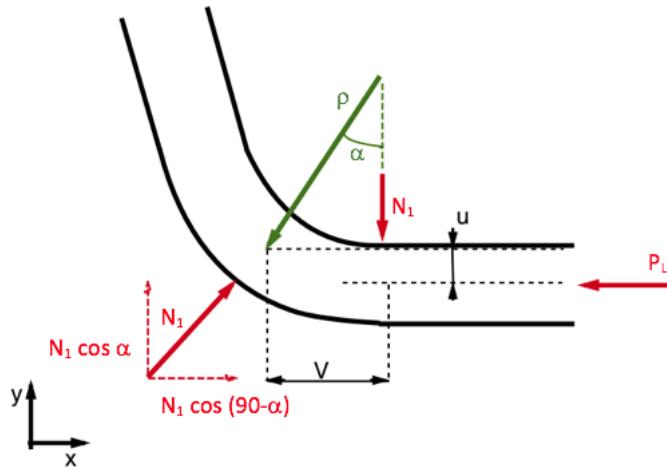
2.3 Gripemekanisme

Den mest vanlige metoden for mating av rør i eksisterende CNC-rørbøyemaskiner er å montere en dyttemekanisme i enden av maskinen. Det setter begrensninger til hvilken rørlengde det er mulig å jobbe med. Maskinen som skal konstrueres i denne oppgaven skal, i teorien, kunne ta en uendelig lengde. For å få dette til må det en form for gripemekanisme til. Det er viktig at mekanismen kan fungere godt med runde og glatte overflater. Og at det er høy friksjon mellom gjenstanden som skal ta tak i røret og røret. Balansen mellom å ta tak nok og for mye er veldig fin. Det er hensiktsmessig at mekanismen ikke griper så hardt at det blir skade eller deformasjon på røret. For å få dette til er det mulig å bruke prinsippet til en lift-tong. Den lift-tong vil gripe med en kraft som er proporsjonal med vekten til gjenstanden den skal løfte [Slater \[2011\]](#). Dette prinsippet må anvendes på en måte slik at den kan brukes på en horisontal kraft.

2.4 Belastninger

For å ha få en oversikt over hvilke krefter som virker på røret når det bøyes, settes opp et enkelt FLD (Free-Body-Diagram), som er illustrert i figur 2.1. Det er satt opp et lokalt koordinatsystem som følger aksen til røret. Det er kraften P_L som sier noe om hvor stort moment som trengs for å

dytte røret i X-retning, og den kraften som er viktigst å finne ut for å kunne vite om motoren har stor nok kraft til å klare oppgaven.



Figur 2.1: Enkelt FLD av kreftene som virker på røret

$$u = \rho \cdot (1 - \cos\alpha) \quad (2.1)$$

$$V = \rho \cdot \sin\alpha \quad (2.2)$$

Hvor:

u =Forskyvning på skinnene

V =Avstand fra stuss og senter av sfærisk lager

α =Bøyeradius i radianer

ρ = Radius av bøyen på røret

V og u er konstanter som kan hentes ut i fra konstruksjonen. Vi sitter da igjen med to ligninger og ukjent. Ved å løse ligning 2.2 med hensyn på ρ , og sette den nn i ligning 2.1 får vi

$$u = \frac{V}{\sin\alpha} \cdot (1 - \cos\alpha) \quad (2.3)$$

Denne ligningen kan løses grafisk. Ved å finne det maksimale u kan være, finner man den maksimale bøyeradien som er mulig å oppnå. Det er da mulig å løse ligning 2.4 og finne ρ .

$$\rho = \frac{u}{1 - \cos\alpha} \quad (2.4)$$

For at røret skal få varig deformasjon må det over flytegrensen, slik at det får en plastisk deformasjon. Dette vil i teorien skje i ytterpunktene av røret. Mens i midten vil holde seg under flytegrensen. For å finne denne grensen bruker man

$$\epsilon_y = \frac{-y}{\rho} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= E \cdot \epsilon_y \Downarrow \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dette gir

$$\begin{aligned} \frac{-y}{\rho} &= \frac{\sigma_y}{E} \Downarrow \\ y &= \frac{-\sigma_y \cdot \rho}{E} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Hvor:

ϵ_y =Tøyning

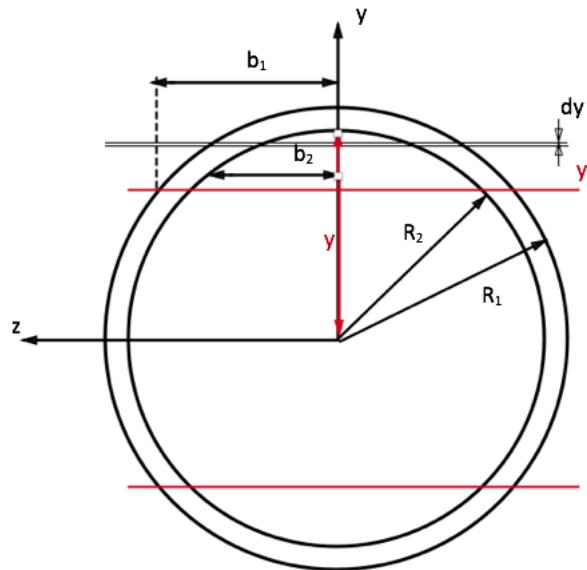
y = Avstanden fra senter av røret til den plastiske deformasjonen begynner

ρ = Radiusen av bøyen på røret

E =Elastitetsmodulen

σ_y =Flytegrensen til metallet

I figur 2.2 er det illustrert med to røde streker hvor overgangen fra den elastiske deformasjonen til plastisk deformasjon vil skjer. Lengden y er ukjent, så nøyaktig hvor dette skille går finner man ikke ut før man har løst ligning 2.7.



