



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Kartlegging av automatisk fresing av topplag.

Evaluation of automated milling process of top layers.

Stig Kristiansen

Ole Andreas Stegegjerdet

Bjørn Inge Myrvang Kulterstad

Automatisering med robotikk

Høgskolen på Vestlandet

Veileder: Olav Sande

Ekstern veileder: Kjell Arne Stegegjerdet

30.05.22

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle

kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. *Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.*

STUDENTRAPPORT

Campus Førde, Svanehaugsvegen 1, 6812 FØRDE www.hvl.no

TITTEL ELE350-1 21H	RAPPORTNR. 1	DATO 30.05.2022
PROSJEKTTITTEL Kartlegging av automatisk fresing av topplag.	TILGJENGE Åpen	TAL SIDER 75 (ekskludert vedlegg)
FORFATTARAR Stig Kristiansen, Ole Andreas Stegegjerdet og Bjørn Inge Myrvang Kulterstad	ANSVARLEGE RETTLEIARAR RETTLEIARAR/syt Olav Sande	
OPPDRA GSGJEVAR Luster Mekaniske Industrier AS		
<p>SAMANDRAG</p> <p>I arbeidet med prefabrikking av rør og installasjoner som skal benyttes i dypvannsinntak er det mange tunge og gjentakende prosesser som potensielt kan automatiseres. Den viktigste årsaken til at dette bør gjøres, er for å begrense belastningen på arbeidstakere, redusere sykefravær og hindre skader. I andre rekke kommer det økonomiske aspektet.</p> <p>I denne rapporten har vi, på oppdrag fra Luster Mekaniske Industrier, kartlagt muligheten for å benytte en industriell robot til å frese ned topplag på rørsveiser. Rapporten setter søkelys på utfordringer som vil oppstå om man skal frese i <i>Inconel</i> med en robot og hvordan disse problemene kan løses. Selv om det vil være mange situasjoner der roboten ikke vil ha god nok tilkomst på røret, vil det hjelpe mye for å avlaste arbeidere fra en tung slipeprosess om den klarer å frese ned bare deler av sveisen. For å demonstrere hvordan et autonomt system kan virke, ble det forsøkt å lage en prototype som skulle markere banen sin på et rør ved hjelp av bildegjenkjenning og avstandsmåling. Selve prototypen kom vi ikke i mål med grunnet tekniske utfordringer og manglende tid.</p> <p>Rapporten gir gode løsninger på utfordringene som oppstår når man skal bruke en robot i et åpent produksjonslokale til fresing. Det blir ikke endelig konkludert med om en KUKA KR 500 vil klare å frese stabilt nok til å tilfredsstille kravene fra oppdragsgiver, men det blir belyst i denne rapporten hvordan man kan gå frem for å finne det ut.</p>		
<p>SUMMARY</p> <p>In the work with prefabrication of pipes and installations to be used in deepwater installations, there are many heavy and repetitive processes that can potentially be automated. The main reason why this should be done is to limit the burden on workers, reduce sick leave and prevent injuries. In second place is the economic aspect.</p> <p>In this report we have, on behalf of Luster Mekaniske Industrier, evaluated the possibility of using an industrial robot to mill down top layers on pipe welds. The report sheds light on challenges that will arise if you have to mill in <i>Inconel</i> with a robot and how these problems can be solved. Although there will be many situations where the robot will not have good enough access to the pipe, it will help a lot to relieve workers from a heavy grinding process if it manages to mill down only parts of the weld. To demonstrate how an autonomous system can work, an attempt was made to create a prototype that would mark its path on a pipe using image recognition and distance measurement. We did not finish the prototype itself due to technical challenges and lack of time.</p> <p>The report provides good solutions to the challenges that arise when using a robot in an open production facility for milling. It is not finally concluded whether a KUKA KR 500 will be able to mill stable enough to satisfy the requirements of the client, but it is highlighted in this report how to proceed to find out.</p>		
EMNEORD		
ELE350-1 21H, KUKA, UR5-robot, robot, fresing, Inconel, bacheloroppgave, HVL,		

1 Forord

Gruppen består av Stig Kristiansen, Ole Andreas Stegegjerdet og Bjørn Inge Kulterstad. Alle studerer automasjon- og robotikk ved Høgskolen på Vestlandet, campus Førde. Vi har alle praktisk erfaring fra yrker som henholdsvis elektriker, sveiser og avioniker, og håper å kunne ta med oss noen av våre kunnskaper og erfaringer inn i oppgaven for å løse den på en god måte.

Problemet som det blir satt søkelys på i denne rapporten, har per dags dato ingen automatiserte løsninger, som har gjort at hele prosessen har blitt ekstra spennende å være med på.

En ting alle på gruppen var enig om før vi startet prosjektet, var at vi ønsket å ende opp med et fysisk produkt, gjerne gjennom en prototype. Dette har medført at prototypen har fått et stort fokus i oppgaven, større enn vi hadde trodd fra starten av, men det har til gjengjeld også gitt oss mye lærdom.

En stor takk til Luster mekaniske industri AS for oppdraget og bidragene som de har kommet med underveis i prosjektet. En takk skal også rettes til Campus Verftet for lån av robot og lokaler som vi har kunne benytte oss av gjennom hele prosjektet. Avslutningsvis takkes Olav Sande for rådgiving og hjelp fra start til slutt.

Førde 30.05.2022

Stig Kristiansen, Bjørn Inge Myrvang Kulterstad og Ole Andreas Stegegjerdet

Innholdsfortegnelse

1	Forord.....	3
2	Forklaring av begrep.....	6
3	Sammendrag.....	8
4	Innledning	9
4.1	Bakgrunn	9
4.1.1	Måling av vibrasjonsnivå	10
4.1.2	Daglig vibrasjonseksposering	11
4.1.3	Sliping av topplag på sveis	12
4.1.4	Kravspesifikasjon	17
5	Mål	18
5.1.1	Hovedmål	18
5.1.2	Delmål	18
6	Kartlegging.....	19
6.1	Mulige løsninger.....	19
6.1.1	Klammemontert fres.....	19
6.1.2	Robotarm med fres	20
6.1.3	Robotarm med sliper	21
6.2	Valg av løsning.....	21
6.2.1	Bruk av KR 60 HA til fresing.....	22
6.2.2	Fresemotor.....	23
6.2.3	Endefres.....	26
6.2.4	Sikkerhet.....	30
6.2.5	Grensesnitt.....	35
6.2.6	Mobilitet	36
7	Design av prototype og utprøving.....	37
7.1	Robotstyring	37
7.2	Bildegjenkjenning og sensorer:	39
7.2.1	Bildegjenkjenning for å detektere sveis.	39
7.3	Deteksjon av sveis	40
7.3.1	Testing av SSD MobilenNET og EfficientDet.....	42
7.3.2	Avstandsmåling til rør	44
7.3.3	Determinere dimensjonen til røret og bredden til sveisen.....	46
7.3.4	Finne rørets orientering.	47
7.4	Endeffector:	52
7.5	3D-Printing.....	55
7.6	Oppkobling.....	56

8	Diskusjon og konklusjon.....	57
8.1	Diskusjon.....	57
8.1.1	Kartlegging.....	57
8.1.2	Prototype	58
8.2	Konklusjon	59
9	Videreføring av prosjektet.....	61
9.1	Testfresing	61
9.2	Etablering av mekanisk beskyttelse.....	61
9.3	Bruke robot til å utføre ultralydmåling.....	62
9.4	Bruke berøringsprobe til å finne rørets orientering	62
9.5	Etablering og testing av sikkerhetssystem.....	62
10	Referanser	63
10.1	Tabelloversikt.....	68
10.2	Figuroversikt	69
11	Akronym	72
12	Vedlegg	73
13	Benyttet programvare.....	75

2 Forklaring av begrep

Endeffector	Fagterm på det som er festet på enden av robotarmen og skal interagere med omgivelsen til roboten.
OpenCV	Bibliotek med funksjoner som blir brukt til bildeprosessering.
Grenseverdi	Daglig grenseverdi som ikke skal overskrides [1].
Tiltaksverdi	Daglig eksponeringsverdi som krever iverksettning av tiltak for å redusere risikoen til et minimum [1] .
Bindefeil	Manglende binding mellom grunnmaterialet og sveis eller sveisestrenger
Github	Et enormt delingsnettverk for programmerere, hvor man kan dele koder med andre, gi hjelp til andre og diskutere løsninger.
Mikrokontroller	En liten prosessor som håndterer og styrer et fåtall av inn- og utgangssignaler fra en gitt prosess.
PLS (Programmerbar logisk styring.)	En prosessor som håndterer inn- og utgangssignaler via programvare.
PROFINET	En feltbus protokoll som står for kommunikasjon mellom komponenter.
Sveisefuge	Åpningen som er mellom ytterkantene på rør som skal sveises sammen.
Ettpunktsformelen	Matematisk formel som finner funksjonsuttrykket til en rett linje om vi har et punkt på linjen og linjens stigningstall.
Svingningsemisjon	Et fagterm for ordet vibrasjon. Blir oppgitt i m/s^2 .
Slicer	Programvare som gjør en 3D-tegning om til kommandoer som 3D-printeren kan følge.
Infill	Struktur med mye luft som ikke bidrar i styrken til det som 3D-printes.

Slagg	Belegg som legger seg på toppen av sveisen, ved elektrode- og rørtrådsveising.
Slagginerslutninger	Når man har fått slagg i sveisen. Skaper et dårlig kontaktpunkt som må repareres.
Lablemap	En liste over objektene modellen kan detektere.
Trinn	For hvert trinn blir en batch(vist antall) med bilder prosessert .
Gjennom Brenning	Sveisen er synlig fra innsiden av røret, ved sammenføyning av to rør.
Virtuelt python-miljø	Blir brukt for å isolere avhengigheter mellom <i>python</i> prosjekt (et miljø for hvert prosjekt).
Austenittisk metall	"Austenitt er én av strukturmodifikasjonene, fasene, som jernlegeringer kan ha. Austenitten har en flatesentrert kubisk krystallstruktur." [2]
Ferromagnetisk metall	"Ferromagnetiske materialer fremviser en spontan magnetisering under bestemte forhold, slik som ved tilstrekkelig lave temperaturer." [3]
Forward kinematics	Utregning av posisjonen til endeffector ved å bruke vinkler fra robotens ledd.
labelImg	Open source programvare for å grafisk sette merkelapper (<i>labels</i>).
Assembly	Sammensetting av forskjellige tegninger for å vise endelig resultat.

3 Sammendrag

I arbeidet med prefabrikking av rør og installasjoner som skal benyttes i dypvannsinstallasjoner er det mange tunge og gjentakende prosesser som potensielt kan automatiseres. Den viktigste årsaken til at dette bør gjøres, er for å begrense belastningen på arbeidstakere, redusere sykefravær og hindre skader. I andre rekke kommer det økonomiske aspektet.

I denne rapporten har vi, på oppdrag fra Luster Mekaniske Industrier, kartlagt muligheten for å benytte en industriell robot til å frese ned topplag på rørsveiser. Rapporten setter søkelys på utfordringer som vil oppstå om man skal frese i *Inconel* med en robot og hvordan disse problemene kan løses. Selv om det vil være mange situasjoner der roboten ikke vil ha god nok tilkomst på røret, vil det hjelpe mye for å avlaste arbeidere fra en tung slipeprosess om den klarer å frese ned bare deler av sveisen. For å demonstrere hvordan et autonomt system kan virke, ble det forsøkt å lage en prototype som skulle markere banen sin på et rør ved hjelp av bildegjenkjenning og avstandsmåling. Selve prototypen kom vi ikke i mål med grunnet tekniske utfordringer og manglende tid.

Rapporten gir gode løsninger på utfordringene som oppstår når man skal bruke en robot i et åpent produksjonslokale til fresing. Det blir ikke endelig konkludert med om en KUKA KR 500 vil klare å frese stabilt nok til å tilfredsstille kravene fra oppdragsgiver, men det blir belyst i denne rapporten hvordan man kan gå frem for å finne det ut.

4 Innledning

Oppdragsgiver i dette prosjektet er Luster Mekaniske Industri AS (LMI). LMI ble etablert i Gaupne i 1981 og har spesialisert seg på prefabrikasjon av rørsystemer i alle materialkvaliteter og utvikler sine egne sveiseprosedyrer iht. internasjonale standarder [4]. De utfører store prosjekter til olje- og gassindustrien – både på norsk og utenlandsk sokkel [4]. Selskapet har holdt seg innen denne bransjen, hvor rør og rørinstallasjoner til oljeindustrien er en av kjernevirksomhetene, fram til dags dato. En av de mange stedene som det befinner seg rør fra LMI er på havbunnen i Nordsjøen og subsea-installasjoner som ventilpakker og pumpestasjoner [5]. På slike installasjoner stilles særdeles strenge krav til både rør og sveis for å unngå ulykker, havari eller ukontrollerte utslipp av olje/gass (se vedlegg 24).

4.1 Bakgrunn

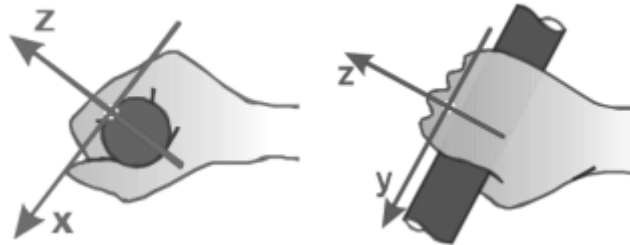
Mye av arbeidet som blir utført hos LMI innebærer håndtering av tunge rørdeler samt gjentakende bevegelser ved sliping og sveising. Arbeid av denne karakter er belastende for kroppen, særlig i form av vibrasjoner på ledd og muskler. For å avlaste arbeidstakere mest mulig ved slike typer jobber, er LMI på utkikk etter muligheter for å automatisere noen av prosessene som blir utført ved deres produksjonslokale i Luster.

LMI gav oss tilgang på en rapport fra Stamina helse, som er deres bedriftshelsetjeneste. Denne rapporten tar for seg måling av mekaniske hånd- og armvibrasjoner som oppstår ved bruk av håndholdte verktøy hos LMI, og hvor mye de ansatte er eksponert for disse. Stamina helse har ikke utført egne målinger på aktuelle verktøy, men hentet ut verdier fra en internasjonal vibrasjonsdatabase som var tilgjengelig på det tidspunktet rapporten ble laget (2017). Siden rapporten ble utarbeidet på denne måten vil det være variabler som ikke blir plukket opp i rapporten som vil kunne gi et dårligere bilde av hva som er de faktiske verdiene. Dette er variabler som slitasje på verktøy, materiale det jobbes med og type slipeskiver som blir brukt. Alle disse nevnte variablene vil kunne gi en høyere eksponeringsverdi.

Arbeidstilsynets forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer (FVAF) spesifiserer i §3-1. en tiltaksverdi for daglig eksponering og i §3-2. en grenseverdi for daglig eksponering på svingningsemisjonsverdier på hånd- og armvibrasjoner [1]. Disse verdiene blir målt i m/s^2 , og er på henholdsvis $2,5 m/s^2$ og $5,0 m/s^2$ og skal sammenlignes opp mot den daglige eksponeringsverdien.

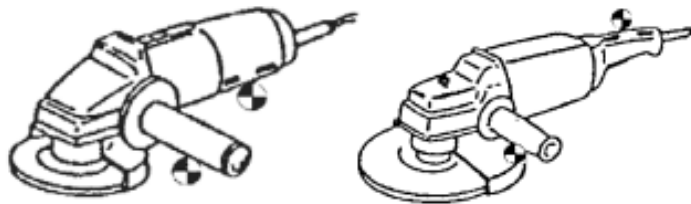
4.1.1 Måling av vibrasjonsnivå

Proseduren for å kunne finne den eksponeringsverdien man blir utsatt for ved bruk av vinkelsliper er beskrevet i NS-EN ISO 5349-2 (2001) og starter med at man utfører en måling av akselerasjon i tre retninger som vist på Figur 1.



Figur 1 - Måleretninger for hånd- og armvibrasjoner [6].

Det festes akselerometer på det aktuelle manuelle verktøyet på punkter som henviser fra NS-EN-ISO 8662-2 (2001) som vist på Figur 2, for å få en måling på høyre- og venstre arm.



Figur 2 - Målepunkter for akselerometer ved måling av svingningsemissjonsverdi [6].

Når man har utført målinger med akselerometer kan man bestemme det totale vibrasjonsnivået, a_v , på det aktuelle verktøyet ved å benytte formelen:

$$a_v = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

4.1.2 Daglig vibrasjonseksposering

Den daglige eksponeringsverdien blir definert i henhold til FVAF § 1-5. og tar utgangspunkt i en referanse arbeidsdag på 8 timer ($A(8)$).

$$a_v = A(T)$$

$$A(8) = A(T) \sqrt{\frac{T}{8}}$$

Et tenkt eksempel med oppdiktede verdier for vibrasjonsmålinger og en daglig bruk på $T = 2$ timer gir oss følgende verdier:

$$a_x = 3,5 \text{ m/s}^2 \quad a_y = 4,5 \text{ m/s}^2 \quad a_z = 2,8 \text{ m/s}^2$$

$$a_v = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{3,5^2 + 4,5^2 + 2,8^2} = 6,35 \text{ m/s}^2$$

$$A(8) = A(T) \times \sqrt{\frac{T}{8}} = 6,35 \text{ m/s}^2 \times \sqrt{\frac{2}{8}} = 3,175 \text{ m/s}^2$$

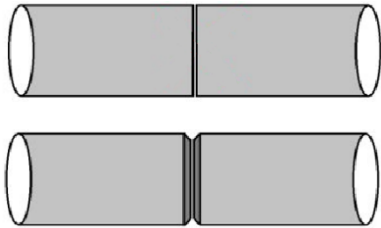
Løser vi med hensyn på T , får vi den maksimale tiden som man kan bruke denne tenkte maskinen før vi når tiltaksverdien på $2,5 \text{ m/s}^2$.

$$T = 8 \times \left(\frac{A(8)}{A(T)} \right)^2 = 8 \times \left(\frac{A(2,5)}{A(6,35)} \right)^2 = 1,24 \text{ timer}$$

Formler og henvisninger til definisjoner på side 3 og 4 er hentet fra vibrasjonshåndboka [6].

4.1.3 Sliping av topplag på sveis

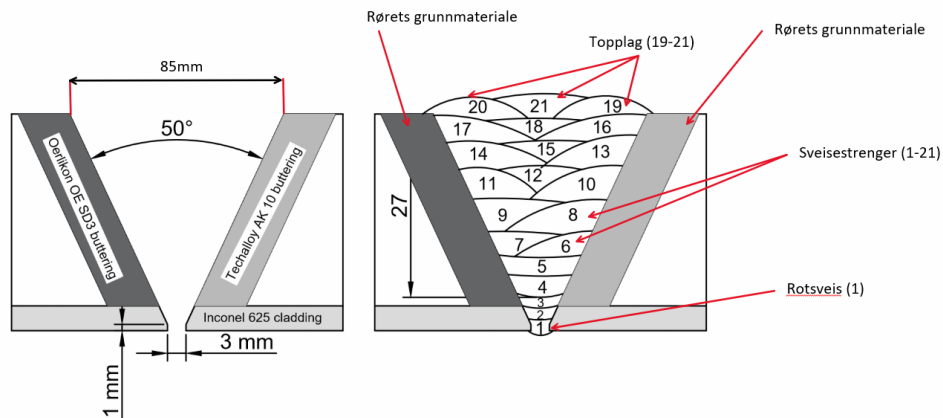
En av jobbene hos LMI som er veldig repeterende i sitt bevegelsesmønster, tar lang tid og samtidig krever god nøyaktighet, er å slippe ned topplaget på sammensveiste rør. Ved sammensveising av to rør som skal benyttes på en subseinstallasjon i oljeindustrien, er kvalitet og styrke viktig.



Figur 3 - Øverst er en I-fuge, nederst er en V-fuge.

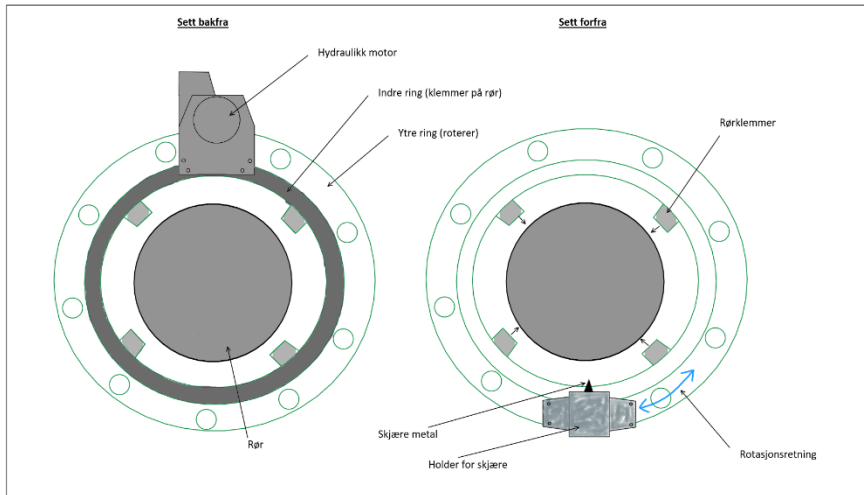
Om man sveiser to rørdeler som er kappet med en 90° vinkel mot hverandre (også kalt en I-fuge) vil det kreves veldig mye energi for å få *gjennombrenning* ved tykke rørvegger, samt risikoen for feil er høyere enn ønsket (se Figur 3).

Ved å fuge rørene til en v-fuge skapes det en «renne» som sveisestrengene kan legges i. På denne måten får man mulighet for *gjennombrenning* og nok plass til å fylle fugen med sveis (se Figur 4). Topplaget må ligge over grunnmaterialet for å hindre *undermål* på sveisen. Et eksempel på undermål ville vært om sveisen på Figur 4 hadde manglet sveisestrengene 19-21, og strengene 16-18 var det nye topplaget.



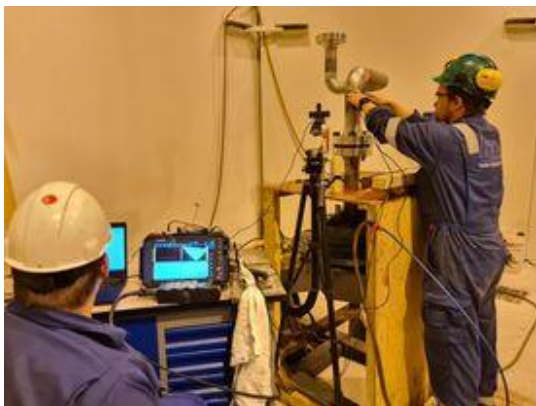
Figur 4 - V-formet sveisefuge på rør med Inconel 625 cladding, utdrag fra sveiseprosedyre © LMI.

Denne fugen lages i dag av en fugemaskin (se Figur 5) med roterende skjær, som over flere runder tar bort litt materiale av gangen, helt til materialet rundt enden på røret får en vinkel på mellom 25° og 30° i forhold til opprinnelig kapp. Deretter settes rørdelene mot hverandre som vist på Figur 4, og sveisestrenger legges i henhold til sveiseprosedyre.



Figur 5 – Fugemaskin som blir brukt av LMI med forklaringer.

LMI forklarer at etter sveisingen kreves det en NDT (*Non-destructive testing*) om rørinstallasjonen skal til en subseinstallasjon. Denne testen er vanlig å utføre med røntgen- eller ultralydsjekk for å utelukke luftlommer (porer), bindefeil og slagginnerslutninger i sveisen, det er vanlig å bruke ultralyd om røret har en tykkelse på over 35mm.



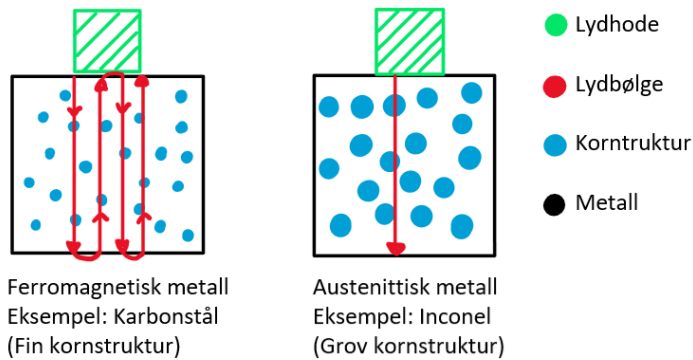
Figur 6 - NDT, Ultralydtesting på rørsveis © LMI.

Denne testen blir utført ved at man påfører en ledende gelé og fører ultralydproben langs sveisen, som illustrert på Figur 6.

Før man kan utføre denne ultralydtesten må topplaget på sveisen slipes ned slik at det blir jevnest mulig med grunnmaterialet. Toleransen på hvor ujevn overflaten på sveisen kan være etter endt sliping, blir spesifisert i ISO 17640 – *Non-destructive testing of welds* [7]. LMI

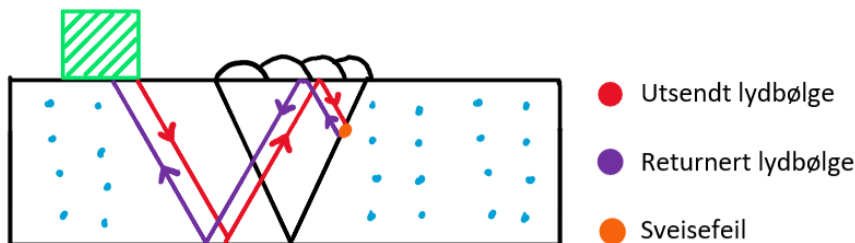
oppgir at denne ujevnheten kan være maksimalt 0.5mm (avstand mellom ultralydproben og testoverflaten) for best mulig resultat av målingen, som igjen er grunnen til at denne avstanden er nevnt i kravspesifikasjonen i kapittel 5.1.4.

Ved ultralydsjekk av ferromagnetisk metall som for eksempel karbonstål, er det ikke nødvendig å slippe ned topplaget før ultralydkontroll av sveisen. Grunnen til dette er at ferromagnetisk metall har fin kornstruktur som gjør det lett for lydbølgen fra lydhode å bevege seg i materialet. Austenittiske metall som for eksempel *Inconel* har grov kornstruktur, denne grove strukturen forstyrrer lydbølgen. Dette begrenser lengden lydbølgen klarer å bevege seg i materialet. Se Figur 7 for et enkelt eksempel av hvordan en lydbølge går i austenittisk og ferromagnetisk metall (kilde LMI).



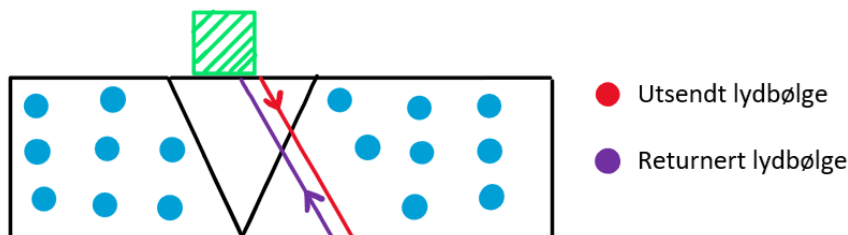
Figur 7 - Forskjell på hvordan lydbølgen beveger seg i ferromagnetisk og austenittisk metall (kilde LMI).

Siden lydbølgen kan bevege seg lengre i ferromagnetisk metall trenger ikke lydhode være plassert rett over en sveisefeil for å finne den, lydbølgen kan sendes ned i metallet med vinkel tilpasset etter bredden og tykkelsen på arbeidsstykket. Se Figur 8 for illustrativ forklaring (kilde LMI).



Figur 8 - Hvordan ultralydtest blir utført på ferromagnetisk metall (Kilde LMI).

På grunn av motstanden lydbølgen møter i austenittisk metall, er det begrenset hvor langt den klarer å bevege seg. Derfor må topplaget på sveisen slipes ned slik at det er mulig å bevege lydhode over hele sveisen, se Figur 9 for illustrativ forklaring (kilde LMI).



Figur 9 - Hvordan ultralydtest blir utført på austenittisk metall (Kilde LMI).

Måten LMI sliper ned dette topplaget på i dag, er at en person må manuelt slipe det ned med en vinkelsliper til det ligger jevnt med grunnmaterialet. LMI oppgir gjennomsnittlig arbeidstid som brukes på å slipe ned topplaget på en sveis, til ca. 3 timer om røret har en diameter på 10-12 tommer. Tidsbruk vil variere med dimensjon og material type. Den mest bruke vinkelsliperen hos LMI, er GWS 14-125-CI fra Bosch, så det er denne som blir brukt som utgangspunkt i denne rapporten.

Totale svingningsverdier (Overflatesliping (grovslipling))

Svingningsemissjonsverdi ah	8,5 m/s ²
Usikkerhet K	2 m/s ²

Totale svingningsverdier (Sliping med slipeskive)

Svingningsemissjonsverdi ah	3 m/s ²
Usikkerhet K	1,5 m/s ²

Figur 10- Svingningsverdier (vibrasjoner) for Bosch GWS 14-125-CI [8].

I fra databladet til GWS 14-125-CI [8] har vi hentet et utdrag som viser svingningsemissjonsverdiene (Figur 10). Her vises svingningsverdiene i to kategorier, *overflatesliping (grovslipling)* og *sliping med slipeskive*. På forespørsel til Bosch Norge om en mer konkret definisjon på disse kategoriene, har de ikke kunne supplere oss med gode nok svar til at dette har latt seg gjøre.

For å kunne lande på et utgangspunkt henvendte vi oss til en ansatt hos LMI for å høre hva han ville kategorisere nedsliping av et topplag som. Svaret var kategorisk at det var grovslipling. Fra Figur 10 ser vi at til grovslipling er det en svingningsemissjonsverdi på 8,5 m/s² og en usikkerhet på 2 m/s². Det vil si at det i beste fall er det en (8,5 – 2 = 6,5) m/s² påkjennelse for armer, skuldre og nakke på personen som utfører denne jobben. På samme måte blir det i verste fall (8,5 + 2 = 10,5) m/s².

Tallene som er oppgitt fra Bosch har vi plottet inn i vibrasjonskalkulatoren [9] (vedlegg 4) som det norske arbeidstilsynet bruker (se Tabell 1, side 14). I rad 1-6 har det blitt satt inn verdier i spekteret 6,5 – 10,5 m/s² for å se på vibrasjonsverdiene med- og uten usikkerheten. I kolonne fem (Eksponeringstid) har vi satt inn to og tre timer som eksponeringstid da LMI oppgir 3 timer som estimert tid på arbeidet.

Maskin/Arbetsmoment	Vibrationsvärde (3 axlar)	Exponeringstid för insatsvärde (2,5 m/s ²)		Exponeringstid för gränsvärde (5,0 m/s ²)		Exponeringstid		Daglig vibrationsexponering A(8)	Vibrations- exponerings- poäng
		[m/s ²]	[Tim]	[Min]	[Tim]	[Min]	[Tim]		
1 Bosh GWS 14-125-CI	6,5	1	11	4	44	2	0	3,3	169
2 Bosh GWS 14-125-CI	6,5	1	11	4	44	3	0	4,0	254
3 Bosh GWS 14-125-CI	8,5	0	42	2	46	2	0	4,3	289
4 Bosh GWS 14-125-CI	8,5	0	42	2	46	3	0	5,2	433
5 Bosh GWS 14-125-CI	10,5	0	27	1	49	2	0	5,3	441
6 Bosh GWS 14-125-CI	10,5	0	27	1	49	3	0	6,4	662
7								0,0	
8								0,0	
Total daglig vibrationsexponering A(8)								11,9	2.248

Tabell 1 - Vibrasjonskalkulator til det svenske arbeidsmiljøverket med tall oppgitt fra Bosch.

I kolonne tre ser man at selv med laveste teoretiske svingningsemissjonsverdi som vil oppstå ved bruk av Bosch GWS-14-125-CI, vil man kun få slipe i én time og 11 minutt før man treffer tiltaksgrensen. Tar man bort usikkerheten og baserer seg på 8,5 m/s², er det 42 minutter som kan slipes før man må se på tiltak. I verste fall er det bare 27 minutter man får slipt før tiltaksgrensen på 2,5 m/s² er et faktum. Man kan se bort ifra raden som nevner *Total daglig vibrasjonseksposering* da denne summerer opp alle eksponeringene, noe som ikke blir relevant i denne sammenheng. Om man jobber videre med andre vibrerende verktøy i løpet av en arbeidsdag kan disse fylles inn på samme måte som gjort i kolonne en og man vil få et bilde av den totale eksponeringen i løpet av arbeidsdagen.

Tiltak som nevnes i rapporten fra Stamina Helse er blant annet:

- Redusering av eksponeringstid.
- Bytt verktøy til andre som har lavere svingningsemissjonsverdier.
- Bruk alternative arbeidsmetoder.
- Endring i arbeidsteknikk (bruk mindre kraft).
- Bruk av vibrasjonsdempende hansker

I tillegg til vibrasjonene som blir påført personen som utfører arbeidet, gir sliping et dårlig klima i produksjonslokalet grunnet støy og særlig forurensing av luftkvalitet. Konklusjonen er at disse verdiene vi ser i Tabell 1 trigger krav til tiltak i produksjonen på en jobb som det å slipe ned topplag. Som et tiltak ønsker LMI å se på muligheten for få til et automatisk system som freser ned topplag på sveis. På denne måten kan man se bort ifra overnevnte tiltak, da operatøren skal utelukkende justere inn systemet og trykke start. Det har blitt utarbeidet en kravspesifikasjon i samarbeid med LMI som det er ønskelig å få til på flest mulige punkter på for det endelige systemet, slik at helsen til arbeiderene blir ivaretatt på en god måte.

4.1.4 Kravspesifikasjon

I dialog med LMI har vi fått oppgitt hva som er ønskelig at denne automatiske innretningen skal kunne klare å utføre. I stedet for å slipe ned topplaget ønskes det at topplaget freses ned. Ved å frese ned topplaget kutter man litt og litt av metallet i større biter enn man ville gjort om man sliper. Når man sliper ned et topplag, avgir slipeskivene fine partikler, nærmest som støv, som sprer seg rundt i arbeidslokalet. De større bitene som kommer av fresing, vil være så tunge at de faller ned og blir liggende på bakken.

Krav til løsning:

- Frese ned topplag med en bredde på opptil 85mm.
- Nøyaktighet på ± 0.5 mm i vertikal retning (høyde forskjell på topplag og grunnmateriale).
- Ikke lage spor i overflaten dypere enn 0.5mm (Vibrasjoner må unngås).
- Skal kunne frese krevende metaller som *Inconel* og *Duplex* rustfritt stål.
- Tiden det tar å frese er tilsvarende tiden det tar å slipe for hånd (Gjennomsnittlig 3 timer).
- Jobbe selvstendig uten operatør etter startprosedyre.
- Gi beskjed til operatør når det er igjen ca. 1mm av topplaget.
- Lett tilgjengelige nødstop, eventuelt flere om det blir nødvendig.
- Kunne stoppe seg selv ved systemfeil.
- Kunne stoppe seg selv ved unormal stor belastning på fres.
- Jobbe i støvfylt miljø (metall og slipestøv).
- Kunne kjøres manuelt av operatør.
- Lage til normalstilling med knapp som setter fresen i denne stillingen (operatør skal kunne bestemme normalstilling).
- Operatør skal kunne lagre dimensjon på rør i programmet, ved å velge en dimensjon skal fresen stille seg inn slik at det ikke er nødvendig å justere fresen ytterlige før fresing.
- Operatør skal kunne justere omdreiningstallet, mating og kuttdybde.

5 Mål

Basert på problemstillingen fra LMI valgte vi å definere noen konkrete hovedmål og delmål for prosjektet. Disse ble definert i hovedsak ut ifra ønsker fra LMI, samt noen punkter vi selv ønsket å tilegne oss kunnskaper om, da vi så de kunne være til hjelp for å løse problemet.

5.1.1 Hovedmål

1. Å kartlegge muligheten for å benytte en robotarm med freseanordning, som automatisk freser ned topplaget til sveisen.
2. Å kartlegge mulighetene for å gjøre robotarmen mest mulig mobil, med hensyn på sikkerhet og fleksibilitet i arbeidet.
3. Lage prototype for å demonstrere hvordan systemet kan virke i grove trekk.

5.1.2 Delmål

- Kartlegge sikkerhetsbehov rundt bruk av robot i industrien.
- Designe et «sikkerhetsbur» med laser som kan gjøre arbeidsområdet til roboten mer fleksibelt og samtidig sørger for at sikkerheten under operasjon er ivaretatt om lovlig.
- Kartlegge muligheten for å gjøre roboten flyttbar.
- Undersøke hvordan jobben gjøres i dag, og hvordan dette går ut over HMS.
- Utarbeide et grovt budsjett for hva det kan koste å realisere.
- Lære oss å kunne 3D-tegning og 3D-printing (Vi ser behovet for å kunne konstruere deler til en prototype).
- Lage bildegjenkjenning som kan gjenkjenne sveis.

6 Kartlegging

Under kartleggingen har vi prøvd å sette oss inn i flest mulig detaljer om prosessen som har blitt beskrevet av oppdragsgiver. Det mest ideelle som løsning er å automatisere hele prosessen med å slippe ned topplag. På denne måten slipper man den fysiske påkjenningen for arbeiderne ved LMI. Vi ønsket å få til en løsning som var mest mulig autonom, for å redusere operatørens behov for involvering.

6.1 Mulige løsninger

Gjennom forprosjektet ble det identifisert tre mulige løsninger som kunne brukes til å automatisere prosessen med å få slipt ned topplaget.

6.1.1 Klammemontert fres

Vårt første alternativ er å bruke en *fugemaskin* med en ettermontert fres. Måten denne fugemaskinen virker på er at den blir åpnet (kløyves) og settes sammen igjen rundt røret. Rørklemmene skrues inn manuelt med et verktøy, slik at de klemmer på røret for å få det mest mulig sentrert i maskinen (se



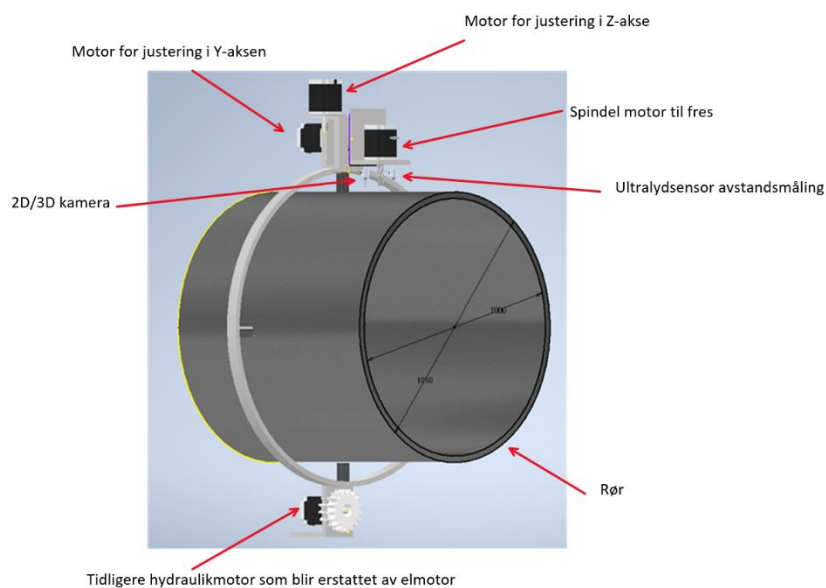
Figur 11 - Fugemaskin som festes rundt rør.

Figur 5, side 12 for ytterligere forklaring).

Den hydrauliske motoren roterer den ytre ringen rundt den indre ringen ved hjelp av tannhjul. Denne motoren erstattes med en elektrisk motor, drevet av en frekvensomformer for å enklere kunne justere farten på rotasjonen. Posisjonering i x- og y-akse vil bli satt av elektriske servomotorer så man har kontroll på posisjon til enhver tid (se Figur 9).

Fresens bevegelser vil bli styrt av sensorinput, sensorene vil måle bredden og høyden til topplaget. Rørene kan ha ujevnheter, derfor må fresens høyde kunne justeres under fresing. For å holde vekten og størrelsen av maskinen nede, blir det brukt et

lite fresehode. Det vil medføre at fresen må kunne bevege seg på tvers av sveisen, slik at selv ved tykke rør vil fresen nå hele sveisen. Bevegelser av fresen vil bli gjort med sleider vertikalt på sveisen og horisontalt med røret, som blir styrt av servomotorer.



Figur 12 - Tenkt utforming på en prototype for fresing ved å bruke fugemaskin

Denne løsningen kan gi en stabil freseprosess, men vil til gjengjeld kunne medføre en kronglete prosedyre for å festes rundt røret. Løsningen er avhengig av en tilgjengelig kran til dette da innretningen vil få en betydelig tyngde. Det vil også være en omfattende testperiode, da det ikke eksistere noe tilsvarende på markedet.

6.1.2 Robotarm med fres

Robotarmer er veldig allsidige når det gjelder arbeidsoppgaver. Med lang levetid og høy nøyaktighet, vil dette en god måte å utføre oppgaven på. Roboten vil bli plassert på en mobil base hvis dette er lar seg gjøre. Den mobile basen kan være utstyrt med labber, løftemulighet med truck og kran. For å beholde sikkerheten vil det være et mobilt sikkerhetssystem satt opp rundt der roboten skal jobbe, det vil innebære nødstop og bevegelses sensorer for å stoppe maskinen hvis noen kommer for nærme.

For å kunne frese topplaget på sveisen vil robotarmen være utstyrt med en fresemotor og sensorer for å detektere høyden og bredden til topplaget. Til å finne høyden til topplaget i forhold til grunnmaterialet vil det bli brukt en ultralyd avstandssensor. Vi vil se på muligheten for å benytte et 2D kamera for å finne ut bredden til sveisen, samt kombinere med avstandsmålingen som ultralydsensoren tar. Under fresing vil det oppstå vibrasjoner som kan føre til at roboten slites unormalt fort ut. For å begrense vibrasjonen til fresehodet må det sees på løsninger for å få dempet disse.

6.1.3 Robotarm med sliper

En løsning som kunne vært aktuell er å benytte en robot til å slipe topplaget. Dette hadde redusert belastningen på robotarmen siden sliping ikke forårsaker like mye vibrasjon og slag som fresing vil gjøre. Det er flere viktige grunner til at vi har sett bort i fra dette alternativet. LMI har et ønske om å slippe unna luftforurensingen som kommer fra slipeskivene og fine metallpartikler fra rør. Det skal også nevnes at slipeskivene heller ikke vil vare like lenge som en fres, så det vil kreves flere slipeskiver for å slipe ned ett topplag, som igjen gir en økt tidsbruk. Presisjon kan også bli en utfordring siden en slipeskive vil bli fort nedslitt. I tillegg til alt dette kan en slipeskive være dårlig produsert og sprekke opp. Da risikerer man at det blir kastet fragmenter av skiven ut i lokalet.

6.2 Valg av løsning

LMI hadde mens vi var i forprosjektet gått til anskaffelse av en *KUKA KR 60 HA* (KR 60) som skal brukes til å kutte i plater med plasmakutter. I forbindelse med denne anskaffelsen ønsket vi å benytte denne roboten, og kartlegge muligheten for å benytte denne til fresing av topplag også. Siden roboten ikke kommer til å være brukt til plasmakutting hele tiden, kunne det være tidsmessig lønnsomt å benytte den til andre arbeidsoppgaver i produksjonshallen. KUKA Norge ble tidlig kontaktet for å høre om muligheten for å benytte roboten til dette formålet. Det umiddelbare svaret var at roboten antageligvis ble for liten til formålet, men om man kunne se bort ifra at den ville bruke lang tid på prosessen, kunne det være mulig. Siden det å bruke roboten til å frese ned topplaget først og fremst er et HMS-tiltak, skal ikke det at roboten vil bruke lang tid være en utfordring. Om tiden roboten bruker på å frese ned et topplag blir så langt at det kommer i veien for å kunne benytte roboten til sin opprinnelige oppgave, vil det være ulønnsomt, så her må alternativene veies opp mot hverandre av LMI.



- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1 Manipulator | 5 KUKA smartPAD |
| 2 Energy supply system | 6 Technology cabinet 8 kW |
| 3 Electrically-driven spindle | 7 Tool cover |
| 4 KR C4 robot controller | 8 Tool rack |

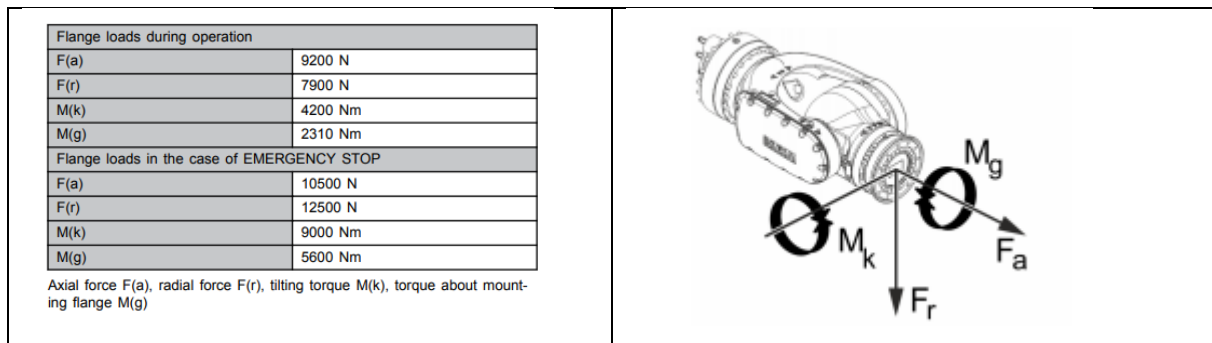
KUKA har tilgjengelig ferdige fresepakker i størrelsesorden på henholdsvis 8, 12 og 16kW. Vi tok sikte på å bruke den som er på 8kW da denne har lavest vekt og vil kunne brukes med robotarmen lengst mulig utstrakt. På den måten kan robotarmens lengde best mulig utnyttes for å komme lengst mulig rundt røret.