Figur 2.2: Illustrasjon om hvor det plastiske området begynner

$$\begin{aligned} R_1^2 &= b_1^2 + y^2 \Downarrow \\ b_1 &= \sqrt{R_1^2 - y^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} R_2^2 &= b_2^2 + y^2 \Downarrow \\ b_2 &= \sqrt{R_2^2 - y^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Momentet som trengs for å komme opp i plastisk deformasjon er utledet ut i fra figur 2.2.

$$\begin{aligned} M_P &= \int_F y dF \Downarrow \\ &= \int_{y_1}^{R_1} y \cdot \sigma_y \cdot 2b_1 dy - \int_{y_1}^{R_2} y \cdot \sigma_y \cdot 2b_2 dy \Downarrow \\ &= \frac{2}{3} \cdot \sigma_y ((R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}} - (R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Hvor:

M_P =Moment for å oppnå plastisk deformasjon

σ_y =Flytegrensen

b_1 =Bredden fra senterlinje til yttersiden av røret

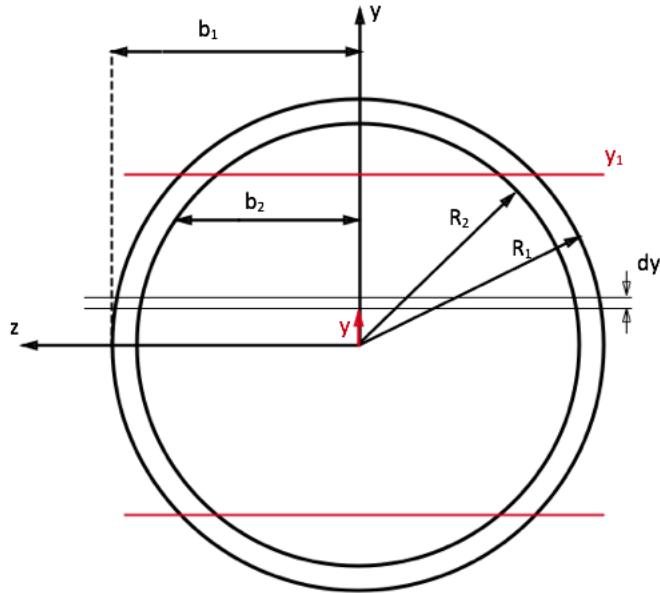
b_2 =Bredden fra senterlinje til innsiden av røret

R_1 =Ytre radius

R_2 =Indre radius

y_1 = Grensen til plastisk deformasjon

Momentene som regnes ut i ligning 2.10 og 2.11 er kun for halve høyden av røret, så svaret må ganges med to. I figur 2.3 er samme rør illustrert på nytt, men denne gangen med hensyn på den elastiske deformasjonen. Det er



Figur 2.3: Illustrasjon av hvor det elastiske området vil bef inne seg

$$\begin{aligned} M_E &= \int_F y dF \Downarrow \\ &= \int_A y \cdot \sigma_y dA \Downarrow \\ &= \int_0^{y_1} y \cdot \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot y \cdot 2b_1 dy - \int_0^{y_1} y \cdot \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot y \cdot 2b_2 dy \Downarrow \\ &= 2 \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot \left(-y_1 \frac{(R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \right) + \frac{R_1^2 \cdot y_1 \sqrt{R_1 - y_1^2}}{8} + \frac{R_1^4}{8} \cdot \arcsin \frac{y_1}{R_1} \\ &\quad - 2 \frac{\sigma_y}{y_1} \cdot \left(-y_1 \frac{(R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \right) + \frac{R_2^2 \cdot y_1 \sqrt{R_2 - y_1^2}}{8} + \frac{R_2^4}{8} \cdot \arcsin \frac{y_1}{R_2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Hvor:

M_E =Momentet for å oppnå elastisk deformasjon

σ_y =Flytegrensen

b_1 =Bredden fra senterlinje til yttersiden av røret

b_2 =Bredden fra senterlinje til innsiden av røret

R_1 =Ytre radius

R_2 =Indre radius

y_1 =Avstanden opp til plastisk deformasjon

$$\begin{aligned}
 M_E + M_P &= V \cdot N_1 \Downarrow \\
 N_1 &= \frac{M_E + M_P}{V}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Hvor:

M_E =Momentet for å oppnå elastisk deformasjon

M_P =Momentet for å oppnå plastisk deformasjon

N_1 =Kraften som står vinkelrett på røret

$$\begin{aligned}
 \sum F_x = 0N &= -P_L + N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \Downarrow \\
 P_L &= N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Hvor:

P_L =Kraften som må til for å dytte røret

N_1 =Kraften som står vinkelrett på røret

Kapittel 3

Konstruksjon og styring

(Her beskrives fremgangsmåten i detalj slik at resultatet kan reproduseres av andre)

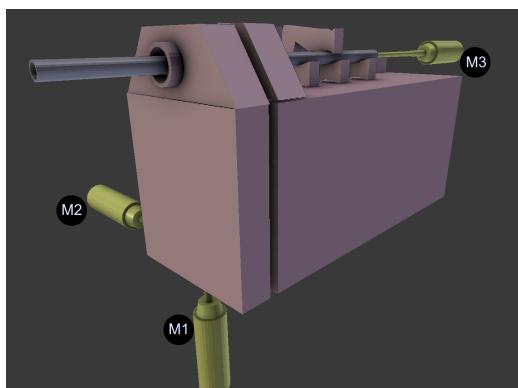
3.1 Utstyr

Før planleggingen av designet var det hensiktsmessig å gå over lagret, for å få en oversikt over hva som var tilgjengelig og hva som eventuelt måtte kjøpes inn. Vi hadde tilgang på ledeskruer med tilhørende mutter, samt skinner med vogn som sklir lett frem og tilbake. Dette skulle implementeres for å kunne laget et plan som kunne bøye røret i X- og Y-retning, og føre røret fremover. Det resterende som manglet for å kunne konstruere en full rørbøyemaskin måtte tegnes og konstrueres selv, ved hjelp av SolidWorks og SketchUp.

Programvaren som skal brukes for å styre X-Y-Z-planet er Mach3. Dette er et mye brukt kontrollsysten for CNC-maskiner. Det virker bra i CAD/CAM produksjoner, som med laserkuttere og fres for å nevne noen.

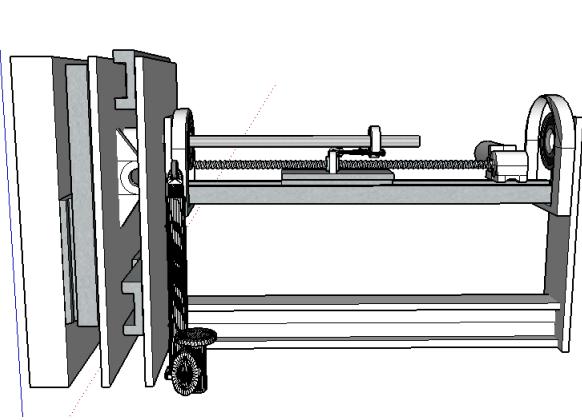
3.2 Design

Hele prosessen med oppgaven startet med designet. Flere maskiner ble undersøkt for å få inspirasjon til design. Og det ble relativt tidlig laget et utkast av en maskin, som vises i figur X. Men maskinen var installert med dyttemekanisme bak. Så den måtte re-designes. I figur X ser man det neste konseptet som ble designet. I denne designfasen ble den fremste delen av maskinen, den delen som skal bevege seg i X-Y-planet, videreutviklet. Utfordringene kom når midt-delen, med en matemekanisme, skulle tegnes. Denne prosessen er forklart nærmere i de videre kapitlene angående gripemekanismen og rotasjon av rør.