Figur 13 viser fresepakken fra KUKA med en 8kW spindelmotor.

Figur 13 - Komplette fresepakke fra KUKA, med 8kW fresepakke. Hentet fra vedlegg 14.

6.2.1 Bruk av KR 60 HA til fresing

En av de største utfordringene med å bruke KR 60 til å frese i så harde metal som *Inconel*, er slagene som roboten blir utsatt for når fresen treffer metallet. Disse vibrasjonene vil kunne føre til at roboten mister posisjoneringen mens fresingen pågår og medføre at fresen treffer grunnmaterialet eller at fresen knekker.



Figur 14 - Maksimalt tillatte krefter på endeffector for KR 500 R2830 F. Hentet fra vedlegg 5.

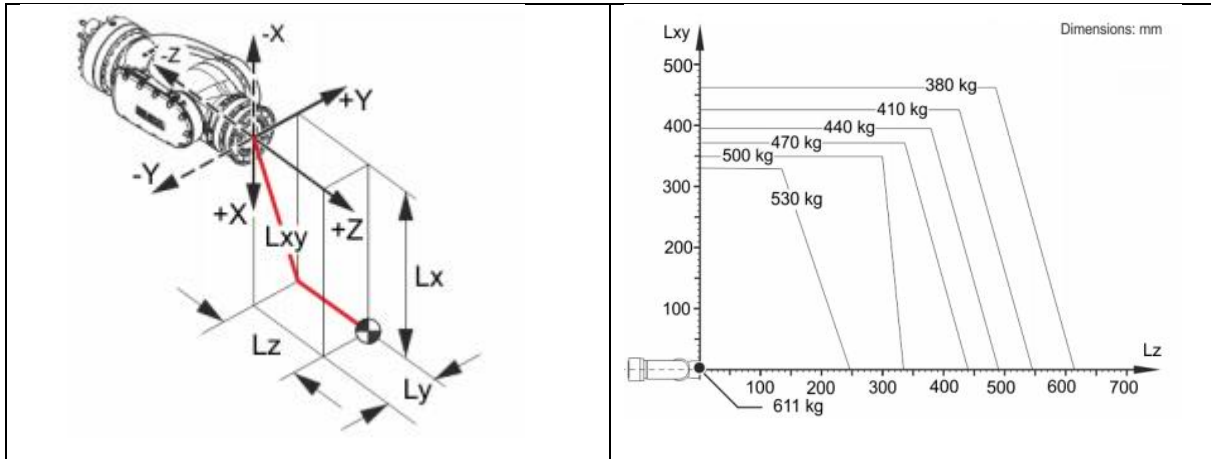
Påkjenningene som roboten kan tåle avhenger av posisjon, nyttelast, retning og varighet på det som skal gjøres, det er derfor ikke enkelt å sette en enkel grense for hva som blir for mye. KUKA har derfor definert grenser basert på akser (se Figur 14).

Sammen med KUKA Norge arrangerte vi et møte med flere eksperter fra KUKA Tyskland, for å prøve å kartlegge om roboten vi nå hadde tatt utgangspunkt i kunne benyttes til denne fresingen. Til stede på møtet fra KUKA Tyskland var det blant en forsker med hovedfelt innen maskinering av metaller med roboter.

På spørsmålet om det var mulig å benytte *KR 60* til denne fresingen var svaret fra KUKA, nei. Roboten er for lett for dette formålet og vil ikke kunne klare å motstå vibrasjonene som oppstår. KUKA Tyskland mente at den minste roboten som kunne benyttes til formålet kan være en *KR 300 R2700-2F* (KR 300), men aller helst burde man gå for en *KR 500 R2830 F* (KR 500) om roboten skulle benyttes utelukkende til fresing av *Inconel* og ha lengst mulig levetid. De tre sifrene etter bokstavene KR gjenspeiler nyttelast som roboten er godkjent for (KR 500 = 500kg nyttelast.) Grunnen til at de anbefaler en så stor og tung robot er for å kunne frese mest mulig stabilt. Bevegelsen til roboten må være stivest mulig for å kunne få best mulig resultat. Det ble også fortalt de for 5-6 år siden hadde forsøkt å frese *Inconel* med en *KR 300* robot (vedlegg 15) og beskrev prosessen som ikke stabil nok, men dette kunne skyldes en dårlig freseskjær, så han hadde ingen konkrete data han kunne vise oss på dette eksperimentet. I etterkant av dette møtet ble fokuset flyttet bort fra *KR 60* (vedlegg 33) og over til *KR 500*, som er en betydelig større robot (vedlegg 16).

6.2.2 Fresemotor

At det ble tatt utgangspunkt i en så stor robot som *KR 500* medfører at det kan velges en betydelig større og tyngre motor til å frese med enn den som originalt ble tiltenkt i forprosjektet, grunnet større nyttelast.



Figur 15 - Tillatt vekt på endeffector på KUKA KR 500 R2830 F. Hentet fra vedlegg 5.

Det ble påpekt av KUKA Tyskland at jo mer vekt man kan få tilført på enden av robotarmen, jo mer stabilt vil man klare å utføre fresningen, da det blir en motvekt mot slagene idet fresen treffer materialet. Som det kommer frem på Figur 15 har *KR 500* en tillatt maks nyttelast på 611 kg på *endeffector*, ved flens. Det er disse lastbeskrivelsene som er blitt tatt hensyn til når det er blitt valgt fresemotor.

I KUKA sine komplette fresepakker som blir nevnt i 5.3 er det Italienske HSD sine spindelmotorer som blir benyttet. HSD har innledet et samarbeid med KUKA og kommet med egen omfattende katalog som viser hvilke spindelmotorer som passer til hvilke roboter. I denne katalogen (vedlegg 19) er det motoren *ES789* vi har sett oss ut som en mulig løsning. Denne motoren kan kjøre med høye hastigheter (opp til 24,000 RPM), som er viktig om man skal frese *Inconel* tørt (se 7.2.3 Freseskjær). Et annet viktig punkt som gjorde at valget falt på *ES789* er at den har et innebygget akselerometer. Dette kan benyttes til å vurdere om påkjenningen på freseskjæret blir for stor, og faren for å knekke er til stede. Her ser vi for oss at det legges inn parameter på vibrasjonene som gjør at roboten justerer ned f.eks. hvor mye som skal feres bort om gangen (kuttddybde) og gi tilbakemelding på mistanke om slitasje på freseskjær.



Figur 16 - ES 789 fresemotor [50].

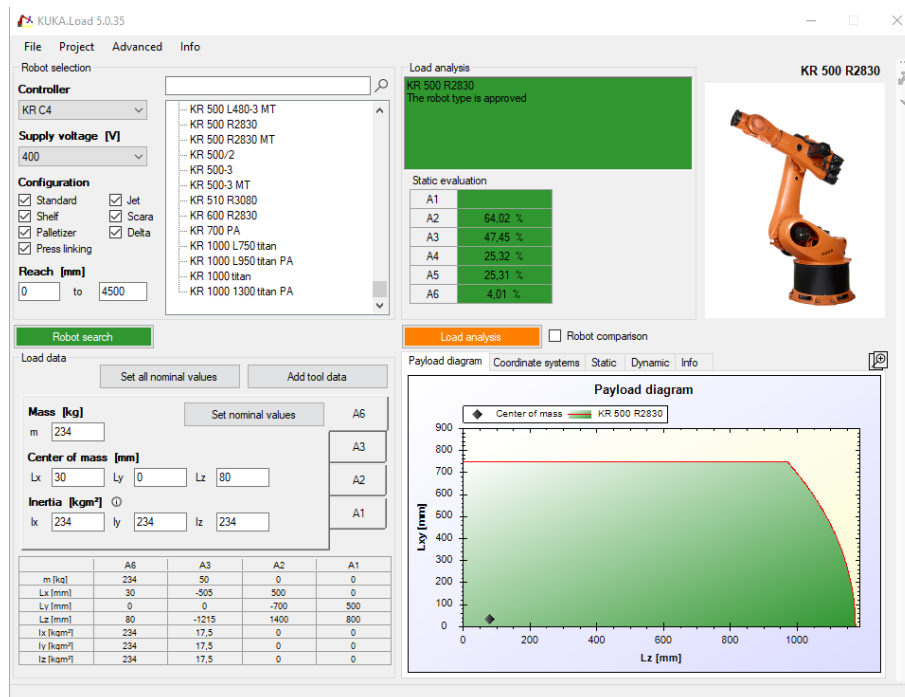
ES789 kan ifølge katalogen til HSD (vedlegg 19) frese i stål, som er det nærmeste man kommer hardheten til *Inconel* i denne katalogen. Siden ingen av svarene vi får fra HSD Italia (vedlegg 25) gir oss gode nok indikasjoner på om den klarer så harde material som *Inconel*, er dette også noe som må prøves ut i praksis for å kunne gi et konkret svar på om det lar seg gjøre.

Kommunikasjon fra fresens frekvensomformer til *PLS* vil skje via *PROFINET*, som er et feltnettverk for kommunikasjon mellom komponenter i et industrinett.

Siden selve fresemotoren har en egenvekt på 34kg, anser vi det som en god idé å legge til ytterligere vekt på enden av robotarmen som anbefalt fra KUKA for en mer stabil freseprosess, men dette er en tentativ prosess som må prøves ut. Det påpekes i (vedlegg 5 – s 27) at all last som skal benyttes på robotens *endeffector* må simuleres i bruk via programmet *KUKA.Load*, før det kan benyttes på roboten. *KUKA.Load* er et program brukes for å kartlegge og kalibrere robotens bevegelse med hensyn på tregheten som vil komme med ekstra last, og gi en tilbakemelding på om det lar seg gjøre.

For å simulere en tenkt situasjon med vår valgte fresemotor, prøvde vi å velge KR 500 i *KUKA.Load* og tilføre en vekt på 200kg ekstra på *endeffector* for økt stabilitet under fresing, for å se om roboten var egnet (Figur 17). Dimensjoner på fresemotor har blitt oversendt fra HSD og ligger under vedlegg 6, for akse-forklaring se Figur 15.

Da massesenter til fresemotoren er i midten av chassiset, settes L_y til 0. L_x plasseres 30mm ned fra senter da fresemotor er litt lenger i x-retning, men dette blir tentativt. L_z settes til 80mm da det er 75mm som er senter på chassiset, pluss koblingshus som bygger 75mm, men som ikke inneholder nevneverdig vekt sett opp imot motoren. Disse dimensjonene har blitt fylt inn under *Load data* - A6



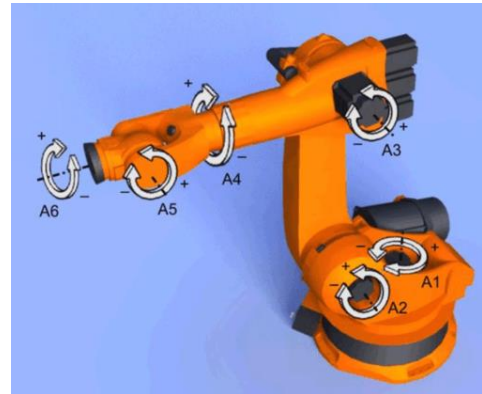
(som er *endeffector*).

På tregheten (*inertia*) settes hele vekten til alle retninger, da vi ikke har data på dette. Siden tregheten skal justeres ned i noen av retningene vil dette gi et uriktig bilde, men det vil uansett bekrefte om vekten er akseptabel.

Figur 17 - Simulering i *KUKA.Load* med ES789 + 200kg vekt.

Man kan se på Figur 17 under *Load analysis* at den ekstra vekten på 200kg på *endeffektor* er ingen problem for roboten, og det vil være mulig å tilføre ytterligere vekt også om man ser at prosessen blir for ustabil.

Figur 18 viser hvordan leddene er inndelt på roboten. Under *static evaluation* i Figur 17 er det listet opp alle leddene til roboten (A1-A6) og belastningen på disse. Her observerer vi at det er i A2, som er det andre leddet til roboten (og lengste), som er nærmest sin toleranse med 64,02% av maks toleranse ved en tilført vekt på 234kg. Det ble gjort ytterligere simulering, hvor det stadig tilføres mer vekt på *endeffector* (A6). Når tregheten har kommet opp til 310kg i retningen Lx , må nyttelasten ses i sammenheng med hvor lenge roboten skal jobbe med den (syklustid).



Figur 18 - Forklaring av plassering på ledd, på KUKA robot [56].

Belastning med nyttelast under 310kg vil ifølge programmet være ingen problemer for roboten å utføre over lengre tid.

Dette vil være en indikator å følge ved en eventuell felt-

testing av systemet. *KUKA.Load* tar ikke i betraktning eksterne krefter som påvirker lasten som er på *endeffector*, dette blir presisert i form av advarsler i programmet. Det må også påpekes at *KUKA.Load* utelukkende simulerer statiske tilstander. For en ytterligere simulering og utprøving hvor eksterne krefter skal påvirke prosessen må KUKA konsulteres.

6.2.3 Endefres

Sveisen som oppdragsgiver ønsker å slipe ned består av metallegeringen *Inconel*, som er en fellesbetegnelse for en gruppe av nikkelbaserte «superlegeringer». Bakgrunnen for denne betegnelsen er at metallet bevarer sin styrke selv ved høye temperaturer, er ekstremt sterkt og i tillegg er det veldig korrosjonsmotstandig. Dette gjør at *Inconel* har fått et vidt bruksområde, som for eksempel i romraketter, turbinmotorer og i olje- og gassindustrien [10].

KJEMISK ANALYSE/ CHEMICAL COMPOSITION

Actual results: acc to EN 10204 - 3.1

Wire/strip

Gass/flux/Auxiliary:	
C	0.012%
Si	0.07%
Mn	0.02%
P	0.005%
S	0.002%
Cr	22.33%
Ni	64.7%
Mo	8.6%
Cu	0.02%
Ti	0.14%
Al	0.12%
Fe	0.23%
Nb+Ta	3.64%

Figur 19 - Kjemisk sammensetning av *Inconel* 625 (vedlegg 2) ©LMI.

På Figur 19, som er et utdrag fra vedlegg 2, kan man se den kjemiske sammensetningen som er i *Inconel* 625. Det er denne legeringen som er i sveisen som LMI ønsker å frese ned. Hovedingrediensene er nikkel (64,7%) og krom (22,33%). Mens andre metaller som f.eks. stål har høyere smeltetemperatur enn nikkel, har det ikke den samme styrken og korrosjonsmotstanden. Ved høye temperaturer vil *Inconel* fortsatt bevare sin styrke og gode beskyttende egenskaper mot oksidering og korrosjon [11] [12]. Det er også veldig motstandsdyktig mot mekaniske påkjenninger, som blant annet vil inntreffe i oljeførende rør, grunnet sanden som fortsatt er i oljen. Her skaper sanden i høy fart en slipeeffekt mot rørvæggen som kreves harde metaller for å motstå. *Inconels* motstandsdyktighet til varme gjør også at det er et materiell som er vanskelig å arbeide med når det gjelder forming og maskinering.

Når vi skulle hente inn mulige freseskjær var det to kriterier som ble viktige å vektlegge. Det første kriteriet er at skjæret må kunne fjerne *Inconel* raskt. Allsidigheten til roboten gjør at den kan benyttes til andre formål i produksjonslokalet, så jo raskere det lar seg gjøre å frese ned en sveis, jo raskere kan den benyttes til andre formål. Fra kravspesifikasjonen er det også nevnt at den må klare å frese ned topplaget tilsvarende tiden det tar å slipe det ned for hånd (3 timer). Det andre kriteriet er at skjæret må være robust, slik at nøyaktigheten roboten blir kalibrert med, holder seg lengst mulig. Om freseskjæret blir slitt ned fort, må operatøren ofre ytterligere oppmerksomhet til prosessen for å skifte det utslitte skjæret.

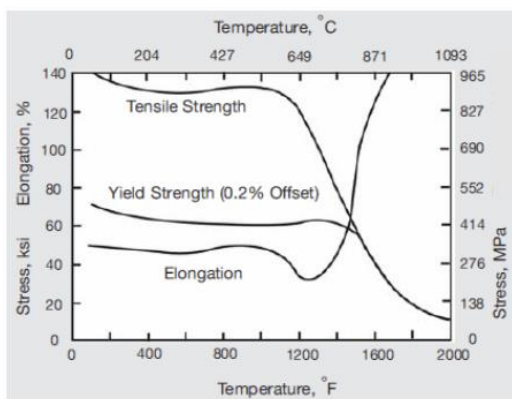
I tillegg til dette risikerer man at roboten avviker fra sin originalt planlagte bane, da KR 500 er oppgitt med en repeteringsnøyaktighet på $\pm 0.08\text{mm}$. Så om roboten blir tatt av sin bane for skiftning av freseskjær vil det være en marginal tilført usikkerhet på resterende bane.

For å forstå litt mer om hva som må til for å kunne frese i *Inconel*, har det blitt gått gjennom flere forskningsrapporter som tar for seg materialet og måter å frese det på [13], [10], [11]. Som [13] påpeker har *Inconel* en lav konduktivitet for varme, så varmen som blir utviklet i freseprosessen blir ledet til

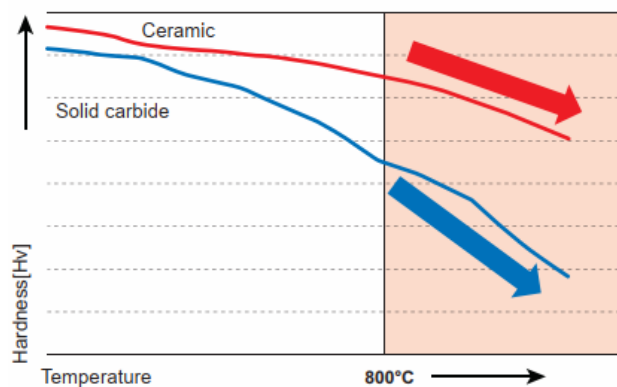


Figur 22 - Keramisk endefres [51].

freseskjæret. Av denne grunn må freseskjæret være av et materiell som virker på samme måte. Forslagene CBN (bornitrid), PCD (polykrystallinsk diamant) og keramiske skjær blir konkludert med som effektive materialer til bruk i maskinering av *Inconel* i [13]. CBN er det hardeste av alle kunstig fremstilte stoffer som finnes, tett opp mot diamant [14], som igjen medfølger en veldig høy pris [11]. PCD er syntetisk fremstilt diamant og har veldig gode termiske egenskaper på lik linje med CBN, men er også en veldig dyr løsning. Det rimeligste freseskjæret av de tre overnevnte er det keramiske. På samme måte som de to andre har den veldig gode termiske egenskaper, men blir fortere brutt ned i en freseprosess enn PCD og CBN. Keramiske freseskjær blir utformet for å skape mest mulig friksjon mot metallet det skal fresas på. Sammen med en høye omdreiningshastigheter, skal dette gi en så høy temperatur at *Inconel* 625 svekkes, som kan ses på Figur 21 ved ca. 649°C.



Figur 21 - Strekkfastheten til *Inconel* 625 ved eleverte temperaturer, fra vedlegg 23 [52].



Figur 20 - Hardheten til en keramisk endefres ved eleverte temperaturer, fra vedlegg 22 [53].

Figur 20 viser hvordan hardheten på en keramisk endefres vil påvirkes av temperaturen. Selve prosessen og hvor glødende fragmentene fra *Inconel* blir, illustreres på Figur 23. Om man sammenligner de to grafene ser man at det keramiske endefreset mister sin hardhet relativt lineært sett opp mot temperatur. *Inconel* 625 har et nærmest eksponentielt fall ved temperaturer over 649°C. Siden det er høy temperatur som skal gjøre *Inconel* medgjørlig i en freseprosess er mest ønskelig å frese topplaget tørt, uten tilført kjølevæske på verktøy eller materiale. På denne måten slipper man unødvendig søl i produksjonslokalet og det faktum at man må pakke inn komponentene langs robotarmen for å oppnå en god nok IP-grad. Som det blir påpekt i [10] viser forskning at om det fresas i *Inconel* med et keramisk skjær, har tilført kjølevæske lite- til ingen effekt.

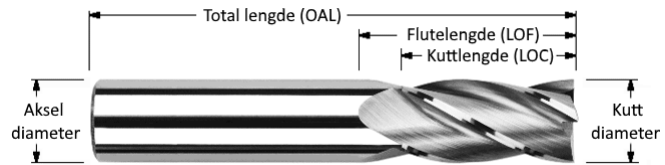


Figur 23 - Glødende fragmentkast fra keramisk endefres [55].

En av de negative sidene ved keramiske freseskjær, er at de sensitive mot slag, så det er ønskelig med en freseprosess som er mest mulig jevn i sin bane langs topplaget på sveisen. Dette understøtter igjen poenget med å tilføre ekstra vekt på roboten for å få til dette.

Oppbyggingen av en endefres beskrives av Figur 24, og det er noen viktige punkter å ta med seg. Har man en lang *kuttelengde*, har man en svakere struktur på selve endefresen. Skal den være mest mulig sterk, må *kuttelengden* være kortest mulig.

Akseldiameteren må også være størst mulig for mest mulig strukturell styrke.



Figur 24 - Forklaring av endefres [15].

Antall *fluter* spiller også en rolle. 'En fres med flere *fluter* har en tykkere kjerne, som gjør den bedre i stand til å stå imot radiale krefter og kan derfor f.eks. ta dypere/lengre kutt i arbeidsstykket' [15].



Figur 25 - Forklaring av kjerne på endrefres.

Leverandør av freseutstyr *SECO*, har på sine nettsider en anbefaling på en spesifikk serie av keramiske endefres med benevnelsen *JCG790-Serien* til å frese i superlegeringer. Denne serien har 5-6 *fluter* og kuttdiameter i spennet 6-25mm. Utregningen på side 28 tar utgangspunkt i to endrefreser fra denne serien.