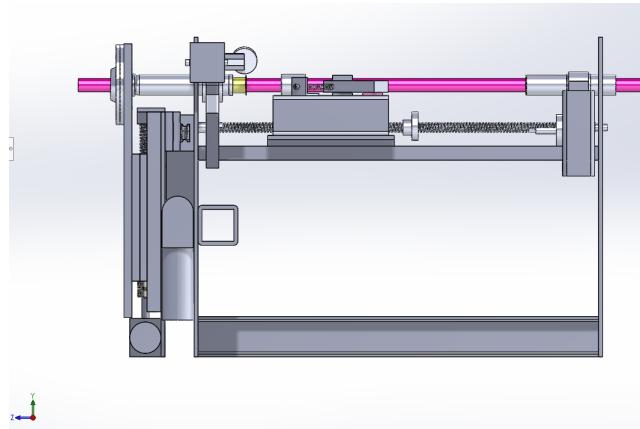
Figur 3.1: Første konseptet

Det er lagt mye arbeid i at maskinen skal være kompakt, slik at den tar lite plass. Den endelige maskinen er designet med i alt tre motorer og en lineær-sylinder. Det er plassert en motor på bakerste del for å styre skruen i Z-retning. Denne jobber sammen med lineær-sylinderen for å



Figur 3.2: Det andre konseptet

rotere røret i spesifikke grader. En motor er festet på undersiden av XY-bordet for å styre skruen i Y-retning og en tredje motor på siden for å styre skruen i X-retning. I figur X er hele konstruksjonen illustrert, hvor røret blir matet i Z-retning mot venstre.



Figur 3.3: Full illustrasjon av design

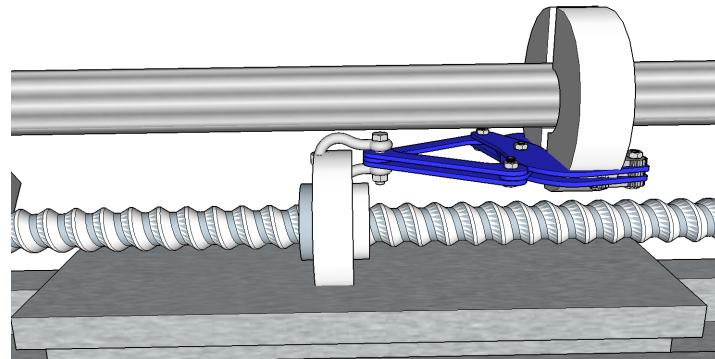
3.3 Materialer

Alle materialene som måtte produseres fra bunnen av er tiltenkt å være i stål. Stålplatene er på 10mm med hull som er tilpasset de ferdigproduserte skinnene. Disse passer til en M8 bolt. Skinnene og vognene er av aluminium, så ingen av delen kunne sveises til stålplatene. I figur X ser man en skinne og vogn montert fast i en plate.

Det er brukt lager fra Igus til opplagring av skruer og stussen. Disse er laget i plastikk, og trenger ingen vedlikehold eller smøring Igus. Lagrene som er valgt ut for X-og Y-skrue kan tåle opp til 120 MPa IgusQ2. Og lageret som er valgt ut til stussen tåler opp til 80MPa IgusG



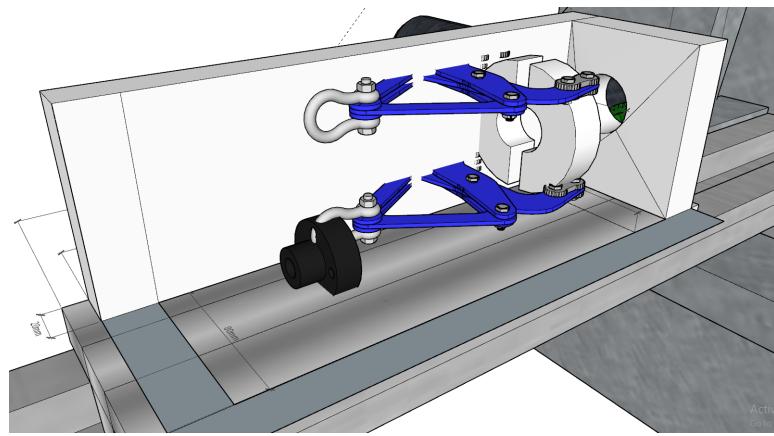
Figur 3.4: Her er skinene og vognen montert på en av stålplatene som skal styre øyet



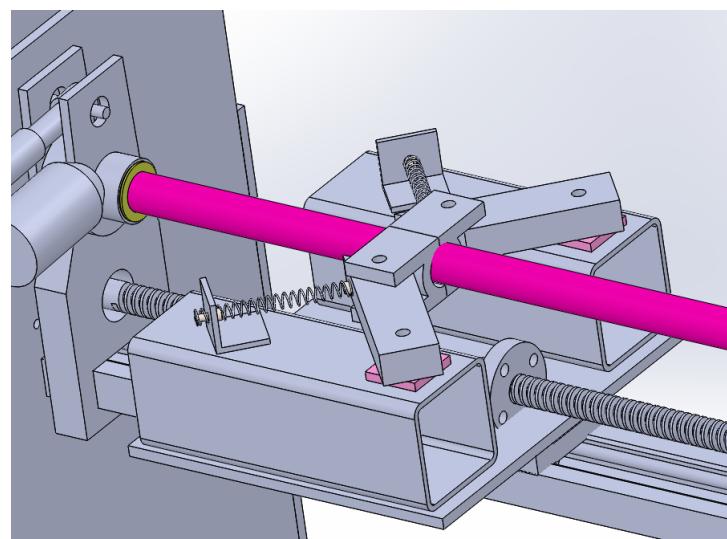
Figur 3.5: Den første ideen til gripemekanisme

3.4 Mating av rør

Prosessen med å finne en mekanisme for å mate røret i Z-retning var den mest krevende. En av de første ideene var en lift-tong festet til en ledeskru, med to halvmåner som tar tak i røret. Ideen var at halvmånenes skulle klemme til når skruen gikk i positiv retning, og løse opp når den skulle gå i negativ retning for å hente mer rør. Problemet med denne løsningen er at den bare tar tak i nedre del av halvmånen. Når dette skal rotere vil det skape et uønsket moment. Dette ble løst ved å montere på en til klype på toppen av halvmånen, og laget et slags hus. Men ved nærmere ettertanke ble det avklart at det ble for avansert å produsere. Det var det nåværende gripehuset ble konstruert. Det er større og mer robust, og skal fungere på samme måte med at det griper til i positiv retning og slipper opp i negativ retning. Dette kan enklere produseres da det er brukt forskjellige typer standardiserte stålkomponenter. I motsetning til de første to ideene hvor lift-tongen måtte vært skjært ut i ulike former.



Figur 3.6: Den andre ideen til gripemekanisme



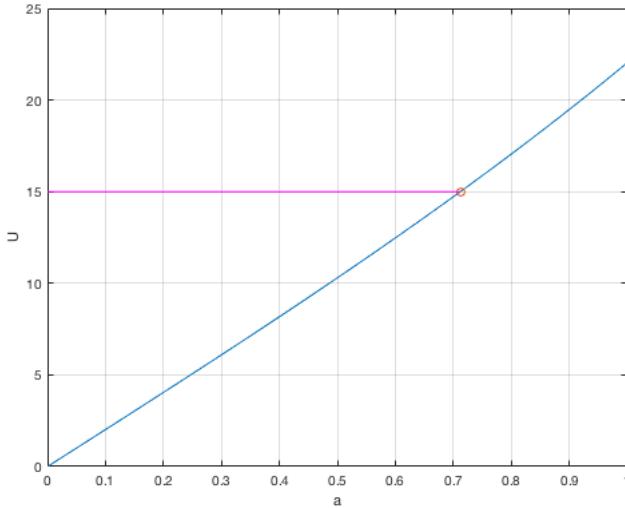
Figur 3.7: Den endelige gripemekanismen

3.4.1 Gripehus

I fra figur 2.1 ser man at det kommer en kraft P_L på røret. Det er denne kraften som trengs for å kunne føre og bøyet røret. For å finne denne, må ligning 2.1 - 2.13 anvendes. Hvis man tar utgangspunktet i at det skal bøyes et rør med flytegrenser $\sigma_y = 195MPa$ og E-modul $E = 210GPa$. Et rør med tykkelse $t = 2,65mm$ gir en ytre radius $R_1 = 16,85mm$ og indre radius $R_2 = 14,2mm$. u er den maksimale skyvningen skinnene kan ha i X- og Y-retning før det sfæriske lageret går ut av posisjon. Og den er funnet til å være $u = 15mm$. V er avstanden fra stussen til senter av det sfæriske lageret. Ut i fra konstroksjonen kan man lese av at denne er $V = 40.33mm$.

$$u = \frac{V}{\sin\alpha} \cdot (1 - \cos\alpha) \quad (3.1)$$

Ut i fra figur 3.8 kan man se av $\alpha = 0,712$ rad



Figur 3.8: Grafen viser sammenhengen mellom u og α

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{u}{1 - \cos\alpha} \\ &= \frac{15mm}{1 - \cos 0,712} \\ &= \underline{\underline{61,717mm}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{-\sigma_y \cdot \rho}{E} \\ &= \frac{-(-195MPa) \cdot 61,717mm}{210 \cdot 10^3 MPa} \\ &= \underline{\underline{0,057mm}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} M_P &= \frac{2}{3} \cdot \sigma_y ((R_1^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}} - (R_2^2 - y_1^2)^{\frac{3}{2}}) \\ &= \frac{2}{3} \cdot 195MPa (((16,85mm)^2 - (0,057mm)^2)^{\frac{3}{2}} - ((14,2mm)^2 - (0,057mm)^2)^{\frac{3}{2}}) \\ &= \underline{\underline{249703,099Nmm}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dette er kun momentet for å komme opp i plastisk deformasjon for halve røret. For å få et korrekt tall for hele røret, må svaret ganges med to. Så dette gir at det fullstendige momentet som må til er

$$\begin{aligned} M_P &= 2 \cdot 249703,099 \\ &= \underline{\underline{499406,198 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} M_E &= 2 \cdot \frac{195 MPa}{0,057 mm} \cdot (-0,057 mm) \frac{((16,85 mm)^2 - (0,057 mm)^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \\ &+ \frac{(16,85 mm)^2 \cdot 0,057 mm \sqrt{(16,85 mm)^2 - (0,057 mm)^2}}{8} \\ &+ \frac{(16,85 mm)^4}{8} \cdot \arcsin \frac{0,057 mm}{16,85 mm} \\ &- 2 \cdot \frac{195 MPa}{0,057 mm} \cdot (-0,057 mm) \frac{((14,2 mm)^2 - (0,057 mm)^2)^{\frac{3}{2}}}{4} \\ &+ \frac{(14,2 mm)^2 \cdot 0,057 mm \sqrt{(14,2 mm)^2 - (0,057 mm)^2}}{8} \\ &+ \frac{(14,2)^4}{8} \cdot \arcsin \frac{0,057 mm}{14,2 mm} \\ &= 9,892 Nmm - 8,336 Nmm \\ &= \underline{\underline{1,555 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

I dette tilfellet er det også bare regnet ut den elastiske deformasjonen for halve røret. Så dette svaret på også ganges med to.

$$\begin{aligned} M_E &= 2 \cdot 1,555 Nmm \\ &= \underline{\underline{3,111 Nmm}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

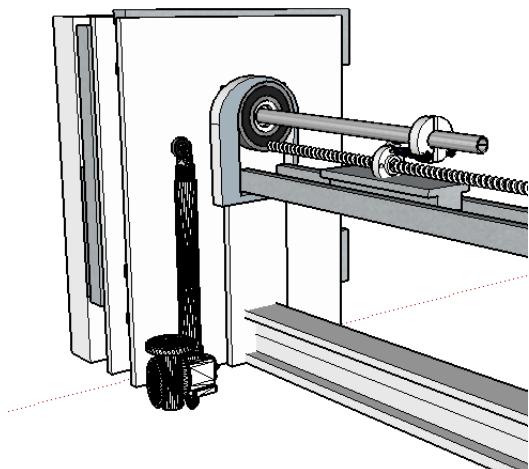
$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{M_E + M_P}{V} \\ &= \frac{3,111 Nmm + 499406,198 Nmm}{40,33 mm} \\ &= \underline{\underline{12383,073 N}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} P_L &= N_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \\ &= 12383,073 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - 0,712 rad\right) \\ &= \underline{\underline{8091,923 N}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