Tas det utgangspunkt i et rør på 12" og legger det til et topplag med en høyde på 4,0mm og en bredde på 85,0mm rundt hele rørets omkrets gir det følgende metriske målinger:

$$\begin{aligned} \text{Diameter} &= 30,480\text{cm} + 0,800\text{cm} &&= 31,280 \text{ cm diameter} \\ \text{Omkrets} &= \pi \times 31,280\text{cm} &&= 98,269 \text{ cm i omkrets} \end{aligned}$$

Ut fra datablad på endefresene fra *SECO* regner det her ut tiden som vil bli brukt på å slipe ned topplaget på det aktuelle 12" røret. Se vedlegg 20 og 21.

Ved endefres med kuttdiameter på 10,0mm (vedlegg 20):

$$\begin{aligned} \text{Mating/flute i horisontal retning} &= 0,030\text{mm/tann} \\ \text{Radielt inngrep} &= 0,5\text{mm} \\ \text{Mating pr runde horisontal retning} &= 6 \text{ fluter} \times 0,030\text{mm} = 0,180\text{mm pr runde.} \\ \text{Hastighet på spindelmotor} &= 19099 \text{ o/min} \\ \text{Mating/min i horisontalretning} &= 0,180\text{mm} \times 19099 \text{ o/min} \approx 343,8\text{cm/min.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuttdybde på endefres (vertikal retning)} &= 1,330\text{mm.} \\ \text{Tenkt topplag} &= 85\text{mm bredde og 4mm høyde.} \\ \text{Runder for å komme ned til grunnmateriale (vertikalt)} &= 4\text{mm}/1,330\text{mm} \approx 3\text{ggr} \\ \text{Runder for å dekke bredden av sveis} &= 85\text{mm} / 0,5\text{mm} = 170\text{ggr} \\ \text{Distanse fres må gå på et topplag} &= 98,269 \text{ cm} \times 3\text{ggr} \times 170 \text{ ggr} = 50117,19 \text{ cm} \\ \text{Tid brukt på hele røret} &= 50117,19\text{cm} / 343,8\text{cm/min} \approx 2 \text{ timer og 26 min.} \end{aligned}$$

Ved endefres med kuttdiameter på 25,0mm (vedlegg 21):

$$\begin{aligned} \text{Mating/flute i horisontal retning} &= 0,075\text{mm/tann} \\ \text{Radielt inngrep} &= 1,21\text{mm} \\ \text{Mating pr runde horisontal retning} &= 6 \text{ fluter} \times 0,075\text{mm} = 0,450\text{mm pr runde.} \\ \text{Hastighet på spindelmotor} &= 12753 \text{ o/min} \\ \text{Mating/min i horisontalretning} &= 0,450\text{mm} \times 12753 \text{ o/min} \approx 573,9\text{cm/min.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuttdybde på endefres (vertikal retning)} &= 1,330\text{mm.} \\ \text{Tenkt topplag} &= 85\text{mm bredde og 4mm høyde.} \\ \text{Runder for å komme ned til grunnmateriale (vertikalt)} &= 4\text{mm}/1,330\text{mm} \approx 3\text{ggr} \\ \text{Runder for å dekke bredden av sveis} &= 85\text{mm} / 1,21\text{mm} = 70\text{ggr} \\ \text{Distanse fres må gå på et topplag} &= 98,269 \text{ cm} \times 3\text{ggr} \times 70 \text{ ggr} = 20636,49 \text{ cm} \\ \text{Tid brukt på hele røret} &= 20636,49\text{cm} / 573,9\text{cm/min} \approx 36 \text{ min.} \end{aligned}$$

I denne sammenligningen av den samme endefresen, med forskjellig diameter (10- og 25mm), ser man at mating/per *flute* er avgjørende for hvor raskt denne prosessen skal gå. For å kunne øke mating/per *flute* har diameteren på endrefresen blitt økt også, så den har mer styrke. I begge tilfeller har vi benyttet standard innstillinger fra *SECO*, bortsett fra med 10,0mm fresen. Der har vi måtte senke skjærehastigheten fra anbefalte 970m/min til 600m/min for å få ned omdreiningsstallet til et oppnåelig nivå for spindelmotoren (reduseres fra 30876- til 19099 o/min). Det skal påpekes at keramiske endefreser er ikke egnet til å frese nøyaktige kutt, men til grovfresing. Så det må påberegnes å avslutte fresingen ved rundt 0,5mm igjen av topplaget, for så å slipe det ned manuelt.

6.2.4 Sikkerhet

I denne rapporten har vi valgt å se helt bort fra risikoen som oppstår ved kast av metallpartikler fra fresen, og løsninger på dette problemet. Det skal likevel nevnes at det må etableres en form for mekanisk beskyttelse rundt fresen som festes på roboten som fanger opp kastet fra freseskjæret, men det har ikke vært fokuset i denne rapporten. Fokuset er utelukkende på sikkerheten i forbindelse med roboten og dens bevegelser i lokalet.

Skal man arbeide med en robot må sikkerheten stå i høysetet. I denne rapporten har vi tatt utgangspunkt i internasjonale standarder (ISO) og forskrifter når vi ser på sikkerhetskrav, blant annet:

ISO 15066 – Collaborative robots.

ISO 10218-1, *Robots, and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots*

ISO 10218-2, *Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 2: Robot systems and integration*

I tillegg til disse standardene har vi benyttet brukermanual/instrukser fra KUKA (Vedlegg 14).

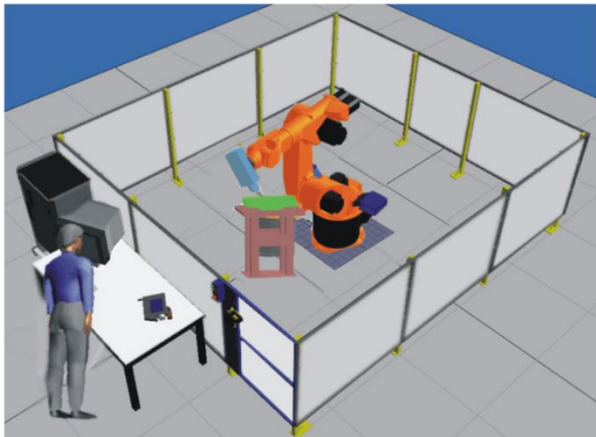
Det generelle sikkerhetskravet for kontrollsystemet til en industrirobot er at det skal være utformet slik at det enten følger *Performance Level (PL)* = d med struktur kategori 3 som beskrevet i ISO 13849-1:2006, eller så skal det følge *Safety Integrity Level (SIL)* 2 med en *hardware feil toleranse (HFT)* på 1 i henhold til IEC 62061:2005. Begge disse sikkerhetsnivåene er samlet under en felles paraply standard som heter IEC 61508. Både PL og SIL skal enkelt forklart angi sannsynligheten for at sikkerhetsfunksjonen faktisk virker når du har behov for den, og sannsynligheten for at en svikt oppstår pr. time ved kontinuerlig drift [16]. HFT angir muligheten en komponent har til å fortsette som tiltenkt i en sikkerhetsfunksjon, til tross for at en feil har oppstått [17]. Det er den komponenten i sikkerhetssystem med lavest SIL nivå, som setter den totale verdien på systemet.

SIL Nivå	Sannsynlighet for svikt ved behov (Sfsvb)	Sannsynlighet for svikt pr time, ved kontinuerlig drift (Sfspt)
SIL 4	$10^{-5} \geq \text{Sfsvb} < 10^{-4}$	$\geq 10^{-9} \text{ Sfspt} < 10^{-8}$
SIL 3	$10^{-4} \geq \text{Sfsvb} < 10^{-3}$	$\geq 10^{-8} \text{ Sfspt} < 10^{-7}$
SIL 2	$10^{-3} \geq \text{Sfsvb} < 10^{-2}$	$\geq 10^{-7} \text{ Sfspt} < 10^{-6}$
SIL 1	$10^{-2} \geq \text{Sfsvb} < 10^{-1}$	$\geq 10^{-6} \text{ Sfspt} < 10^{-5}$

Tabell 2 - Oversikt over SIL nivå [17].

Tabell 2 viser en oversikt over de forskjellige SIL nivåene.

Et punkt vi ønsket å se nærmere på når det gjaldt sikkerhet var muligheten for å unngå bruken av et fysisk gjerde som sperret roboten inne og reduserte arbeidsområdet.

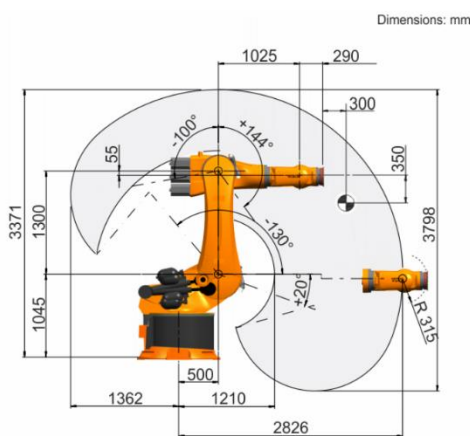


Figur 26 - Sikkerhetsgjerde som omslutter robotens arbeidsområde, hentet fra katalogen til KUKA (vedlegg 14).

KUKA stiller krav til arbeidsområdet til roboten må være fysisk avsperrert når man benytter deres fresepakke (se vedlegg 14). Dette for å hindre at verktøyet (i dette tilfelle, fresen og komponenter som er på den) skal kunne løsne og bli kastet. I tillegg til å være en barriere mot gjenstander som kan bli kastet, vil den fysiske sperringen også hindre personer å komme inn i området som roboten jobber på. Det skal være utlukkende sikkerhetsporter som har integrert alarm- og

nødstopps funksjon, man skal kunne benytte for å komme seg inn på arbeidsområdet til roboten.

Rekkevidden til roboten uten *endeffector* vil bli på $2826 + 290 = 3116\text{mm}$ (se Figur 27). Tar man utgangspunkt i at det benyttes tidligere nevnte ES789 fresemotor fra HSD, blir det i tillegg ekstra



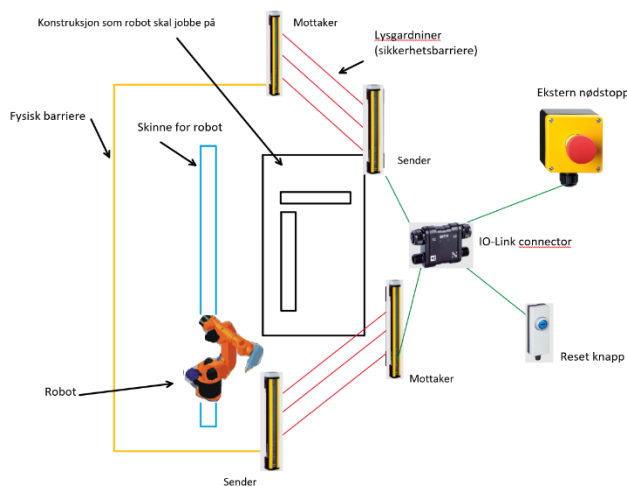
Figur 27 - Rekkevidden til KR 500

225mm på enden av robotarmen (vedlegg 6). Settes denne rekkevidden på armen som radius i en sirkel, vil robotarmen i fri utfoldelse kunne rekke over et areal på $35,1\text{m}^2$ ($A = \pi r^2 = \pi \times (3116\text{mm} + 225\text{mm})^2 \approx 35,1\text{m}^2$) i produksjonslokale.

Skal det etableres et permanent fysisk sikkerhetsgjerde rundt robotens arbeidsområde i tillegg blir det et stort innhugg i arealet i produksjonslokalet, da man skal kunne bevege seg rundt hele området for tilkomst til vedlikehold.

Skal roboten kunne benyttes som ønsket, dvs. å plassere den ved siden av en rørinstallasjon og benytte den til å frese uten disse fysiske barrierene må bruksområdet til roboten defineres til å være et *collaborative workspace* eller et menneske-robot-samarbeidsområde. Da blir kravene til sikkerhet betydelig strengere (ref. ISO 15066), og det kanskje aller viktigste blir å få integrert sensorer for å registrere berøring når roboten faktisk treffer et menneske. Siden Kuka KR 500 R2830 F, som er den roboten det er tatt utgangspunkt i, på ingen måte er konstruert for å kunne gjøre dette, blir denne måten å jobbe med roboten uaktuell. Vi startet derfor se på andre måter å få klart oppdraget uten fysiske sperringer til stede.

For å diskutere mulige løsninger på problemet med sikkerhet og mobilitet kontaktet vi bedriften Welmax i Larvik, som var selskapet som solgte roboten til LMI. Welmax er en bedrift som har sveising som hovedfokus, men bygger og tilpasser det mest av maskiner etter kundens behov, dette



Figur 28 - Illustrasjon av lysgardiner som sikkerhetsbarriere.

inkluderer bruk av roboter. Vår kontaktperson der, kunne informere om at de hadde levert flere spesialtilpassede roboter som benyttet seg av såkalte lysgardiner til sikkerhetsbarriere..

Som illustrert på Figur 28 vil bruk av slike kunne være et alternativ til hvordan roboten kan operere i produksjonslokalene til LMI. Når det kommer til hvilken type lysgardiner som er tenkt brukt har vi vært i dialog med selskapet SICK diskutert et system som heter deTec [18].

Dette systemet vil kunne settes opp med avstander opp til 30 meter for detektering av personer som entrer området. Det kan også programmeres slik at metaller, som for eksempel rør, kan få fri passasje gjennom, men personer vil sette roboten i en pause-modus eller senke hastigheten til et minimum, alt etter hva som er ønsket fra operatør. Ved en slik situasjon vil også spindelmotoren gå til en

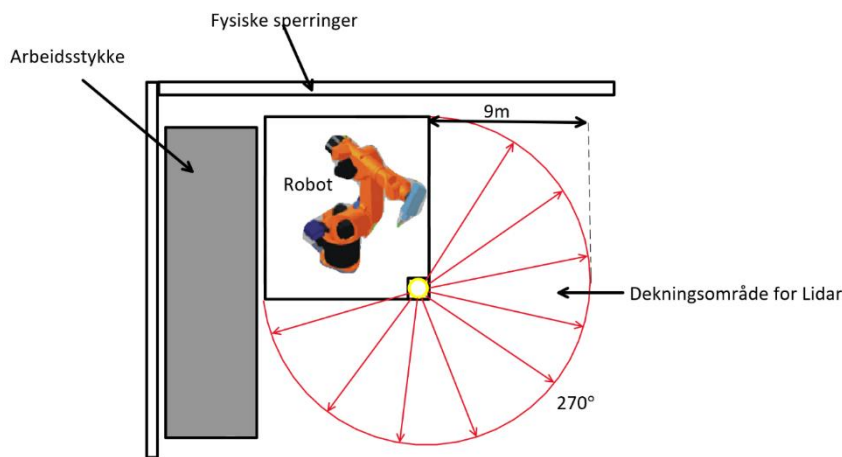


Figur 29 - deTec4 sender og reciever [18].

stoppmodus. Et slikt system oppfyller kravene til sikkerhet i henhold til ISO 10218-2, da det holder SIL3 nivå. Prisen på et slikt sikkerhetssystem er gunstig og det er relativt enkelt å montere opp ved å f.eks. benytte ekspansjonsbolter i gulvet eller festes til eksisterende struktur (se vedlegg 7).

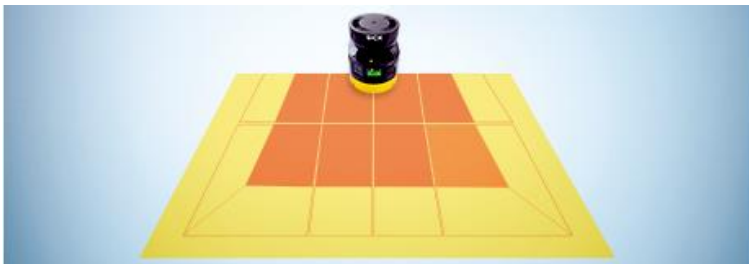
Det negative med deTec4 er at det må påberegnes tid til å kalibrere på nytt for hver gang det flyttes på, som vil medføre tap av arbeidstid. Et annet alternativ, som er ytterligere mer mobilt vil være bruken av *lidar*.

Lidar er en *time of flight* type sensor som har litt samme virkemåte som en radar. Den sender ut lys og måler tiden brukt på å motta det reflekterte lyset. SICK har her en løsning med navn *microScan3* [19] (Vedlegg 9). Disse kan plasseres på basen til roboten og skanner i en vinkel på 270° og en radius på opptil 9 meter (se Figur 30). Området begrenses selvfølgelig av objekter som blokkerer for fri sikt. *microScan3* er utviklet for å kunne stå i produksjonslokaler og vil ikke bli påvirket av røyk, svevepartiklar eller andre lyskilder som f.eks. sollys eller lysarmaturer.



Figur 30- Illustrasjon av *microScan3* på hjørnet av robot base.

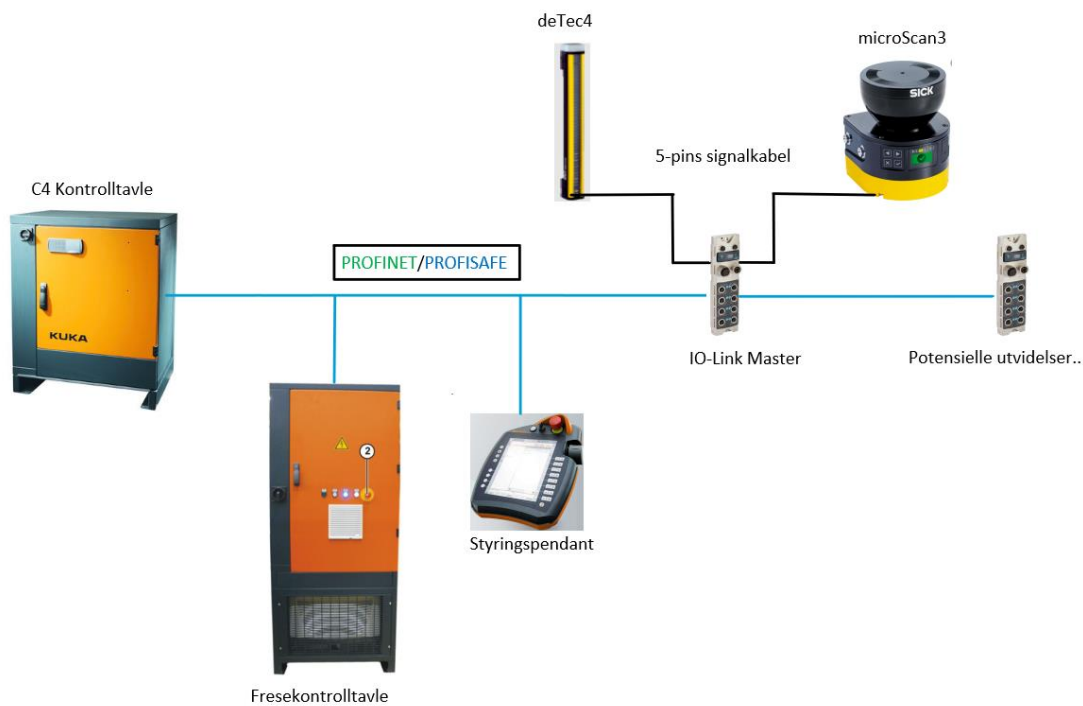
Dekningsområdet til *microScan3* kan også deles opp i ytterligere soner om man ser behov for å måtte kunne bevege seg inn i deler av området som blir dekket, helt opp til 128 individuelle soner, men i vårt innhentede pristilbud fra SICK har vi valgt en løsning som har mulighet for 8 da det vil kunne dekke behovet tilstrekkelig. Kostnaden av et *microScan 3* system er høyere i innkjøp, men sett opp mot hvor enkelt det er å etablere ved en ny lokasjon og starte opp, kan økningen i pris forsvares (se vedlegg 8).



Figur 31 - Et døme på hvordan individuelle soner kan være inndelt [19].

Om det skal velges et av disse to sikkerhetssystemene ser vi at et oppsett med Lidar vil være mest hensiktsmessig for LMI sin del, da mobiliteten vil stå i høysetet. Men for å ha best mulig sikkerhet på arbeidsplassen vil en kombinasjon virke best. Begge løsninger opprettholder et SIL 3 nivå og er med det innenfor kravet fra [20] på SIL 2.

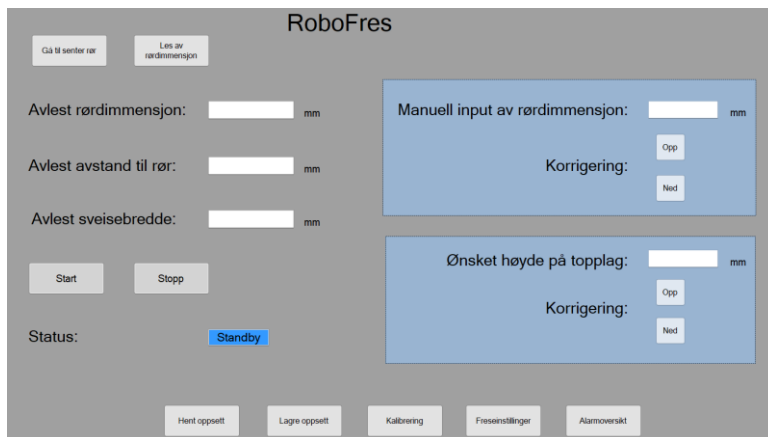
PROFINET er navnet på kommunikasjonsbussen som brukes mellom kontrolltavlen til roboten (C4) og fresetavlen via nettverkskabel. Et eksempel på hvor denne bussen er brukt er mellom styrependanten og roboten. Kommunikasjonen mellom sikkerhetssystemene (microScan3 og/eller deTec4) og C4 vil gå over *PROFISAFE*. *PROFISAFE* er et ekstra programvarelag som går parallelt med den andre kommunikasjonen i *PROFINET*-bussen, og sørger for at all sikkerhetskommunikasjon går som den skal. C4 tavlen leveres med en egen sikkerhets PLS som sikkerhetsutstyret skal kobles til. Ved å benytte *PROFISAFE* opprettholder man et SIL 3 nivå på hele sikkerhetssystemet, da det er godkjent og standardisert i henhold til IEC 61508 [21].



Figur 32 - Tentativ oppkobling via PROFINET [18] [19] [58]

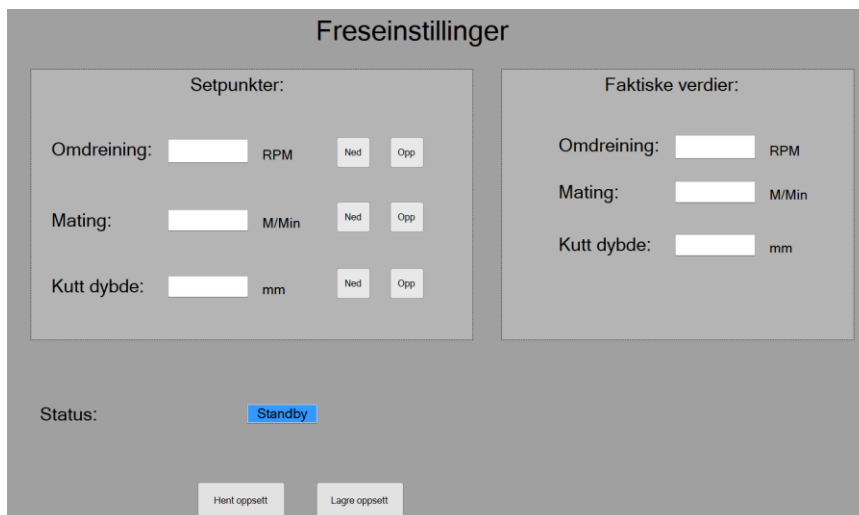
6.2.5 Grensesnitt

For å kunne kontrollere hele prosessen med fresing har det blitt designet et grensesnitt etter feedback fra LMI. Dette er blitt designet for å kunne få ut de mest essensielle målingene som trengs for å kunne starte en freseprosess, som rørdimensjon, sveisebredde og hvor langt ned topplaget skal freses. Det er også mulig å sette inn disse parameterne manuelt og utføre en mindre korrigering på knapper som kan programmeres til en valgfri størrelse pr. trykk som f.eks. $\pm 0,05\text{mm}$.



Figur 33 - Utkast til grensesnitt for styring av robot.

I tillegg til innstillinger for roboten, vil man ha egne innstillinger for fresen som er kommunisert via frekvensomformer over *PROFINET*. Her kan man sette verdier på omdreining, mating og kutt dybde samtidig som man overvåker at det er det som faktisk blir utført av fresen. For å overvåke mating vil posisjoneringen til roboten langs x- og y-aksen benyttes til å lage en algoritme som kalkulerer matingen i meter pr. minutt.



Figur 34 - Utkast til grensesnitt for styringsparameter for fresemotor.

Disse grensesnittene er rent tentative og er ment for å illustrere et første utkast som kan jobbes videre med i samarbeid med LMI.

6.2.6 Mobilitet

Når det gjelder mobiliteten på roboten vil det være en utfordring med tilkomst på røret som skal freses på. Om roboten plasseres på en permanent plass i lokalet vil det være veldig begrenset hvor den har mulighet for å komme til å frese. Rørene som skal freses på må da flyttes nærmest mulig roboten.

KUKA har flere løsninger på dette, men den kanskje mest aktuelle er å benytte en lineær skinne.

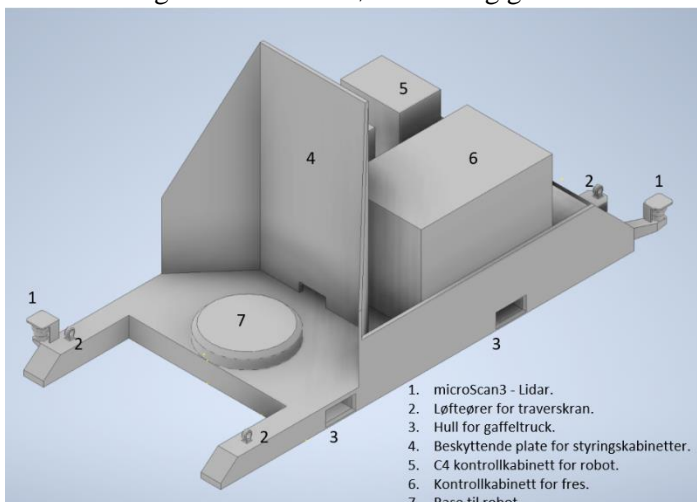


Figur 35 - KL 4000, lineært skinnesystem for quantec roboter [22].

Denne løsningen (Figur 35) har navnet KL 4000, som gjenspeiler den maksimale tyngden på 4000kg som skinnen kan belastes med [22]. Tar man utgangspunkt i KR 500 sin egenvekt på 2385kg (se vedlegg 16), er det rom for å benytte flere mindre roboter på samme skinne, så lenge man holder seg under den maksimale vekten. Skinnen kan monteres i tak om det kan gi bedre tilkomst på installasjoner. På skinnen har roboten mulighet for å bevege seg 8,4m fra senter skinne, til både høyre og venstre (begrenses av kabellengde). Dette gjør det mulig for

roboten å gli fra prosjekt til prosjekt i en produksjonshall, som kan gi gode synergier i form av effektivitet om det skal serieproduseres identiske deler.

En annen løsning for en økt mobilitet vil være å lage en mobil plattform for robot (se Figur 36). I taket på produksjonshallen til LMI er det en traverskran som vil ha mulighet for å løfte denne konstruksjonen rundt til hvor enn det vil være behov for at roboten skal jobbe. Det kan også lages til frakthull for bruk av stor gaffeltruck. På denne plattformen plasseres også styringskabinett til både fresemotor og robot. Dette tilfører vekt og gir bedre stabilitet for roboten, som er viktig for at roboten



Figur 36 - Forslag til hvordan mobil plattform kan se ut.

skal kunne følge sin planlagte bane best mulig. En av de negative sidene med å benytte en slik mobil plattform vil være behovet for å re-kalibrering av sikkerhetssoner for hver gang den blir flyttet på. Det må også tilføres mye vekt på selve plattformen for at robotens bevegelser, med og uten nyttelast, ikke flytter på plattformen fra sin posisjon.

7 Design av prototype og utprøving

Som en del av prosjektet har vi valgt å prøve å lage en nedskalert prototype av hvordan det endelige systemet kan se ut. Formålet med prototypen er å vise oppdragsgiver hvilke muligheter roboten kan ha, samt utføre tester og prøve ut egne ideer for å se hvordan disse vil fungere i praksis.

Gruppen har grunnleggende kunnskaper om programmering og bruk av UR5e, som er en samarbeidsrobot designet for å benyttes i læringsinstitusjoner, men også innenfor lette industrioppgaver [23].



Figur 37 - UR5e robot, uten endeffector [47].

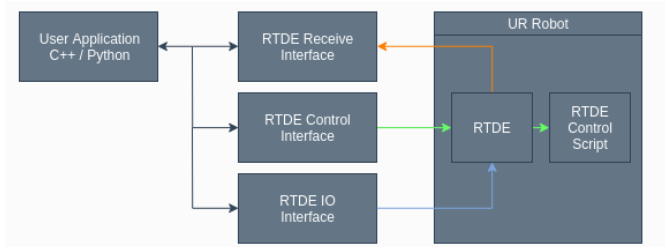
Campus Verftet, som er et samarbeid mellom Høgskulen på Vestlandet (HVL), Fagskolen i Sogn og Fjordane og andre aktører i næringslivet [24], har et laboratorium med nettopp denne roboten (UR5e) tilgjengelig. Assisterende professor ved Campus verftet informerte oss om at det var mange bibliotek tilgjengelig via *Python* for blant annet styring av UR5e og bildegjenkjenning som ville være enklest å bruke sammen med denne type robot. Dette, i tillegg til at den lette tilgjengeligheten på Campus Verftet gjorde at den ble det naturlige valget for oss å bruke i denne oppgaven.

Det ble bestemt at vi derfor skulle lære oss *Python* og bruke det til vår oppgave med å gjenkjenne sveis og å styre roboten.

7.1 Robotstyring

Det vi ønsket å oppnå med robotstyringen, var å bruke bildegjenkjenning med en avstandsmåling til å finne orienteringen til sveis, for å styre roboten rundt sveisen. Ved å kjenne posisjonen til kameraet, avstanden til sveisen og orienteringen til røret i forhold til roboten. Når en sveis er oppdaget skal roboten plassere *endeffector* slik at sveisen er i senter på bildet. Avstandsmålingen gjort av en ultralydsensor (vedlegg 35) skal forhindre at *endeffector* kolliderer med røret og finne sirka posisjonen til sveisen. Ved å bevege *endeffector* til den står vinkelrett på sveisen, deretter brukes *forward kinematics* til å finne posisjonen til *endeffector* kan man finne orienteringen til røret i rommet.

For å kunne kontrollere og planlegge en bane rundt røret, benytter vi *Universal Robots Real Time Data Exchange* (UR-RTDE), som er et kommunikasjonsgrensesnitt som kommuniserer via *TCP/IP* over nettverkskabel opp mot robotens kontrollkabinett. Med UR-RTDE kan vi lese ut fra- og gi en mengde data til roboten som sensor input- og output (IO).



Figur 38 - Kommunikasjon mellom Python og UR-Robot [54].

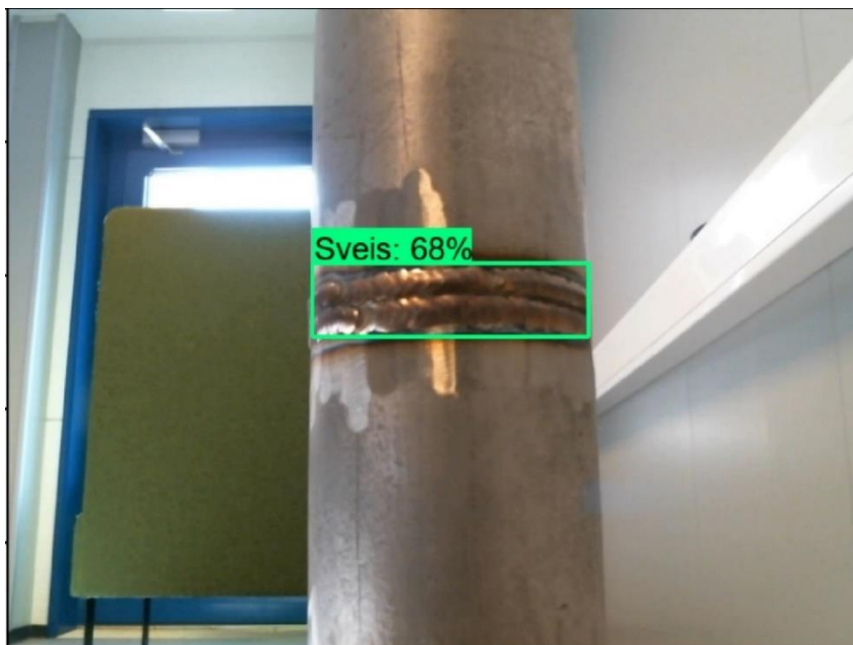
Universal Robots (UR) har med sin UR-RTDE [25] et ferdig programmert eksempel som kan brukes til utgangspunkt i *Python* (vedlegg 1). Dette er for å vise virkemåte og gi en grunnmur som videre programmering kan bygges på. Ved å definere forskjellige variabler i eksempelets XML-fil, kunne disse leses ut, f.eks. hastigheter i hvert ledd og verktøyets posisjonering. Dette eksempelet benyttet vi i starten for å prøve å planlegge en bane rundt et rør, men det var veldig utfordrende med å kommunisere med roboten og å konstruere mer avanserte baner ved bruk av dette biblioteket.

Etter anbefaling fra en av doktorgradsstipendiatene innenfor robotikk ved Høgskolen på Vestlandet (HVL), gikk vi over på en noe enklere versjon av RTDE [26], et annet *Python*-bibliotek, som er mer intuitivt for oss med liten erfaring med *Python*. Etter en del testing og tilpasninger klarte programmet å bevege roboten på samme måte som ved forrige versjon, men også her oppstod problemer. Det kom til stadighet en feilkode om *runtime error*, som vi brukt mye tid på å finne ut av. Til nå hadde *Python* blitt kjørt via et *virtuelt python-miljø*. En av teoriene våre er at det oppstod en forsinkelse mellom det virtuelle *Python* miljøet som RTDE ble kjørt i og robotens styring. Det ble forsøkt å bytte operativsystem til *Linux* for å korte ned denne forsinkelsen, men det løste ikke problemet. Vi forsøkte også å gå vekk fra det virtuelle *python-miljøet*, uten at det hjalp. Som et siste forsøk ble det nedgradert fra RTDE 1.5.1 til 1.4.5, noe som skulle vise seg å virke. På det tidspunktet vi fikk løst problemet var det ikke tid igjen til å fortsette med baneplanleggingen. Koden for de enkle bevegelsene som ble gjort ligger i vedlegg 28.

7.2 Bildegjenkjenning og sensorer:

7.2.1 Bildegjenkjenning for å detektere sveis.

For å gjøre prototypen mest mulig autonom har vi valgt å bruke et 2D webkamera og bildegjenkjenning til å lokalisere hvor det skal freses. Dette kameraet er kombinert med en ultralydsensor, for å kunne estimere størrelsen på objektet som kameraet har oppdaget, samt vite avstanden fra *endeffector* til dette objektet. Kameraet som blir brukt er et Logitech C615 webkamera [27], med en oppløsning på 640x480. Oppløsningen er lav, men er tilstrekkelig til formålet. Videostrømmen fra kameraet blir hentet via USB-A med Python, ved bruk av biblioteket OpenCV [28]. Denne videostrømmen blir deretter prosessert og hvis det blir detektert en sveis, vil en *boundingbox* ramme inn og indikere hvor sveisen er i bildet, samtidig som det vises sannsynligheten for at det faktisk er en sveis som er oppdaget (se Figur 39).



Figur 39 - Bilde av rør hvor det er oppdaget sveis markert med en boundingbox.

7.3 Deteksjon av sveis

For å trene opp en modell til å gjenkjenne bilder brukes *TensorFlow* [29], som er et gratis *open-source* bibliotek for maskinlæring. På nettsiden til TensorFlow beskrives en modell som:

In machine learning, a model is a function with learnable parameters that maps an input to an output. The optimal parameters are obtained by training the model on data. A well-trained model will provide an accurate mapping from the input to the desired output [30].

Tensorflow blir brukt til å trene en ferdiglaget modell hentet fra *Tensorflow Model Zoo* [31], som er en *github* side der flere forskjellige modeller er tilgjengelige for nedlastning.

På denne siden er det også oppgitt hastighet og nøyaktigheten til modellene. Det er mulighet for å lage sine egne modeller i *Tensorflow*, men for å spare tid og komme lengst mulig, brukes en ferdiglaget modell. Modellene som er valgt, er av typen *SSD MobileNET (SMN)* [31] og *EfficientDet (EED)* [31]. Begge disse modellene har flere versjoner med forskjellig gjennomsnittlig presisjon og hastighet. I *Tensorflow Model Zoo* er hastighet og gjennomsnittlig presisjon oppgitt ved siden av alle modellene. De modellene med høyest gjennomsnittlig presisjon ble prioritert først, selv om disse har lengre utf relsestid. Dette kan kompenseres for ved å redusere hastigheten på roboten. Ved trening av de modellene med høyest gjennomsnittlig presisjon blant *SMN* og *EED* modellene ga *Training and Detection.ipynb* scriptet oss feilkoder. Disse feilkodene ble prøvd l st, men på grunn av tidspress endte vi til slutt på to modeller med lave gjennomsnittlig presisjon som ikke ga feilkoder. Modellene som ble trent vellykket heter *EfficientDet D1 640x640* og *SSD MobileNet V2 FPNLite 640x640*, se Figur 40 for en enkel sammenlikning av modellene.



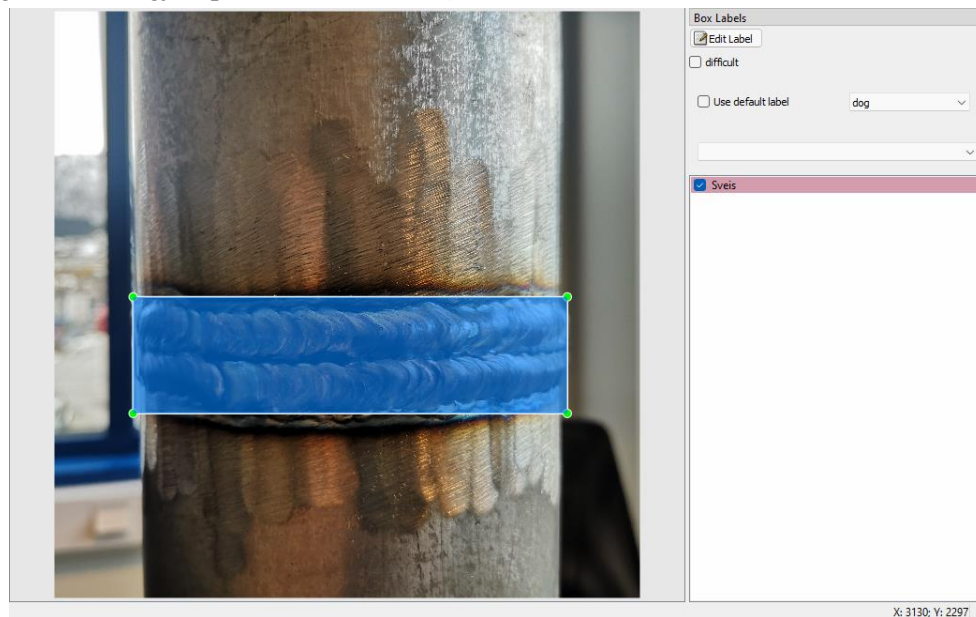
Figur 40 – Eksempel som viser forskjellen på estimert presisjon til *SMN* og *EED*.

Modellene ble trent med de samme bildene og samme antall steg. Et steg er en iterasjon av modellen med et visst antall bilder kalt, *batch*. Modellene ble trent med 40 000 trinn og en *batchstørrelse* på fire. Modellen går da gjennom våre 508 bilder av sveis ≈ 315 ganger. En slik gjennomgang av alle bildene blir kalt *epoch*.

$$epoch = \frac{trinn * batch}{n_{bilder}} = \frac{40\,000 * 4}{508} = 314.96 \approx 315$$

Formel hentet fra *androidkt.com* [32].

For at *TensorFlow* skal kunne trene den utvalgte modellen må det manuelt markeres det som er ønsket at modellen skal kjenne igjen. Denne markeringen er gjort ved å bruke *labellmg*, dette er et bibliotek i *Python*. Koden for henting og markering av bildene heter *1.Image Collection.ipynb* [33], den blir kjørt i *Jupyter Notebook*, som er en *open-source web* applikasjon for å kjøre kode. I *1.Image Collection.ipynb* er *labels* og bildehenting endret, se vedlegg 27. Figur 41 viser hvordan denne markeringen har blitt gjort på sveisen i *labellmg* [61].



Figur 41- Skjermbilde fra *labellmg* ved markering av ønsket objekt, i dette tilfellet er det en sveis før sliping.

Modellene ble trent ved å bruke koden «*Training and Detection*» [34] fra *github*, i denne kode der det gjort små endringer. Hovedsakelig er det endret på *lablemap*, valg av modell og hvor mange *trinn* modellen skal trenes, se vedlegg 30.

7.3.1 Testing av SSD MobilenNET og EfficientDet

Når modellene trenes blir de òg testet underveis med utvalgte bilder av sveis som modellen ikke har sett før. Ved å teste seg selv på disse bildene returneres gjennomsnittlig presisjon til modellen som trenes. Siden det er vanskelig å vite hvor gode modellene er på å gjenkjenne objektene vi ønsker, gjør den returnerte gjennomsnittlige presisjonen det enklere sammenlikne flere modeller raskt. Se vedlegg 10 for evalueringen av *EfficientDet D1 640x640* og *SSD MobileNet V2 FPNLite 640x640*.

For å få en bedre oversikt over hvilken av de to modellene som egner seg best til vårt formål har de blitt testet mot hverandre på distansene 30,50,70 og 90cm. På disse fire lengdene har det òg blitt testet for de forskjellige tilstandene sveisen kan ha. Disse har vi definert som henholdsvis *Sveis*, *SveisSliptLitt* og *SveisSlipt* for å skape et enkelt skille til prototypen. Figur 42 viser hvordan tre forskjellige tilstander til sveisen er oppdaget.

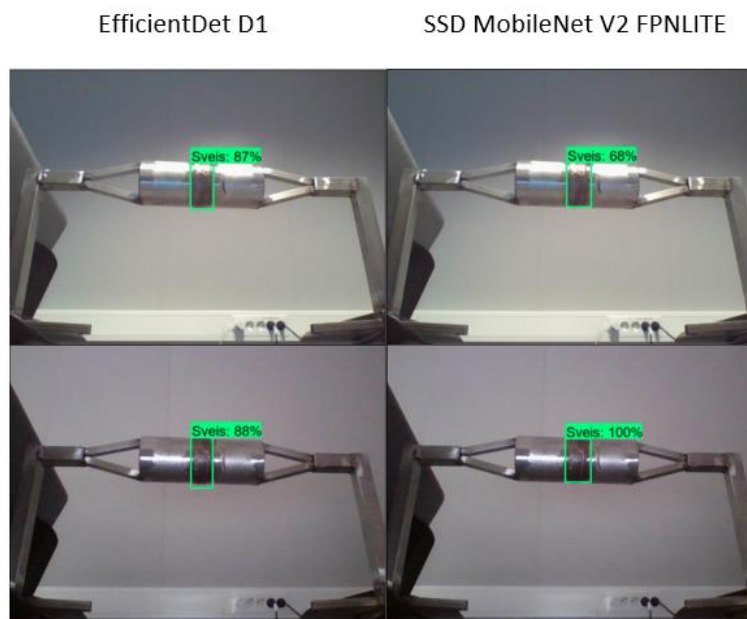


Figur 42- Bilder som viser de tre forskjellige tilstandene sveisen kan ha som er tatt hensyn til.

Under sammenligningen av de to modellene, bruker modellene de samme bildene for å kunne se etter differanser. Dette er gjort ved å bruke koden i vedlegg 29, der kan en bytte modell og legge inn ett bilde av gangen. Det vi ser er at *SMN* og *EED* plasserer *boundingboxene* på samme plass med små variasjoner. Forskjellen på modellene, er at *SMN* har en tilsynelatende høyere treffsikkerhet i detektering av sveis, under visse forutsetninger. Dette kan ses i vedlegg 11.

Siden belysningen kan variere, er modellene testet med like bilder ved redusert og normal inne belysning. Begge modellene er kun trent med bilder tatt i normal inne belysning. Denne testen er gjort for å vurdere om det er nødvendig med tiltak for å sikre tilstrekkelig belysning av sveis, som for eksempel å montere ekstra lys på *endeffector* som peker i samme retning som kameraet.