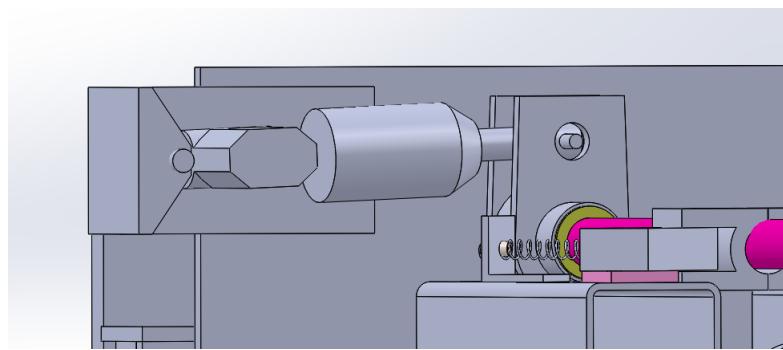
3.4.2 Opplagring

3.5 Rotasjon av rør

Ifølge kravspesifikasjonen skal røret kunne rotere $\pm 45^\circ$. Maksimalt nødvendig moment for å kunne rotere røret oppstår når røret roteres mot bøyeretningen. Det vil være avhengig av friksjonen pga. P_u og smøring i det sfæriske lageret.



Figur 3.9: Første ide til hvordan rotere røret



Figur 3.10: Hvordan rotasjonsmekanismen ble seende ut til slutt

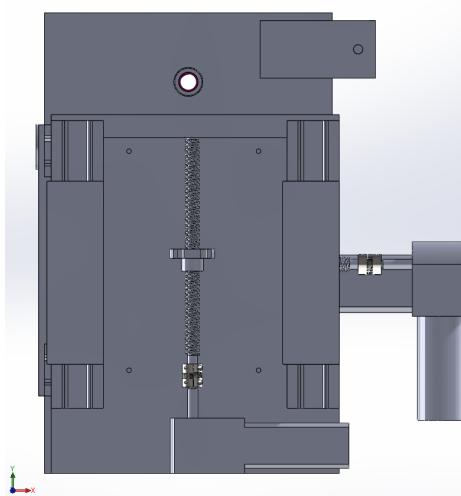
3.5.1 Elektrisk sylinder

3.6 Bøyemekanisme

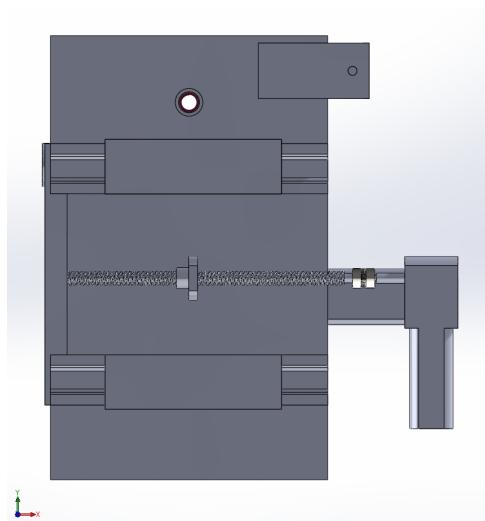
3.6.1 Sfærisk lager

3.7 XY-bord

Grunnet begrenset tid ble oppgaven redusert til å fokusere på det gruppen har valgt å kalle XY-bordet. Dette bordet er bygd opp av tre plater med skinne, mutter og ledeskrue mellom slik at det sfæriske lageret, hvor røret kommer ut, kan bevege seg fritt i XY-planet. I figur 3.11 og figur 3.12 ser man hvordan skruene er tegnet inn. Det sfæriske lageret er et kuleformet lager festet med to skiver med lik radius. Platene trenger kun bevege seg +/- 15 mm for å dekke hele området det sfæriske lagrene kan bevege seg.



Figur 3.11: Bildet viser hvordan Y-mekanismen er designet



Figur 3.12: Bilde viser hvordan X-mekanismen er designet

3.7.1 Ledeskinne

3.7.2 Ledeskruer

3.7.3 Motorer

Å lage en nøyaktig matematisk modell av motorene var vanskelig, da det var lite informasjon tilgjengelig om dem.

- Motor kontinuerlig effekt: 230 W
- Motor maks effekt: 1050 W
- DC-spennings: 22.5 V
- Kontinuerlig moment: $6,779 \text{ Nm}$ ved 9 A
- Maks moment: $45,19 \text{ Nm}$ ved 60 A
- Hastighet ved kontinuerlig moment:

$$s = \frac{P}{T} = \frac{230 \text{ W}}{6,779 \text{ Nm}} = 33,928 \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] \quad (3.10)$$

- Hastighet ved maks moment:

$$s = \frac{P}{T} = \frac{1050 \text{ W}}{45,19 \text{ Nm}} = 23,24 \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] \quad (3.11)$$

Informasjon om moment fikk man først etter flere runder med e-post utveksling som resulterte i følgende informasjon:

" - 60 lb/inches at 9 amp. This would be continuous.

- 400 lb/inches at 60 amps. This would be no more than 5 seconds over a 10 minute span."

Her antas det at "lb/inches" er *pound force inch* ($\text{lbf} \cdot \text{in}$). Enhetene konvertert fra pound force inches til Newton meter ved hjelp av Wolfram Alpha.