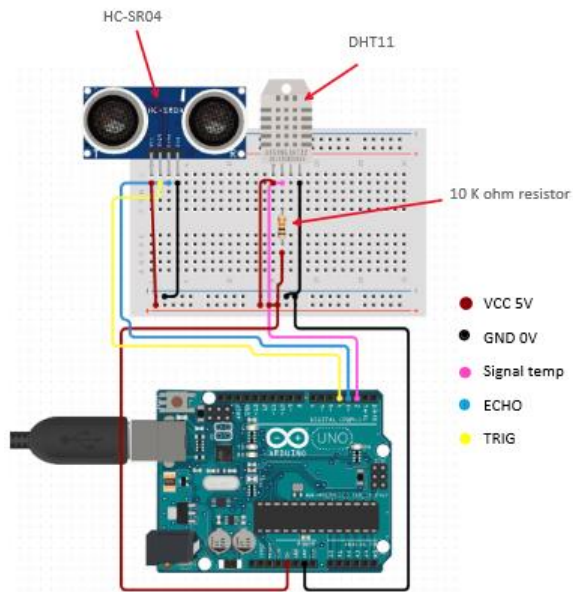
Som en kan se på Figur 43 klarer begge modellene å gjenkjenne sveisen ved redusert belysning, modellene er også sikrere på at det er sveis som er oppdaget. Grunnen til dette er trolig at deler av sveisen i det belyste bildet er overeksponert, som vil si at pikslene der sveisen er helt hvite. Det er stor forskjell i hvordan denne overeksponeringen påvirker de to modellene, SMN sin prosentvise sikkerhet blir betydelig redusert, mens *EED* blir nesten ikke påvirket se Figur 43.



Figur 43 – Test av hvordan SMN og EED blir påvirket ved redusert belysning og delvis overeksponert sveis.

7.3.2 Avstandsmåling til rør

Som en konsekvens av å ha brukt et 2D kamera måtte det etableres en avstandsmåling mellom kameraet og det detekterte objektet, dette for å kunne estimerte størrelsen på objektet. I vårt tilfelle er det å finne dimensjonen til røret og bredden til sveisen. Til å måle avstanden fra kameraet til objektet har vi valgt å bruke en *Arduino* mikrokontroller utstyrt med en ultralydsensor (HC-SR04) og en temperatursensor (DHT11, vedlegg 13), se Figur 44.



Figur 44- Figuren viser hvordan ultralyd og temperatur sensoren er koblet til en *Arduino* [59].

Ultralydsensoren måler avstanden ved å ta tiden lydbølgen bruker fra sensoren til nærmeste hindring og tilbake. Lydens hastighet ved 20°C er 343 m/s (se utregning side 44). Endres temperaturen, endres også tettheten til luft. Dette vil da medføre endring i lydens hastighet (se eksempel på utregning side 44). Derfor brukes målingene fra en temperatursensor til å justere for temperaturendringene, slik at vi får en mer nøyaktig måling. *Arduino* koden ligger i vedlegg 26.

v vil her representere lydens hastighet ved temperatur målt til T_C .

$$v = 331 \frac{m}{s} \sqrt{1 + \frac{T_C}{273^\circ\text{C}}}$$

Formelen er hentet fra *pressbooks.online* [35].

For å demonstrere over en avstand på 0,5 meter tas to vilkårlige temperaturer på henholdsvis 20- og 0°C og lydens hastighet ved disse temperatuorene ($v_{l_{20^\circ}}$ og $v_{l_{0^\circ}}$) og regner ut:

$$T_{c_1} = 20^\circ\text{C}, v_{l_{20^\circ}} = 343 \text{ m/s}, t_1 = \frac{s}{v} = \frac{1 \text{ m}}{343 \text{ m/s}} = 2.915 \times 10^{-3}$$

$$T_{c_2} = 0^\circ\text{C}, v_{l_{0^\circ}} = 331 \text{ m/s}, t_2 = \frac{s}{v} = \frac{1 \text{ m}}{331 \text{ m/s}} = 3.021 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$s_1 = \bar{v}_1 \times t_1 = 343 \text{ m/s} \times 2.915 \times 10^{-3} = 1 \text{ m}$$

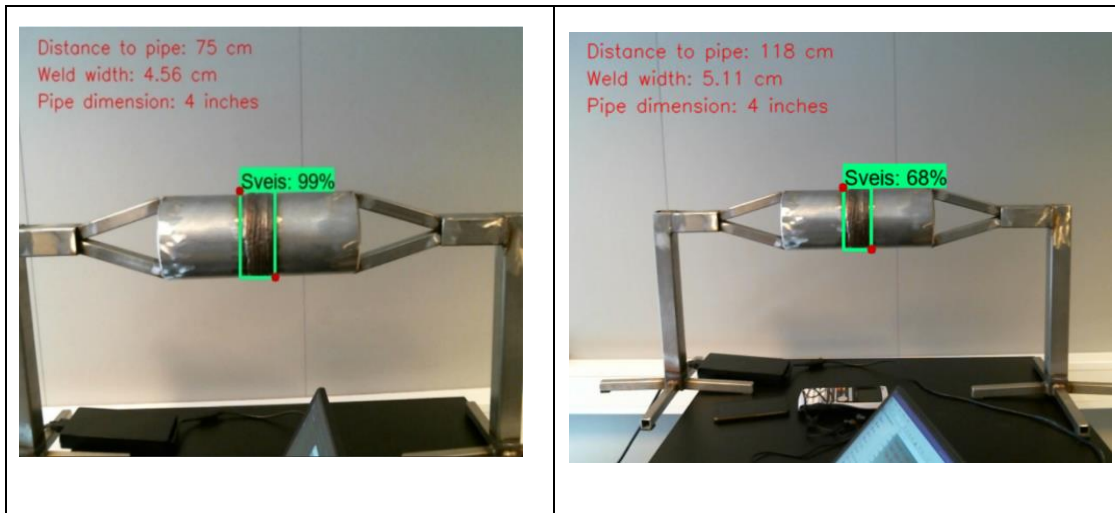
$$s_2 = \bar{v}_1 \times t_2 = 343 \text{ m/s} \times 3.021 \times 10^{-3} = 1.036 \text{ m}$$

$$s_2 - s_1 = 1.036 \text{ m} - 1 \text{ m} = 0.036 \text{ m} = 3.6 \text{ cm}$$

Resultatet viser en unøyaktighet på 3,6cm som vil oppstå om det benyttes en konstant lyd hastighet (for 20°C) i en avstandsmåling på 0,5m hvor det faktisk er 0°C.

7.3.3 Determinere dimensjonen til røret og bredden til sveisen

Ved å vite avstanden fra kameraet til røret, kan vi estimere bredden til sveisen samt rørets dimensjon. Dette gjøres ved å regne ut lengde pr piksel til en gitt lengde. Nøyaktigheten til estimeringen av dimensjonene er begrenset av oppløsningen til kameraet og nøyaktigheten til ultralydsensoren. For å kunne planlegge en bane rundt sveisen er det viktigst at rør-diameteren stemmer. Siden større rør (10-12") på LMI oftest er i hele tommer vil programmet estimere dimensjonen til nærmeste tomme. Dette er testet på to avstander, som sett på Figur 45 er den mer nøyaktig på kortere avstander.



Figur 45 - Deteksjon av sveis, bredde på sveis og rørdimensjon.

Prosessen for å finne sveisen sin bredde samt rørets dimensjon, gjøres ved at det telles antall piksler til en referanse lengde (RL), fra to forskjellige avstander (X_1 og X_2). Deretter regnes lengden per piksel til disse avstandene ut. Så brukes *ettpunktsformelen* til å lage en generell funksjon som finner lengde pr. piksel til en vilkårlig avstand se Figur 46. Se vedlegg 32 for koden.

Avstand fra kamra til sveis: Lengde per piksel(Y) ved lengde X_1 og X_2 :

$X =$ Målt avstand

$X_1 = 40\text{cm}$

$X_2 = 70\text{cm}$

Referanse lengde:

$R_L = 12\text{cm}$

$$Y = \frac{\text{Lengde i cm}}{\text{Antall piksel}}$$

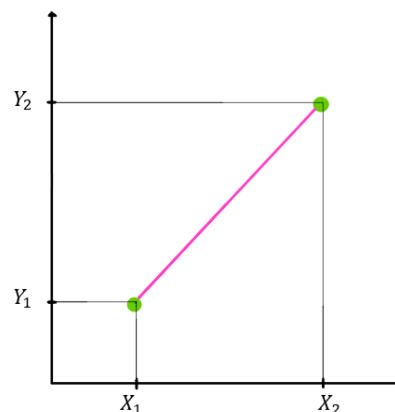
$$Y_1 = \frac{R_L}{163p}$$

$$Y_2 = \frac{R_L}{103p}$$

$$Y = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \times (X - X_1) + Y_2$$

Rør diameter = Antall piksel diameter $\times Y$



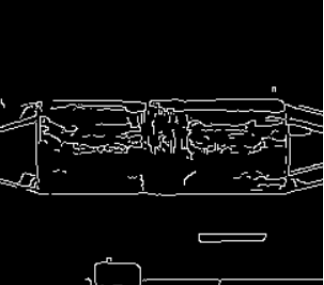
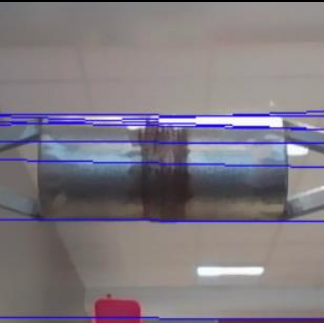
Sveis bredde = Antall piksel sveis bredde $\times Y$



Figur 46 - Utregning av lengde per piksel, etter målt avstand.

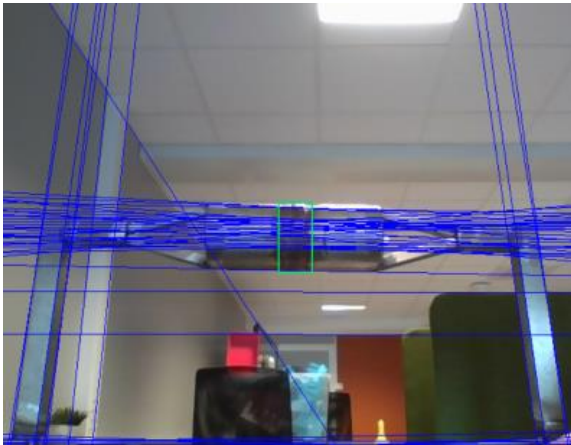
7.3.4 Finne rørets orientering.

For å kunne finne orienteringen til røret i forhold til roboten må vi hente ut mer informasjon fra bildet enn kun hvor i bildet sveisen er og tilstanden til sveisen. Til å løse denne utfordringen har vi valgt å bruke *HoughLines* [36], som er en funksjon i *OpenCV* for å finne linjer i et bilde. For å bruke *HoughLines* må bildet først konverteres til svart-hvitt bilde og deretter bruke *canny* (*egde detection*) [37]. Dette kan sees på Figur 47.

	Bilde klipt ut rundt der <i>boundingbox</i> er plassert.
	Utklipt bilde konverteres til <i>grayscale</i> bilde, dette er for å gjøre bilde lettere å prosessere av <i>egde detection</i> funksjonen i <i>OpenCV</i> .
	Når bildet er i <i>grayscale</i> blir <i>egde detection</i> funksjonen i <i>OpenCV</i> brukt for å finne kantene i bildet, her er det flere parameter kan justere hvor sensitiv funksjonen skal være til kantene i bildet
	Til slutt blir <i>HoughLines</i> (<i>Linjedeteksjon</i>) funksjonen brukt, dette er for å finne linjene i bildet. Her er linjene funnet i bildet som kun inkluderer kanter, men tegnet på det øverste bildet

Figur 47 – Viser de forskjellige stegene blidet går gjennom før *HoughLines* funksjonen blir nyttet.

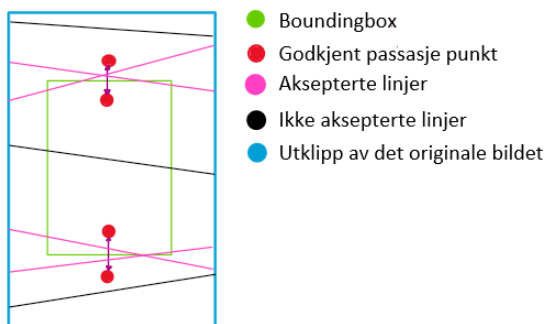
Siden *HoughLines* funksjonen markerer alle linjene i bildet se Figur 49, må det filtreres ut hvilke linjer som skal tas vare på. For å få til dette er det valgt å redusere området det kan tegnes linjer på. Dette gjorde vi ved å klippe ut en del av bildet rundt der *boundingboxen* var plassert (se Figur 48). Det ble senere avdekket at dette ikke ville vært nødvendig på grunn av hvordan resten av linjeutvelgingen fungerer, men vi ser det blir mer nøyaktig ved gjøre det på den måten vi har gjort. Som en kan se på Figur 49 blir det tegnet flere linjer som ikke markerer røret, i tillegg blir ikke den øverste kanten på røret markert like nøyaktig.



Figur 49 – Bilde som viser linjene HoughLines funksjonen finner



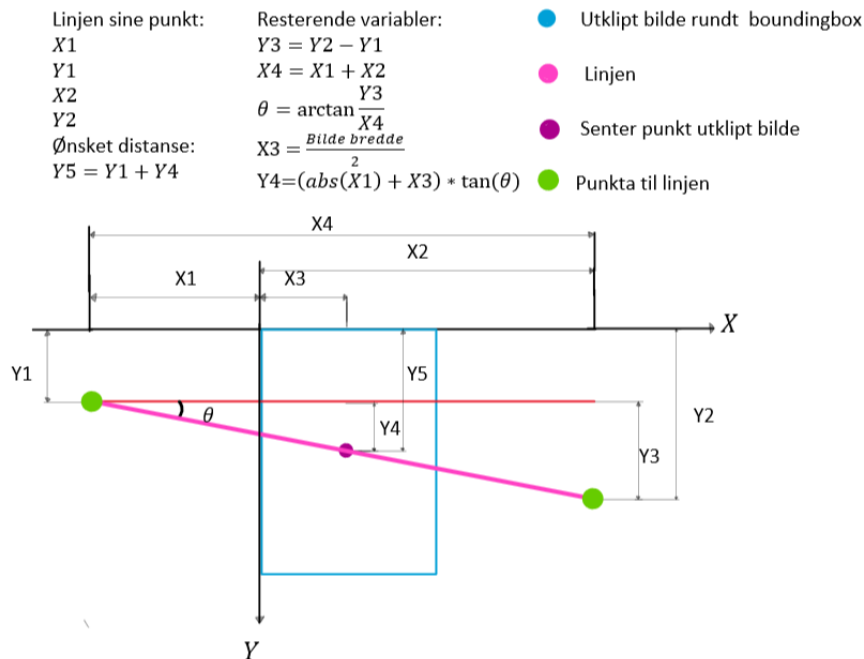
Figur 48 – Bilde klipt ut rundt boundingbox i figur 45, og deretter nyttet HoughLines funksjonen på.



Figur 50 – Viser hvor linjene må plasseres for å bli godkjent

Ser man på det utklippede bildet (Figur 48) er det fortsatt flere linjer i bildet enn kun de som markerer ytterkanter på røret. For å redusere antall linjer ytterligere blir kun linjer som passerer i nærheten av kanten til *boundingboxen* akseptert. Passasjene er markert med røde prikker på Figur 50.

Linjene som *HoughLines* funksjonen har tegnet ved bruk av start og slutt koordinaten til de linjene som er funnet. For å finne ut om linjen passerer mellom de to markerte punktene må vi gjøre et lite regnestykke. Vi bruker koordinatene $(X1, Y1)$, $(X2, Y2)$ og bredden til bildet til å regne ut hvor på Y-aksen linjen er, når den passerer senter, på det utklippede bildet se Figur 51.



Figur 51- Utregningen som programmet gjør for å finne ut hvor på Y-aksen en linje passerer senter på bildet.

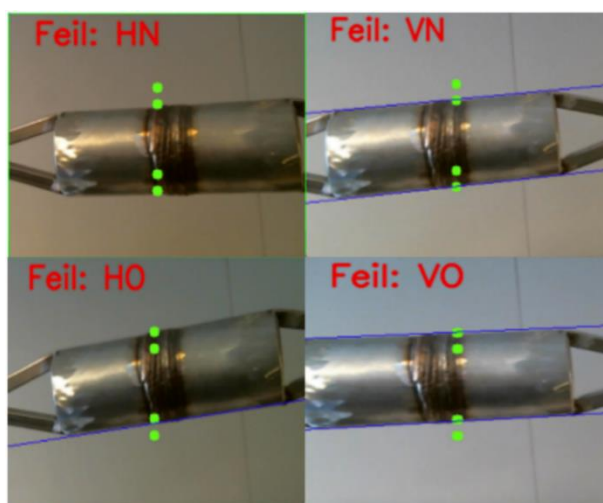
Deretter blir punktene *Godkjent passasjepunkt* i Figur 50 brukt til å bestemme om linjene er godkjente eller ikke. Siden det er ønsket at det kun skal være en linje på hver side av røret må antall linjer reduseres ytterligere. Som sett på

Figur 52 kan det bli tegnet flere linjer tett på samme plass, majoriteten av linjene innenfor de markerte punktene følger røret. Det etableres et skille ved senter på røret som igjen skiller ut linjer over- og under senter. Deretter regnes det ut et gjennomsnitt av *linjer over senter* og *et for linjer under senter*. Resultatet av disse utregningene blir en linje på hver side av senter som vist på Figur 52.

	<p>Her ser vi bildet som viser alle linjer som er funnet i det utklippede bildet. Det er to punktindikatorer på oppsiden av senter rør og to på undersiden av senter rør. Mellom disse punktindikatorene går linjene <i>HoughLines</i> har funnet.</p>
	<p>På dette bildet er det blitt utregnet en gjennomsnittslinje av alle linjene fra forrige bilde. Disse blir nå vist som en enkel linje mellom hver av punktindikatorene. Koden ligger i vedlegg 31.</p>

Figur 52 – Det øverste bildet viser alle linjene *HoughLines* funksjonen finner, bildet under viser gjennomsnitt av de utvalgte linjene. Det er plassert en hvit firkant bak røret for å fremprovosere uønskede linjer.

For at linjegjenkjenningen skal fungere, kan ikke det utklippede bildet klippes utenfor kanten til det originale bildet. Grunnen til dette er at programmet går ut ifra at sveisen er i senter av bildet. For å hindre at dette skjer vil programmet gi beskjed når sveisen er for nærme kanten til bildet, som illustrert på Figur 53. Her gis enkle forklaringer til bruker om det prøves å klippe utenfor det originale bildet. Da vil programmet gi beskjed om hvilken retning kameraet må beveges for at *Line detection* skal fungere, disse retningene vil kunne hentes ut som retninger som roboten kan styre etter. Om det utklippede bildet er for nær en av kantene får man en tilbakemelding basert på bilde koordinater(x,y).



Dette vises visuelt i bildet slik:

VN: Venstre ned

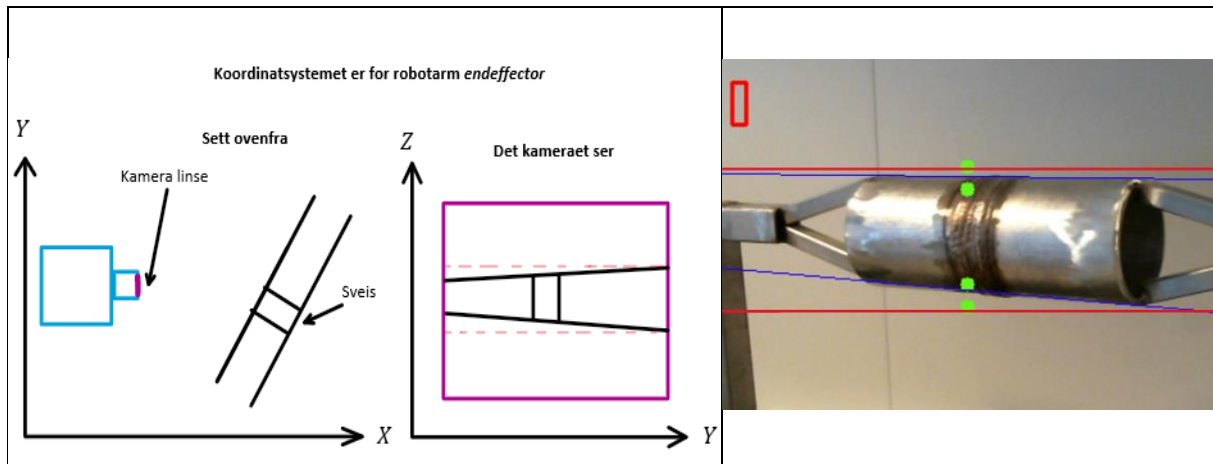
VO: Venstre opp

HN: Høyre ned

HO: Høyre opp

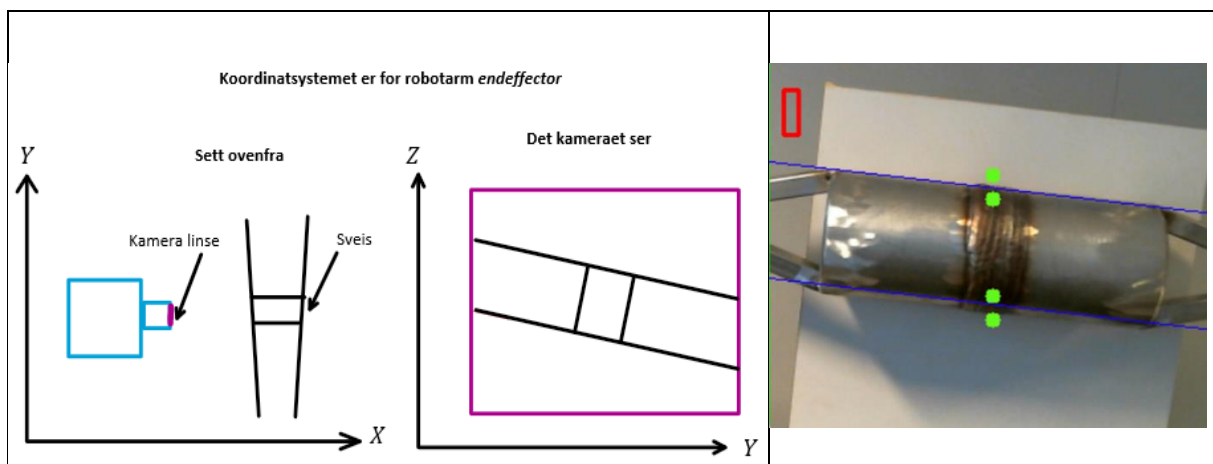
Figur 53 - Kommandoer ved feilposisjonert utklipp, for å vise brukeren hvilke retninger kameraet må flyttes.

Når det sveisen er gjenkjent og det utklippede bildet er innenfor det originale, trenger vi kun rotere om x-aksen og z-aksen til *endeffector* for å få kameraet til å se vinkelrett på røret. Hvis vinklene til de to linjene som er funnet ikke samsvarer med hverandre vil røret være vinklet mot kameraet, se Figur 54. Det er denne vinkelen som skal rettes opp først, det blir gjort ved å rotere rundt z-aksen til begge vinklene er like.



Figur 54 – Hvordan kameraet ser røret når det står rotert på kameraet, de røde linjene er lagt til i etterkant for å enklere se at de to blå linjene (tegnet med HoughLines) har forskjellige vinkler.

Når kameraet står vinkelrett på røret blir det sjekket om røret ligger vannrett i bildet, hvis ikke blir *endeffector* rotert rundt x-aksen til røret er vannrett i bildet. Se Figur 55 for å se hvordan det ser ut før rotasjon rundt x-aksen.



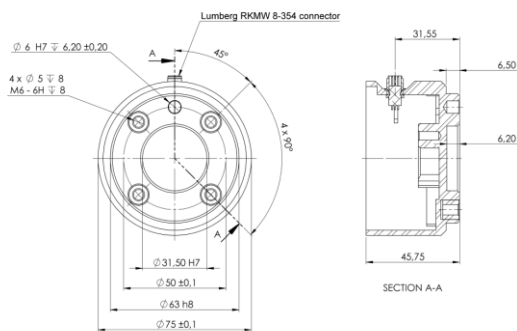
Figur 55 – Hvordan kameraet ser røret når det er på skrått.

7.4 Endeffector:

Da det å frese en sveis med en UR5e blir upraktisk grunnet robotens lokasjon inne på Campus Verftet, vurderte vi andre løsninger for vår prototype. Et alternativ var å frese plastikkør med en liten fresemotor, men partikler fra fresingen var ikke ønskelig inne på Campus. Ved å montere en tusj der fresehodet skulle vært, vil vi demonstrere vårt konsept ved å la denne følge og angi banen fresen ville gjort.

Et delmål i denne oppgaven er å tilegne oss kunnskap om- og prøve ut 3D-printing. Ved tradisjonell maskinering av deler, brukes et stort metallstykke som freses ned til ønsket form. 3D-printing med sin additive virkemåte, der lag for lag legges på, fører til redusert bruk og kast av materiale. Komponenter og deler med avanserte indre strukturer kan printes i en hel del, istedenfor å maskineres som flere små og monteres siden [38].

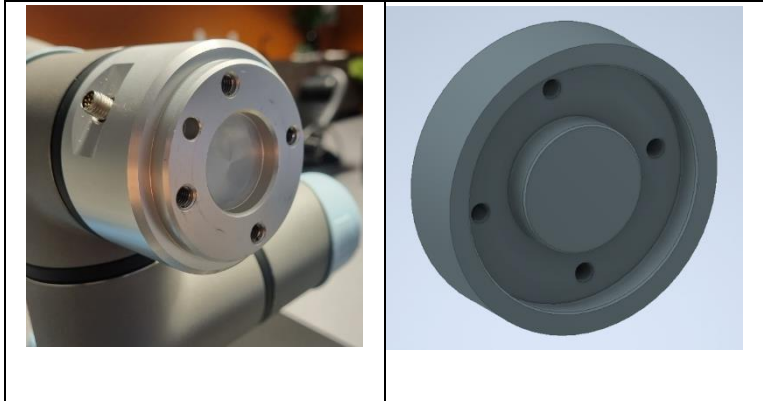
Vi har i våre 3D-tegninger brukt Autodesk *Inventor*. Det er et av mange CAD-programmer laget av Autodesk. Det inneholder en rekke verktøy for å tegne og simulere krefter på mekaniske produkter [70]. For å lære dette begynte vi med grunnleggende tutorials på youtube. Ved å først prøve seg på enkle oppgaver, og så gå gradvis til mer avanserte tegninger, blir man relativt kjapt god nok til å kunne tegne endeffector som trengs til denne oppgaven. Da fresing ikke er aktuelt, har vi ikke tenkt på vekt, vibrasjoner og slitasje som på en mekanisk endeffector som skal ha lang brukstid.



Figur 56 - Målskisse av verktøyflens til UR5e Robotarm [39].

I instruksjonsboken [39] til UR5e robotarmen finnes en målskisse av robotarmens verktøyflens. Ved hjelp av de målene kunne en motpart tegnes og prøveprintes. Figur 56 viser et 2D bilde av flensen med mål og toleranser. Verdiene er oppgitt i mm med toleranser som tallverdi i mm eller en bokstav. I ISO 286-2 [40] ser vi hva disse bokstavene betyr. H (stor bokstav) betyr toleranser på hull og h (liten bokstav) indikerer toleransen på aksling. Ved bruk av tabellene i ISO286-2, ser vi hvor store verdier som skal brukes i 3D-tegningen. For hullet $\text{Ø}31.50 \text{ H}7$, er toleransen $+25/-0 \mu\text{m}$, og for akslingen $\text{Ø}63 \text{ h}8$ er toleransen $+0 / -46 \mu\text{m}$.

Det vil si at hullene er som oppgitt- eller større, og akslingene er som oppgitt eller mindre. Ved å bruke målene som oppgitt og legge til eller trekke fra $0,50\mu\text{m}$ for henholdsvis hull og aksling i 3D-tegningen, skal motparten gå rett på robotarmen uten problemer. Figur 57 viser verktøyflensen på UR5e Robotarmen og motparten.

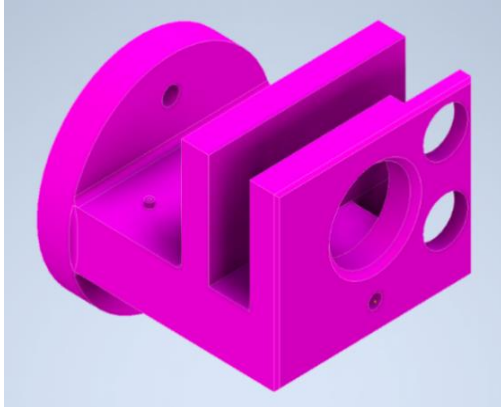


Figur 57 - Verktøyflens UR5e Robotarm og motpart tegnet i Inventor.

Etter design av verktøyflensen som festes mot robotarmen, startet arbeidet med å videreutvikle denne til selve *endeffector*. Vi identifiserte hvilke sensorer vi trengte, hvilke mål disse har og hvordan disse skulle virke sammen.

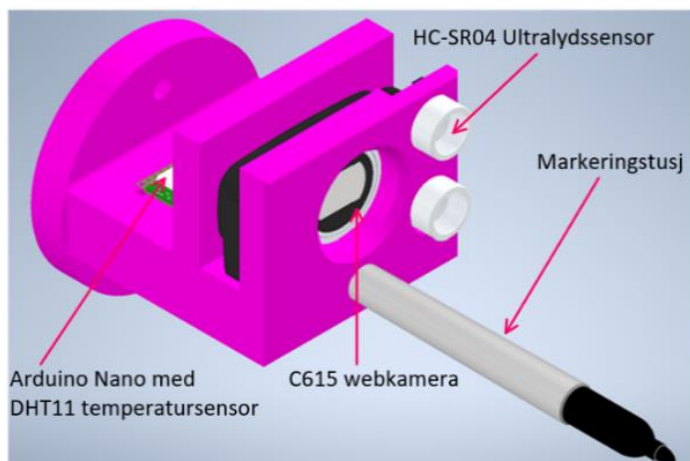
Tusjen skal brukes som TCP (Tool Center point), denne settes dermed i senterpunktet. Kameraet for bildegenkjenning festes så nærme senter som mulig. Ultralydsensoren plasseres på siden av kameralinsen. Det er viktig at kamera og ultralydsensor er sentrert for at nøyaktigheten på avstandsbedømmelsen skal bli best mulig. Et *Arduino-kort* leser ultralyd dataen og mates inn i Python. Dette kortet plasseres på en flate mellom kamera og verktøyflensen. Tegningen er gjort med tanke på en *Arduino Nano*. Dette er for å ha et minst mulig kort og muligheten til å lodde ledninger rett på kortet. Åpningen for kameralinsen og tykkelsen på materialet har innvirkning på kameraets synsfelt. Det ble ikke funnet konkrete data på synsfeltet til kamera i antall grader, så det manglet grunnlag for å gjøre utregninger for å konstruere en passende åpning i *endeffector*. Ved å lage åpningen divergerende, gradvis større åpning ut fra kameraet, vil dette mulige problemet unngås uten at det går ut over styrken på verktøyet. Figur 58 viser 3D tegning av *endeffector*.

For å få en tydelig visualisering og test av 3D-tegningen, kan *assembly* lages i *Inventor*. Der settes forskjellige 3D-modeller av komponenter som skal brukes inn i tegningen av endeffector.. På grabcad.com kunne ferdige tegninger av komponentene hentes, kameraet [41], ultralydsensoren [42], *arduino-kortet* [43] og tusjen [44].



Figur 58 - Ferdig tegning av endeffector i *Inventor*.

Dette gir en meget god mulighet til å se hvordan resultatet kommer til å bli. Figur 59 viser *assembly* av endeffector. Passformen til komponentene vises tydelig og kan tilpasses etter behov. Ved å utføre noen kontrollmål med våre egne komponenter, kunne noen små feil identifiseres. Tegningen av ultralydsensoren passet ikke helt. Dårlig konversjon fra tommer til mm eller omvendt er en sannsynlig årsak.

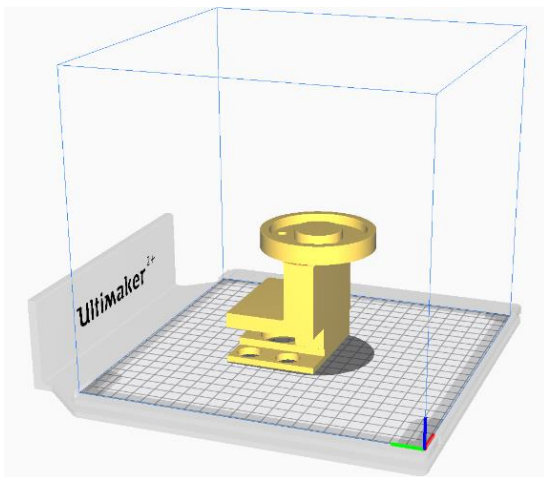


Figur 59 - Assembly med komponenter.

7.5 3D-Printing

Cura er et 3D-printing programvare, også kalt *slicer*. Denne er utviklet av *Ultimaker* som er printeretypen brukt i denne oppgaven. En *slicer* tar en 3D-fil, input fra bruker og gjør dette om til kommandoer printereren deretter utfører. Det viktigste her er tykkelsen på hvert lag, tykkelsen på veggen ved å velge antall solide lag, hastighet på 3D-printeren, om støttestruktur skal være med eller ikke og hvor mye *infill* som skal brukes.

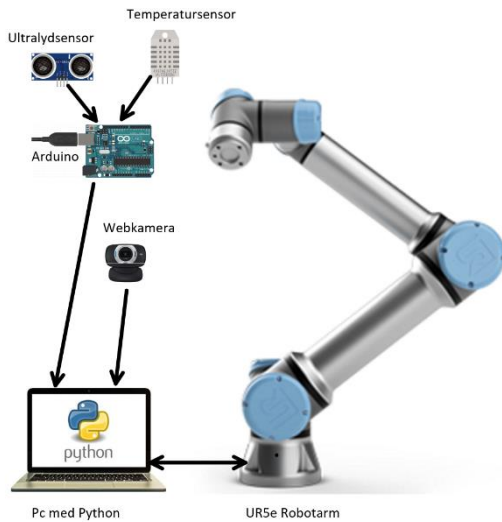
Infill er en struktur med mye luft som bygger opp tomrommene der styrke ikke er avgjørende. Dette fører til redusert printetid og miljøbelastning. I topp, bunn og langs ytterkantene legges solide lag der printedysen legger strenger helt inntil hverandre. Jo flere lag som legges sammen, jo sterkere blir strukturen, men på kostnad av tid. Ved flater som står i løse luften, må egne stabiliserende strukturer bygges for å holde oppe printet frem til denne selv er sterk nok. Her printes en midlertidig støttestruktur som fjernes manuelt etter printingen. Figur 60 viser endeffector i Cura før printing iverksettes.



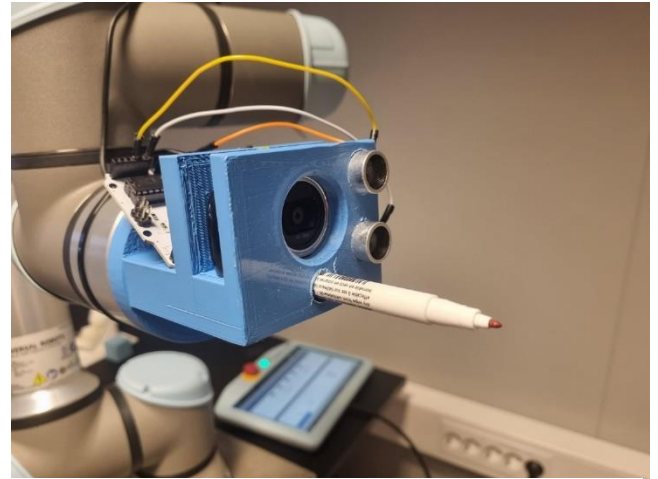
Figur 60 - Forhåndsvisning av ferdig print i Cura.

7.6 Oppkobling

Alle sensorer monteres på *endeffector*. Ultralydsensoren kobles til *arduinoen*, som igjen kobles til en pc med Python scriptet via USB. Webkameraet kobles til samme pc med USB. UR5e robotarmen har en egen koblingsboks. Her finnes en mengde tilkoblinger for input og output, digitale og analoge. Her kobles også Ethernet-kabelen mellom pc og UR5e. Ved å koble slik, vil en pc med et python-script få input fra kamera, ultralydsensor og robotarmen, og bruke dette til å beregne robotarmens baner.



Figur 61 - Oppkobling av prototyp [48] [59] [47] [27] [49]



Figur 62 - Sensorer og tusj montert på 3D-printet verktøyholder festet til robotarm.

Prøvemontering av sensorer til printet verktøy viser at våre målinger og toleranser har vært korrekt. Sensorene sitter stødig uten noen form for festemidler. Det var på forhånd spørsmål om verktøyet ville være i kameraets synsfelt, men dette viste seg å ikke være noe problem. Dette grunnet den divergerende formen på åpningen for kameranlinsen.

8 Diskusjon og konklusjon

8.1 Diskusjon

8.1.1 Kartlegging

En av de største utfordringene med å benytte en robot til å utføre fresingen er tilkomsten roboten vil ha på røret. En typisk Subsea installasjon som blir laget av LMI kan være som vist på Figur 63.



Figur 63 - Subsea installasjon © LMI.

Tas det utgangspunkt i en installasjon av denne størrelsen, vil ikke roboten kunne klare å frese hele omkretsen av røret, da roboten vil kunne treffe andre deler av konstruksjonen, ikke ha nok plass til å få tilkomst på hele røret eller være begrenset av rekkevidde. Forslagene i kapittel 6.2.6 vil kunne hjelpe på mobiliteten, men det vil fremdeles ikke medføre at roboten kommer til overalt. Sett i et HMS-perspektiv vil det hjelpe om roboten klarer å frese ned deler av sveisen, for så å gjøre resten manuelt.

Som det nevnes i rapporten under 6.2.3 er keramiske endefreser, og keramiske freseskjær generelt, beregnet til grovfresing. Fresingen går fort, men gir et grovt resultat som følge av utformingen på *flutene* som skal gi mest mulig friksjon. Grunnet dette, tenker vi at som et utgangspunkt for testing roboten kan frese ned til det gjenstår 0,5mm av topplaget, deretter sliper en operatør resten ned for hånd. Dette gjøres for å unngå risikoen for å komme ned i grunnmaterialet samt oppnå en glatt nok overflate til at det kan utføres ultralydtest på sveisen. Konkluderes det med et godt nok resultat etter dette, vil det være mulig å prøvefrese ytterligere ned. En slik løsning kan kommuniseres til KUKA for testing i deres laboratorium i Tyskland. Så kan LMI ta stilling til om denne løsningen er god nok etter testing.

Det vi anser som det største problemet med å bruke en robot til å frese i harde metaller er slagene og vibrasjonene som oppstår når det fresas. Dess mer *mating/flute* man gjør i metallet, dess mer slag vil det være mot roboten. Hypotesen vår er at bør det benyttes en lav *mating/flute*, særlig i starten for å få opp temperaturen i arbeidsstykket, få så å øke matingen etter hvert når temperaturen har svekket arbeidsstykket. Her er teorien vår at det kan legges til vekt på robotarmens *endeffector* for å stabilisere ytterligere under prosessen, noe som KUKA Tyskland mente var en god idé. Ultralydsensoren vil kunne sørge for at ujevnheter i topplaget blir detektert og justerer høyden på fresen for å forhindre for dype kutt, da disse vil medføre større slag og økt behov for krefter fra fresemotor.

Personsikkerhet i forbindelse med robotens bevegelser mener vi blir godt ivaretatt ved å benytte microScan3 og/eller deTec4, så lenge det blir godt implementert i sikkerhetssystemet til roboten. Selv om det ikke er fokuset i denne oppgaven, kan det ikke ses bort fra risikoen som oppstår ved kast av glødende fresaspon. Finner man ikke en god nok måte å beskytte personell og utstyr på, kan det ikke fresas på denne måten.

8.1.2 Prototype

Tanken med prototypen var å kunne benytte denne for å gjøre testing på hvor mye man kunne nå rundt røret. Vi produserte rør og stativ til disse i Duplex for å benytte til prototypen. Rørene som til prototypen er skalert ned for å tilsvare et 12" rør for KR 60. Etter overgangen til KR 500 blir ikke denne skaleringen relevant lenger. Siden vi ikke lykkes å få tilstrekkelig bevegelse av roboten via *python* som tiltenkt, fikk vi ikke noen endelig konklusjon ut av disse rørene.

Første 3D-print av verktøyflensen viste seg å ikke passe. Selv om vi hadde brukt toleranser oppgitt i målskissen, så vi at unøyaktigheten i selve printeren førte til problemer. Høy printehastighet som ble brukt på første prøveprinting fører til noe redusert nøyaktighet, så ved å øke toleransen litt og redusere hastigheten, ble dette bra på andre forsøk.

Våre erfaringer fra prototypen viser oss at det lar seg gjøre å identifisere dimensjonen på røret, orienteringen på røret i forhold til robot, avstand til røret, sveisen og dens tilstand. Komponentene vi benytter i roboten er på ingen måte sammenlignbare med komponenter som vil bli benyttet i en reell produksjonshall med en industrirobot.

Når det gjelder dimensjon på røret, klarte prototypen å estimere rørets dimensjon til nærmeste tomme. Dette anser vi som godt nok til å identifisere dimensjonen på røret, ved avstander under 1 meter. I alle forsøkene hvor dimensjonen ble identifisert var forholdene gunstige for kameraet, dvs. god belysning og ingen luftforurensing (som kan oppstå i et produksjonslokale). Tar man ytre påvirkninger i betraktning vil det heller være gunstig å gå for et mer industriberegnet kamera til denne type operasjon i en reell situasjon. Da kan man også gå for et kamera med høyere oppløsning, som gjør det enklere for bildegjenkjenningen å gjenkjenne både rør og sveis.

Orienteringen til røret ble funnet ved å benytte *line-detection* fra kameraet og input fra ultralydsensoren. Overflatene på rørene vil være veldig reflekterende og vi ser at disse refleksjonene medfører avvik på linjene som angir kanten på røret. Dette kan man tydelig se på

Figur 52, ved strekene langs kantene. Her mener vi det vil gi en bedre nøyaktighet å benytte en *berøringsprobe*, som ikke lar seg påvirke av refleksjoner. Laser avstandsmåler ble også vurdert, men vi har ingen gode data på hvordan laseren påvirkes av blanke flater.



For å finne avstanden til røret og topplaget ser vi at det kan benyttes en ultralydsensor. Ultralydsensoren gir feedback som kan føre roboten nær nok røret til at *berøringsproben* kan identifisere avstanden mer nøyaktig. Ujevnheter i topplag må ultralydsensoren detektere for å planlegge banen til roboten.

Figur 64 - Eksempel på berøringsprobe [57].

Deteksjon av sveis ser vi at prototypen klarer bra på avstander opptil en meter. Dette til tross for at det er et enkelt webkamera med lav oppløsning. Det skal nevnes at all testing har vært utført under de samme forholdene i et kontorlokale og at bakgrunns forstyrrelser ikke har vært til stede når bildegjenkjenningen har kjent igjen sveisen. Men som tidligere påpekt vil det være en anbefaling å anskaffe et kamera som er beregnet å brukes i industrien.

8.2 Konklusjon

Det er blitt konkludert med at roboten som LMI har anskaffet til å benytte til plasmakutting blir for liten og lett til å benyttes til fresing i metaller, og da særlig *Inconel*. Anbefalingen fra KUKA Tyskland om minimum KR 300 og helst KR 500 står ved lag.

For å ivareta personsikkerheten rundt roboten mens den jobber mener vi at ved å benytte microScan3, kan det etableres et sikkert område rundt der roboten skal jobbe, for å hindre personer å komme for nær prosessen. Disse er svært mobile og kan lett plasseres utenfor noen mobile, fysiske hindre og skape et sikkert område. Kan også kombineres med lysgardiner for ytterligere sikkerhet.

Fresemotoren som blir valgt i denne rapporten vil kunne gi en god nok hastighet til å kunne frese i *Inconel*. Usikkerheten oppstår når det kommer til påkjenninger på lager og pakninger i motoren, samt om det er nok krefter til å kunne frese i *Inconel*. Her har det ikke lyktes oss å komme frem til et godt nok svar fra HSD om dette lar seg gjøre.

Når det gjelder selve freseprosessen kan vi med sikkerhet si at for å kunne frese raskt i *Inconel* er det keramiske fresskjær som er det beste alternativ. Hos alle leverandørene av keramiske endrefreser vi har undersøkt i denne rapporten er det fire- eller seks *fluter* som er tilgjengelig. Konklusjonen i denne rapporten er at seks *fluter* er veien å gå for en mest mulig solid kjerne når man risikerer vibrasjoner.

Da det ikke var anledning til å frese på ekte rør, har prototypens fokus i denne oppgaven vært å vise konseptene med gjenkjenning og styring. Med *Python* er det laget en bildegjenkjenningsfunksjon som finner en sveis og avgjør om denne er uslipt, slipt eller noe midt imellom. Med en ultralydsensor for avstandsbedømming, kan også diameter på røret regnes ut. Unøyaktigheten i sensoren kunne overkommes med å runde svaret til nærmeste tomme, da rørene alltid kommer i hele tommer.