Informasjon som mangler er:

- Armatur resistans, R_a
- Spenningskonstant, K_e
- Momentkonstant, K_t
- Motorens treghetsmoment, J
- Termisk motstand, R_{th}

3.8 Motordriver

Treghetsmomentene til motoren og lasten vil være med på å avgjøre hvor presis motoren er i sine bevegelser. Ved Step/Dir-signaler vil det oppstå små bevegelser ved hvert step som genererer en step-respons. Denne responsen vil være for liten til å gjøre meningsfulle analyser av presisjonen til motoren. Ved å impuls-belaste motoren for man en tydeligere transient-respons, slik at lettere lar seg analysere. Driveren benytter seg av kaskaderegulering av motorens posisjon. I tuning-programvaren kan man justere følgende parametere:

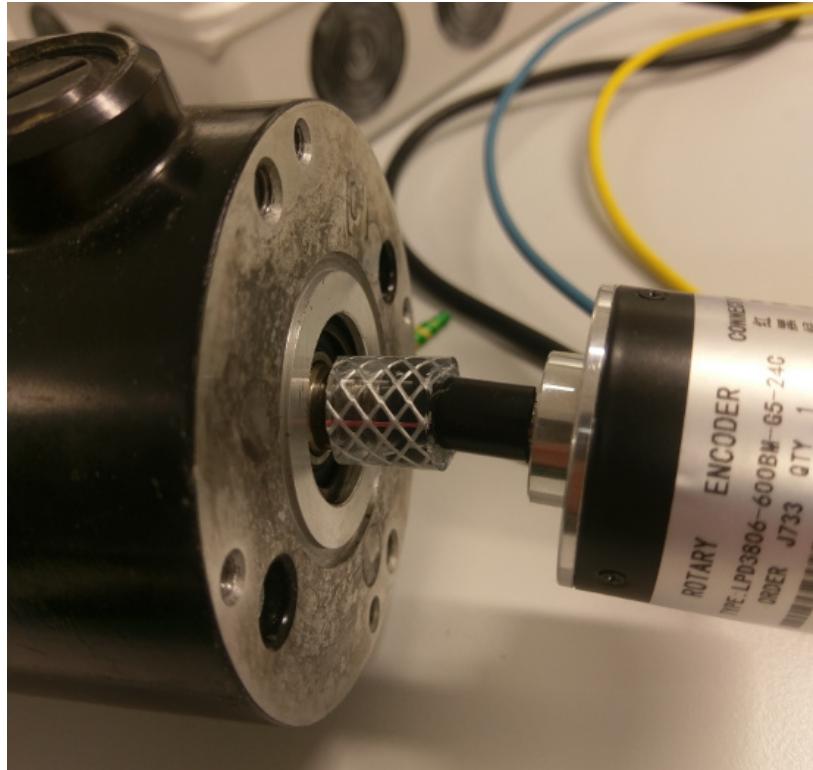
- K_p : For høy proporsjonal-gain vil gi større svingninger og et mer ustabilt system, men minske steady-state-error.

- K_{aff} : Posisjons-følge-feil under akselerasjon. Denne motvirker tregheitsmomentet i systemet under akselerasjonen i en bevegelse.
- K_d : Derivativ gain. Brukes for å redusere overshoot. Brukes gjerne dersom K_p produserer for mye overshoot.
- V_p : Hastighets-proporsjonal-gain.
- V_i : Hastighets-integral-gain
- CAM_n og CAM_d : For å sette elektronisk gir.
- *PositionFollowErrLimit*: Grense for forskjell mellom ønsket posisjon og målt posisjon.
- *Encoderlines*: Denne gjelder kun for selv-test funksjonaliteten i driveren
- *edge*:
- *reverse*:

Hastighetsprofil under testing:

Posisjonsloop-tuning er avhengig av belastninger i systemet og skal derfor gjøres med motoren installert i systemet. Da matesystemet ikke er produsert, vil tuning bare skje med motoren installert på ledeskruer med stålplate. Posisjonsloop-tuning Posisjonsloop-tuning skjer på to forskjellige måter: Tuning med hensyn på hastighetsloop, og med hensyn på moment. Hastighetsloop kan være nyttig dersom det er nødvendig med presise bevegelser mellom start og slutt. Mens tuning med hensyn på momentloop er for punkt-til-punkt og situasjoner hvor hastighetspresisjon mellom start- og slutt punkt ikke er så viktig. Støy

Å kjøre motoren via DCS810-driveren genererte ubehagelig, høylytt støy. Flere forsøk ble gjort på å fjerne/redusere dette støyet. Undersøkelser på internett resulterte stort sett i problemstillinger som har med kontrollsigalet å gjøre, da feilinnstilt kontrollsignal kan komme ned i frekvenser som menneskeøret kan oppfatte. I dette tilfellet var det dog ikke kontrollsigalet som genererte ulyden fordi den var tilstede også må med kontroll-kort frakoblet. Det ble undersøkt om det er dårlig forbindelse mellom enkoder og motor. Konklusjonen var at tilkoblingen er tilstrekkelig, da man ved å vri på koblingen som sitter på motorakslingen kunne rottere både motoraksel og enkoder-aksel uten slark.



Figur 3.13: Motor-enkoder kobling, uten feste-hus til enkoder. Slanger er brukt som festeanordning mellom motor og enkoder.

Én annen mulig forklaring på støyet kan være at man ikke fikk tunet motordriveren. Årsaken var at det ikke var mulig å opprette en forbindelse mellom PC og driver. I følge Leadshine, skal det brukes en såkalt «Special cable». Kabelen det er snakk om er en RS232 seriell forbindelse. Da man ikke hadde en slik kabel, måtte den lages. Det ble først kjøpt inn en RS232-til-USB adapter. Denne bestod av en Standard 4-pin USB på den ene siden og en DB9-hannkontakt. For å koble dette sammen ble dokument fra Leadshine brukt som referanse (Se tillegg [[[]]]) Det ble oversett at dette er for en DB9-hunkontakt, og som resultat ble feil pins koblet til. Dette kan ha skadet RS232-inngangen på driveren. Av frykt for ikke å ødelegge flere drivere, tok det lang tid før flere drivere ble testet. Dersom Vp/Kp er satt for lavt kan dette lage mye støy. «Over-current protection» utløst

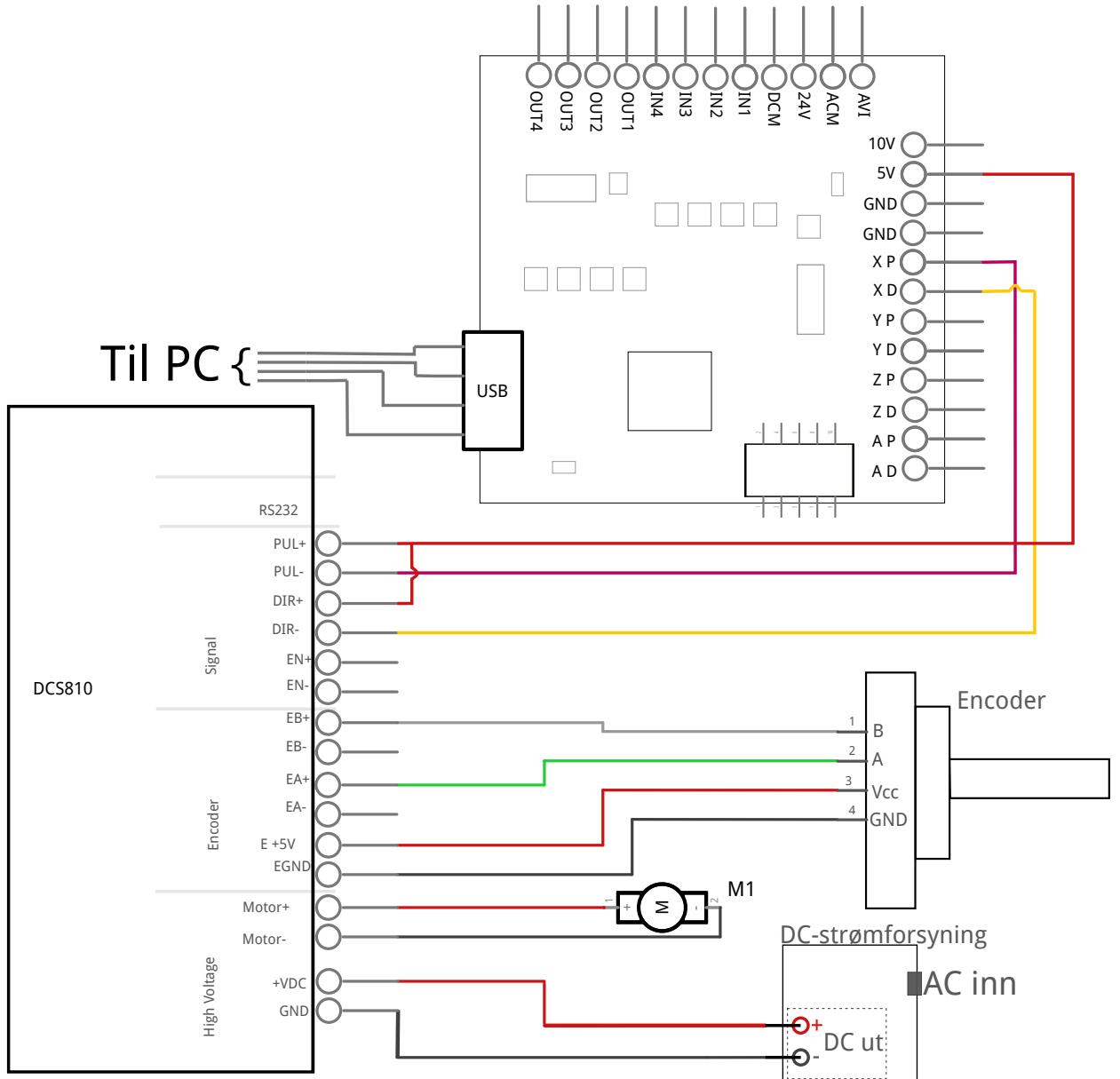
Etter flere sekunder ble Over-current protection utløst på x-akse motoren.

3.9 Mach3-software

Systemet er basert på samme prinsipp som en fres. XY-bordet fungerer på samme måte som et verktøy som beveger seg i XY-planet. Matingen i Z-aksen tilsvarer Z-bevegelsen til verktøyet, og rotasjonen av røret tilsvarer «spindle-speed».

Figur 1: Sammenheng mellom tradisjonell fres og rørbøyer

Driver – DCS810 Motorstyringen skal skje ved hjelp av en motor driver av typen DCS810. Dette er en servo-driver som konverterer et lav-spennings kontroll-signal om til høy-spenningsignal som driver motoren. Driveren har Prosjektet er basert på å bruke material og utstyr som er lett tilgjengelig I tråd med dette blir det benyttet en «single-ended» enkoder i motsetning til en differensial enkoder. I tillegg, så er det i utgangspunktet snakk om korte kabellengder.



Figur 3.14: Tilkoblinger til driveren for x-aksen

Kontroller Kontrolleren som ble benyttet er en BSMCE04U-PP. Den bruker USB-tilkobling til PC og vil gjenkjennes av Mach3.

Figur 3: Koblingsskjema av kontroller til driver

Pulsing

For å finne nødvendige antall pulser som Mach3 skal sende, må man vite noe om hele drivsystemet, dvs. motor, enkoder, gir og ledeskruer.

Utvekslingsforholdet ble målt på to forskjellige måter og ga to forskjellige resultater. Det ble først målt uten enkoder. Det foregikk ved å vri enkoder-akselen til akselen ut av girboksen (last akselen) hadde gått en omdreining. Utvekslings forholdet ble da målt til 32:1. Det ble antatt at enkoder-akselen har samme utvekslingsforhold som ut fra motoren til girboksen.

Den andre metoden gikk ut på å koble enkoderen til en Arduino. Se for øvrig kode i tillegg A. Motoren ble koblet til en variabel strømforsyning.

Deretter ble motoren kjørt flere ganger mens enkoder-verdier ble lest av i Arduino-IDEens seriell-monitor.

Arduino teller hvert step og lagrer dette i variabelen *encoder0Pos* for å få dette omgjort til grader brukes følgende linje med kode:

```
angle = encoder0Pos * (360.0/2400.0);
```

Dette vil gi verdier som ligger rundt 9820 for en rotasjon av lastakselen. Siden man fra før hadde funnet utvekslingsforholdet til å være 32 : 1. Dette gir antall grader som følger:

$$\theta_{maks} = \frac{\phi}{(u.f.)} = \frac{9820^\circ}{32} = 306.9^\circ \quad (3.12)$$

Da dette ikke ga riktig antall grader måtte man finne en et nytt utvekslingsforhold:

$$(u.f.)_{ny} = \frac{\phi}{360^\circ} = \frac{9820^\circ}{360^\circ} = 27.28^\circ \quad (3.13)$$

Ny kode blir da:

```
angle = (encoder0Pos * (360.0/2400.0)) / 27.28;
```

Med det nye utvekslingsforholdet funnet til å være 27,28, måler verdiene konsistent til $\theta_{max} \approx 360^\circ$. Det ble ikke gjort ytterligere forsøk med Arduino for å forbedre nøyaktigheten, da det ble antatt at Mach3 kan gi et annet resultat.

Stigningen for gjengene, P er 5mm. Da blir antall skrue omdreininger per millimeter, rev_{skrue} :

$$rev_{skrue} = \frac{1}{P} = \frac{1}{5} = 0,25 \left[\frac{rev}{mm} \right] \quad (3.14)$$

$$rev_{skrue} \cdot (u.f.)0,25 \cdot 32 = \underline{8} \quad \vee \quad 0,25 \cdot 27,3 = \underline{6,825} \quad (3.15)$$

Enkoderpulser per omdreining: 2400

Mach3 steps per millimeter:

$$2400 \cdot 8 = 19200 \quad (3.16)$$

Mach3 steps per unit = Mach3 steps per rev x Motor revs per unit

For posisjonsgjenkjenning ble det brukt en kvadraturenkoder. Denne har 600 åpninger i skiven sin, og genererer 4 utpulser per åpning, som gir totalt 2400 utpulser.

Videre testing i Mach3 For å sette mer nøyaktig antall *Mach3stepspermillimeter*, kalibreres hver akse via Settings"og Set Steps per Unit". Antall ønsket forflytning i millimeter skrives inn i dialogboksen. Dette får motoren til å bevege seg forsøke å bevege seg den ønskede lengden basert på antall *Mach3stepspermillimeter* som ble angitt i "Motor Tuning". Deretter måles antall millimeter den faktisk beveget seg, og man setter det inn i neste dialogboks. Mach3 foreslår så en ny "Mach3stepspermillimeter" basert på målingen.

Andre styringskomponenter:

- Nødstopknapp
- "Hjembryter"
- Grensebrytere for hver akse (+/-)
- Manuell puls generator (MPG)

Nødstopknapp skal være med alle CNC-maskiner for rask tilgang til stopp i tilfelle uønsket drift. Hjembryteren brukes for å signalisere til maskinkontrolleren at verktøyet er en ønsket startstilling. I dette tilfellet, når det sfæriske lageret er midtstilt (slik at rør som føres gjennom ikke bøyes.) Grensebryterne brukes til å signalisere til kontrolleren at en akse er ved sin maksimale grense. I dette tilfellet er det når vognen har flyttet seg ± 15 mm.

3.9.1 CAD til G-code

Flyten fra en 3D-modell til G-code er vanligvis som følger:

Solidworks → CAM → Mach3

I prinsippet kan en 3D CAD-fil importeres til et CAM-program som genererer G-koder. Disse G-kodene kan så lastes inn i Mach3. Nødvendig u, for en gitt bøyeradius, R er avhengig av materialet (og rørdiameter?) (Kilde: tubenet) Dersom man bruker u/R forholdet, $9/80$ (Kobber, $d = 20.0\text{mm}$, $t = 1.0\text{mm}$) gir dette følgende koordinat:

Kapittel 4

Resultater

4.1 Analyse

4.2 Testing av rør

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Prinsipper, Forhold, Generaliseringer

(Her trekkes man frem hvilke prinsipper, forhold og generaliseringer man kan finne ut i fra resultatene)

5.2 Presentasjon av analyse, modell eller teori

5.3 (Utfordringer)

5.4 (Mulige forbedringer)

Kapittel 6

Konklusjon

Tillegg A

Arduino kode for enkoder

```
#define encoder0PinA 2
#define encoder0PinB 3

volatile unsigned int encoder0Pos = 0 ;

float angle = 0.0;

void setup () {
pinMode( encoder0PinA , INPUT ) ;
pinMode( encoder0PinB , INPUT ) ;

void doEncoderA () ;
void doEncoderB () ;

// encoder pin on interrupt 0 (pin 2)
attachInterrupt (0, doEncoderA , CHANGE) ;

// encoder pin on interrupt 1 (pin 3)
attachInterrupt( 1 , doEncoderB , CHANGE) ;

Serial.begin(9600);
}

void loop () {
//Serial.println (encoder0Pos , DEC);
angle = (encoder0Pos * (360.0/2400.0))/27.3;
Serial.println (angle);
}

void doEncoderA(){
// look for a low-to-high on channel A
if (digitalRead(encoder0PinA) == HIGH) {
//check channel B to see which way encoder is turning
if(digitalRead(encoder0PinB) == LOW) {
encoder0Pos = encoder0Pos + 1;
}
else {
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
}
}

else { // must be a high-to-low edge on channel A
// check channel B to see which way encoder is turning
if (digitalRead(encoder0PinB) == HIGH) {
encoder0Pos = encoder0Pos + 1; //CW
}
else {
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
}
}

}

void doEncoderB () {
// look for a low-to-high on channel B
```

```
if (digitalRead(encoder0PinB) == HIGH) {  
// check channel A to see which way encoder is turning  
if ( digitalRead(encoder0PinA) == HIGH) {  
encoder0Pos = encoder0Pos + 1 ; // CW  
}  
else {  
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW  
}  
}  
  
// Look for a high-to-low on channel B  
else {  
// check channel B to see which way encoder is turning  
if (digitalRead (encoder0PinA) == LOW) {  
encoder0Pos = encoder0Pos + 1 ; // CW  
}  
else {  
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW  
}  
}
```

Tillegg B

Matlab kode

```
% Initialize
clear all
close all
clc

dt = 0.001;
v = 40.33;
a = -1:dt:1;

%Solve function
solution = fsolve(@fcn,1)

%Plot
for i = 1:length(a)
u(i) = v*(1 - cos(a(i)))/(sin(a(i)));
end

plot(a,u)
line([0 solution],[15 15], 'Color','m');
hold on
plot(solution,15,'-o','MarkerIndices',[1])
grid on;

xlim([0 1])
xlabel('a')
ylabel('U')

function x = fcn(a)
v=40.33;
x=(v/sin(a)*(1-cos(a))-15);
end
```

Bibliografi

Igus. igubal® spherical bearings. URL https://www.igus.no/wpck/11041/banderole_igubal.

IgusG.

IgusQ2. iglidur® q2, sleeve bearing with flange, mm. URL <https://www.igus.no/product/?artnr=Q2FM-2023-21>.

Industriskolen. Grunnlegende innfÃ¶ring i cnc-teknikk. URL http://www.niskolen.no/pil/Medlem/Kurs/cnc_teknikk/story_content/external_files/CNC_VG2.pdf.

Norsk Datakunnskap Network. Hva er cnc-maskiner. URL http://www.datamaskin.biz/Programmering/computer-programming-languages/88807.html#.WtSP6C_JLL8.

Neil Sclater. *Mechanisms and Mechanical Devices*. The McGraw-Hill Companies, fifth edition, 2011. Page:247.

M.R. Hansen W. Pawlus, M. Choux. Hydraulic vs. electric: A review of actuationsystems in offshore drilling equipment. *Modeling, Identification and Control*, (1):4–6, 2016.