Ved å bruke *edge detection* på rørets ytterkant og se om disse konvergerer eller divergerer, kan rørets vinkling i forhold til kameraet og *endeffector* finnes. Videre kan kommandoer til å nullstille disse avvikene regnes ut og sendes til roboten.

En *endeffector* er designet, 3D-printet og testet. Hovedoppgaven for denne er å holde nødvendige sensorer på plass. Nøyaktighet og riktig plassering av ultralydsensor og kamera i forhold til hverandre har vært viktig for å få en størst mulig nøyaktighet.

Et eksempel på brukergrensesnitt som kan implementeres i et reelt system er tegnet. Her kan systemets anslag til størrelse på rør og sveisens lokasjon leses av, og ved behov korrigeres. En berøringsskjerm som kobles til det endelige systemet sørger for en enkel, trygg og god brukeropplevelse.

Det har blitt satt sammen et grovt budsjett med utelukkende maskinvare for å gi en pekepinn på hva dette kan koste. Fra KUKA Norge har det blitt oversendt et prisforslag på KR 500 og fresepakke på 16kW (vedlegg 18). Programmering, kalibrering og deler som må til for å konstruere selve enheten er ikke oppgitt i dette prisforslaget. I budsjettet som er laget i *vedlegg 34 – Budsjett Robot* har det blitt tatt med både prisen fra KUKA Norge og priser fra SICK på sikkerhetssystemer.

9 Videreføring av prosjektet

9.1 Testfresing

KUKA Tyskland har tilgjengelig laboratorium for testing av fresing på metaller. Det vil være essensielt for en videreføring av prosjektet at man tar kontakt med dem, og forklarer hvilke freseskjær som skal benyttes og hvilke materialer som skal freses på slik at de får utført flere tester for en konklusjon på om det kan gjøres stabilt nok. Siden KUKA allerede benytter ES789 som standard fresemotor på sine 16kW fresepakker, er det nærliggende å tenke at denne vil være tilgjengelig for testing også.

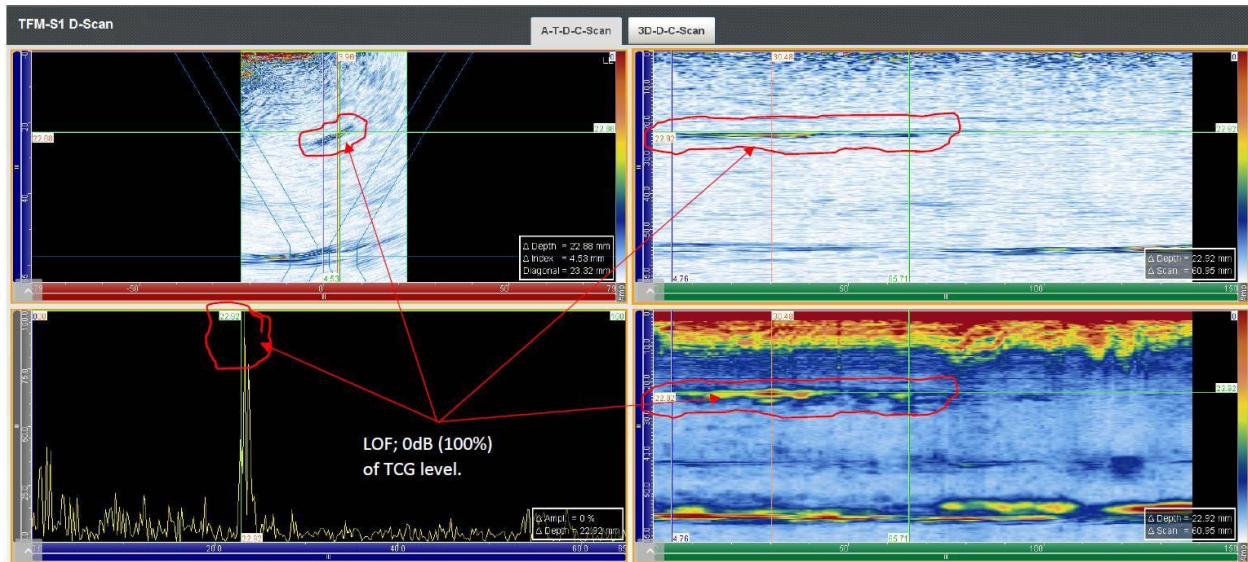
9.2 Etablering av mekanisk beskyttelse

En stor utfordring med å benytte roboten til å frese *Inconel* i et åpent produksjonslokale er fragmentkast fra freseprosessen. Fragmentene som blir kastet ut holder en temperatur i området 700-900 grader når de forlater endefresen og vil utgjøre en stor risiko. Det må etableres mekanisk beskyttelse for kast av metallspån. På Figur 36 har vi etablert et skjold i bakkant av roboten for å beskytte styringstavle, fresetavle og andre komponenter. Men det vil fortsatt være fare ellers rundt roboten når den freser.

Løsninger på dette kan være en form for forheng eller gardin i et brannsikkert material som kan beskytte mot kastet fra fresen, eller det kan monteres en form for oppsamler på selve roboten. Prosedyrer for beskyttelse må uansett være til stede om roboten skal kunne jobbe i en åpen produksjonshall.

9.3 Bruke robot til å utføre ultralydmåling

Formålet med å frese ned topplaget på en rørsveis er primært for å få sveisen jevn med grunnmaterialet slik at det kan tas ultralyd kontroll på sveisen. Denne kontrollen hadde vært veldig gunstig om roboten kunne utført selv ved et verktøybytte, der den kobler på et ultralydhode.



Figur 65 - Ultralyd av rørsveis med avdekket sveis.

På Figur 65 kan man se et bilde LMI har oversendt, som beskriver en feil som er avdekket på en rørsveis. Ved å benytte en algoritme for bildegjenkjenning, bygge seg opp en stor database med bilder som viser feil, kan man lære opp algoritmen til å kjenne igjen feil av denne typen. Så kan roboten markere med en indikator på nøyaktige posisjoner hvor feilen ligger så det blir enklere å få utbedret av operatør.

9.4 Bruke berøringsprobe til å finne rørets orientering

I stedet for å finne orienteringen til røret ved bruk av kamera og *line-detection* kan en se på muligheten til å benytte *berøringsprober* eller laseravstandsmåler. Vi har ingen konkrete data på hvordan laser blir påvirket av blanke overflater så det kan være interessant å teste ut laser på en overflate av blanke materiale som f.eks. *Inconel*.

9.5 Etablering og testing av sikkerhetssystem

Vi har vært i kontakt med driftsingeniør ved Campus Verftet i Førde og fått etablert at de kan bestille inn to stk. *microScan3 lidarer*. Ved å benytte disse og en KUKA Agilus-2 robot som allerede er på campus, vil man kunne kalibrere inn *lidarene* og utføre nødvendig testing av en prototype. Dette gir også en god mulighet for å lære seg oppsett av *PROFISAFE*, som vil være protokollen som sikkerhetssystemene kommuniserer via, for å ivareta SIL3 kravet.

10 Referanser

- [1] Arbeids- og inkluderingsdepartementet, «Lovdata - Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer (forskrift om tiltaks- og grenseverdier),» Arbeids- og inkluderingsdepartementet, 22 12 2011. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2011-12-06-1358>. [Funnet 08 12 2021].
- [2] Store Norske Leksion, «Store Norske Leksion - Austenitt,» Store Norske Leksion, 10 12 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/austenitt>. [Funnet 29 05 2022].
- [3] J. L. Helmer Fjellvåg, «Store Norske Leksikon - Ferromagnetiske materialer.,» Store Norske Leksion, 02 06 2021. [Internett]. Available: https://snl.no/ferromagnetiske_materialer. [Funnet 29 05 2022].
- [4] Luster Mekaniske Industri AS, «LMI - Om LMI,» GASTA, [Internett]. Available: <https://www.lmi-as.no/om-lmi>. [Funnet 02 12 2021].
- [5] Luster Mekaniske Industri AS, «LMI - Referanse installasjoner,» GASTA, [Internett]. Available: <https://www.lmi-as.no/referansar>. [Funnet 08 12 2021].
- [6] A. L. O. S. H. P. A. K. F. m. Tom Myran, «Norsonic - Vibrasjonshåndboka.,» 10 10 2007. [Internett]. Available: https://norsonic.no/files/2018/09/vibrasjonshandbok_1207.pdf. [Funnet 14 02 2022].
- [7] ISO, «<https://www.iso.org> - NDT Testing,» 01 10 2017. [Internett]. Available: <https://www.iso.org/standard/69611.html>. [Funnet 25 01 2022].
- [8] Bosch, «Bosch Professional - GWS 14-125-CI,» [Internett]. Available: <https://www.bosch-professional.com/no/no/products/gws-1400-0601824800>. [Funnet 10 02 2022].
- [9] Arbetsmiljøverket, «Arbetsmiljøverket - Vibrasjonskalkulatoren,» [Internett]. Available: <https://www.av.se/halsa-och-sakerhet/vibrationer/vibrationskalkylatorn/>. [Funnet 12 Januar 2022].
- [10] P. S. C. B. C. R. Gopala Rao Thellaputta, «ScienceDirect,» 28 04 2016. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317304765>. [Funnet 28 02 2022].
- [11] E.O.Ezugwu, «ScienceDirect - Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys.,» 25 03 2005. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000544>. [Funnet 04 03 2022].
- [12] H. L. E. a. D. J. Tillack, «THE INVENTION AND DEFINITION OF ALLOY 625,» 26 04 1991. [Internett]. Available: https://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_1_14.pdf. [Funnet 11 02 2022].
- [13] V. V. N. G.Jangali Satish, «ScienceDirect,» 09 01 2021. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320393068>. [Funnet 02 03 2022].
- [14] B. Pedersen, «Store Norske leksikon,» Store Norske leksion, 08 12 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/bornitrid>. [Funnet 03 03 2022].

- [15] J. Jansen, «TSFBB Engineering,» Jørgen Jansen, 11 08 2018. [Internett]. Available: <http://www.tsfengineering.com/jorgen/tag/Fresing>. [Funnet 20 05 2022].
- [16] DNV - Det norske veritas, «Det Norske Veritas - SIL forklaring,» DNV, [Internett]. Available: <https://www.dnv.com/article/terminology-explained-what-is-safety-integrity-level-sil--207747>. [Funnet 21 02 2022].
- [17] Endress + Hauser, «Endress+ Hauser - Funksjonssikkerhet,» 02 2013. [Internett]. Available: https://portal.endress.com/wa001/dla/5000639/2936/000/01/CP01008Z11EN_0313_SIL-Brochure_X4_.pdf. [Funnet 21 05 2022].
- [18] SICK AG, «SICK - deTec4 - Lysgardiner,» SICK AG, [Internett]. Available: <https://www.sick.com/au/en/safety-light-curtains/safety-light-curtains/detec/c/g461751>. [Funnet 19 03 2022].
- [19] SICK AG, «SICK - microScan3,» SICK AG, 22 02 2022. [Internett]. Available: <https://www.sick.com/no/en/safety-light-curtains/safety-laser-scanners/microscan3/c/g295657>. [Funnet 19 03 2022].
- [20] European committee for standarization, Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2: Robot systems and integration (ISO 10218-2:2011), Standard Norge., 2011.
- [21] M. Bowne, «Profinet.com - Profinet vs Profisafe,» Profinet, 03 12 2020. [Internett]. Available: <https://us.profinet.com/the-difference-between-profinet-and-profisafe/>. [Funnet 04 05 2022].
- [22] KUKA , «KUKA - Linear systems - KL 4000,» KUKA AG, [Internett]. Available: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/linear-units/kl-4000#>. [Funnet 14 05 2022].
- [23] Universal Robots, «universal-robots.com Salgsbeskrivelse,» UR, 2022. [Internett]. Available: <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>. [Funnet 26 04 2022].
- [24] Campus Verftet, «Campus Verftet - Om verftet,» GASTA , [Internett]. Available: <https://www.campusverftet.no/om-verftet>. [Funnet 18 05 2022].
- [25] Universal Robots, «Universal Robots Support RTDE guide,» 26 01 2022. [Internett]. Available: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/real-time-data-exchange-rtde-guide/>. [Funnet 05 02 2022].
- [26] ur_rtde, «https://sdrobotics.gitlab.io/ur_rtde/,» 2022. [Internett]. Available: https://sdrobotics.gitlab.io/ur_rtde/introduction/introduction.html. [Funnet 28 05 2022].
- [27] Logitech, «Logitech - Webcamera,» [Internett]. Available: <https://www.logitech.com/en-us/eol/c615-webcam.960-000733.html>. [Funnet 25 4 2022].
- [28] OpenCV, «OpenCV - Nettside,» OpenCV team, [Internett]. Available: <https://opencv.org/>. [Funnet 12 02 2022].
- [29] TensorFlow, «TensorFlow - Hovedside,» TensorFlow, [Internett]. Available: <https://www.tensorflow.org/>. [Funnet 04 02 2022].
- [30] TensorFlow, «TensorFow - Definisjon av modell,» TensorFlow, [Internett]. Available: https://www.tensorflow.org/js/guide/models_and_layers#:~:text=In%20machine%20learning%2C%20a%20model,In%20TensorFlow.. [Funnet 09 05 2022].

- [31] Github, «Github - TensorFlow Detection Model Zoo,» [Internett]. Available: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md. [Funnet 14 02 2022].
- [32] Knowledge Transfer, «androidkt.com - Utreking epoch,» Knowledge Transfer, 14 12 2019. [Internett]. Available: <https://androidkt.com/batch-size-step-iteration-epoch-neural-network/>. [Funnet 14 04 2022].
- [33] N. Renoette, «Github - Image Collection,» Github, 03 04 2021. [Internett]. Available: <https://github.com/nicknochnack/TFODCourse/blob/main/1.%20Image%20Collection.ipynb>. [Funnet 10 02 2022].
- [34] N. Renotte, «Github - Training and Detection,» Github, 03 04 2021. [Internett]. Available: <https://github.com/nicknochnack/TFODCourse/blob/main/2.%20Training%20and%20Detection.ipynb>. [Funnet 10 02 2022].
- [35] OpenStax, «pressbooks.online.ucf.edu - Formel for lydens hastighet vend tempratur endring,» Pressbooks, [Internett]. Available: https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics/chapter/17-2-speed-of-sound/?fbclid=IwAR3WV0SWH4tINIsEPC_i1R6s_xExNJ2cJh4sT3p4QPq-8YPk6A5OIbx8Vp8#:~:text=The%20equation%20for%20the%20speed%20of%20sound%20in%20air%20v,s%20E2%88%9AT273K. [Funnet 05 05 2022].
- [36] OpenCV, «OpenCV - Houghlines Turtorial,» doxygen, [Internett]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial_hough_lines.html. [Funnet 25 2 2022].
- [37] OpenCV, «OpenCV - Concept of Canny edge detection,» doxygen, [Internett]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html. [Funnet 02 03 2022].
- [38] GE Additive, «ge.com,» General Electric, 2022. [Internett]. Available: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/industries/aviation-aerospace>. [Funnet 27 05 2022].
- [39] Universal Robots, «<https://www.universal-robots.com> Manual,» 02 02 2021. [Internett]. Available: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/68265/99455_UR5e_User_Manual_en_US.pdf. [Funnet 29 01 2022].
- [40] R. L. K. M. S. S. Hartvig hartvigen, «Toleranser,» i *Verksted Håndboka Mekansike fag 3.Utgave*, Tromsø, Yrkesopplæringen ans, 1994, p. 255.
- [41] Rose, «Grabcad.com C615,» 4 11 2013. [Internett]. Available: <https://grabcad.com/library/logitech-hd-webcam-c615-1>. [Funnet 17 04 2022].
- [42] R. Mohamed, «Grabcad.com - HC-SR04,» 30 04 2021. [Internett]. Available: https://grabcad.com/library/ultrasonic-sensor-hc-sr04-4/details?folder_id=10273199. [Funnet 17 04 2022].
- [43] A. Haxhikadrija, «Grabcad.com Arduino Nano,» 21 11 2021. [Internett]. Available: <https://grabcad.com/library/arduino-nano-22>. [Funnet 11 05 2022].
- [44] T. Skinner, «Grabcad.com Sharpie,» 12 07 2021. [Internett]. Available: <https://grabcad.com/library/sharpie-fine-point-2>. [Funnet 17 04 2022].

- [45] Autodesk, Inc, «autodesk.no,» 22 04 2022. [Internett]. Available: <https://www.autodesk.no/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=INVPROSA#what-is-inventor>. [Funnet 22 04 2022].
- [46] «Ultimaker.com,» Ultimaker, 22 04 2022. [Internett]. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>. [Funnet 22 04 2022].
- [47] «Universal Studios - Bilde av robot,» [Internett]. Available: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.universal-robots.com%2Fno%2Fnedlastingssenter%2F&psig=AOvVaw2DRr4gHf3kBwrzXJJu8pe-&ust=1653035226516000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCMCTq52S6_cCFQAAAAAdAAAAABAD. [Funnet 20 05 2022].
- [48] «Coursesforfree - Bilde av laptop,» 2021. [Internett]. Available: <https://www.coursesforfree.net/udemy/download-complete-python-3-programming-bootcamp-beginner-to-advanced-for-free/>. [Funnet 18 05 2022].
- [49] «Elkjøp.no - Bilde av C615Kamera,» [Internett]. Available: <https://www.elkjop.no/product/pc-datautstyr-og-kontor/pc-tilbehor/webkamera/logitech-hd-webkamera-c615/LTC615>. [Funnet 18 05 2022].
- [50] HSD Mechatronics, «HSD USA - ES789 spindelmotor,» [Internett]. Available: https://www.hsdua.com/viewdoc.asp?co_id=367. [Funnet 21 05 2022].
- [51] SECO, «SECO - Keramisk Endefres JCG790100E2R100.0Z6,» [Internett]. Available: https://www.secotools.com/article/p_10010515. [Funnet 20 05 2022].
- [52] Special Metals Corporation, «Specialmetals - Inconel 625 tensile strength.,» 13 08 2013. [Internett]. Available: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. [Funnet 24 05 2022].
- [53] Mitsubishi materials, «MitsubishiCarbide - Ceramic end mills,» 07 2015. [Internett]. Available: http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/1315/3983/5631/ceramic_b228g.pdf. [Funnet 24 05 2022].
- [54] GitHub, «GitHub - Introduction RTDE,» Sphinx, [Internett]. Available: https://sdurobotics.gitlab.io/ur_rtde/index.html. [Funnet 14 04 2022].
- [55] Titans of CNC, «Youtube - Film av fresing i Incoonel med keramisk endrefres.,» 15 04 2020. [Internett]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=9t4ke40fhvk&t=72s>. [Funnet 26 05 2022].
- [56] M. Gadaleta, «Researchgate - KUKA Robot med ledd-oversikt.,» 03 2018. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Example-of-KUKA-6-DoF-anthropomorphic-robot-with-indication-of-the-rotating-axes-KSS_fig3_342276596. [Funnet 03 05 2022].
- [57] Heidenhain, «Heidenhein - Touch probes and vision systems,» Heidenhain, [Internett]. Available: <https://www.heidenhain.com/ja/products/touch-probes-and-vision-systems/workpiece-measurement/ts-150-750>. [Funnet 27 05 2022].
- [58] SICK AG, «SICK.com - IOT 4.0 Profinet,» SICK AG, 19 02 2018. [Internett]. Available: <https://www.sick.com/ca/fr/io-link-industry-40-for-everyone/w/blog-io-link-industry-40-for-everyone/>. [Funnet 29 05 2022].

- [59] Circuito.io, «Circuito.io - Tegning av arduino,» Circuito.io, [Internett]. Available: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021>. [Funnet 20 05 2022].
- [60] Github, «Github - LambelImg,» [Internett]. Available: <https://github.com/tzutalin/labelImg>. [Funnet 10 03 2022].

10.1 Tabelloversikt

Tabell 1 - Vibrasjonskalkulator til det svenske arbeidsmiljøverket med tall oppgitt fra Bosch.....	16
Tabell 2 - Oversikt over SIL nivå [17].	30

10.2 Figuroversikt

Figur 1 - Måleretninger for hånd- og armvibrasjoner [6].	10
Figur 2 - Målepunkter for akselerometer ved måling av svingningsemissjonsverdi [6].	10
Figur 3 - Øverst er en I-fuge, nederst er en V-fuge.	12
Figur 4 - V-formet sveisefuge på rør med Inconel 625 cladding, utdrag fra sveiseprosedyre © LMI.	12
Figur 5 – Fugemaskin som blir brukt av LMI med forklaringer.	13
Figur 6 - NDT, Ultralydtesting på rørsveis.	13
Figur 7 - Forskjell på hvordan lydbølgen beveger seg i ferromagnetisk og austenittisk metall (kilde LMI).	14
Figur 8 - Hvordan ultralydtest blir utført på ferromagnetisk metall (Kilde LMI).	14
Figur 9 - Hvordan ultralydtest blir utført på austenittisk metall (Kilde LMI).	14
Figur 10- Svingningsverdier (vibrasjoner) for Bosch GWS 14-125-CI [8].	15
Figur 11 - Fugemaskin som festes rundt rør.	19
Figur 12 - Tenkt utforming på en prototype for fresing ved å bruke fugemaskin.	20
Figur 13 - Komplette fresepakke fra KUKA, med 8kW fresepakke. Hentet fra vedlegg 14.	21
Figur 14 - Maksimalt tillatte krefter på endeffector for KR 500 R2830 F. Hentet fra vedlegg 5.	22
Figur 15 - Tillatt vekt på endeffector på KUKA KR 500 R2830 F. Hentet fra vedlegg 5.	23
Figur 16 - ES 789 fresemotor [52].	23
Figur 17 - Simulering i KUKA.Load med ES789 + 200kg vekt.	24
Figur 18 - Forklaring av plassering på ledd, på KUKA robot [58].	25
Figur 19 - Kjemisk sammensetning av Inconel 625 (vedlegg 2) ©LMI.	26
Figur 20 - Hardheten til en keramisk endefres ved eleverte temperaturer, fra vedlegg 24 [55].	27
Figur 21 - Strekkfastheten til Inconel 625 ved eleverte temperaturer, fra vedlegg 23 [54].	27
Figur 22 - Keramisk endefres [53].	27
Figur 23 - Glødende fragmentkast fra keramisk endefres [57].	27
Figur 24 - Forklaring av endefres [15].	28
Figur 25 - Forklaring av kjerne på endefres.	28
Figur 26 - Sikkerhetsgjerde som omslutter robotens arbeidsområde, hentet fra katalogen til KUKA (vedlegg 14).	31
Figur 27 - Rekkevidden til KR 500.	31
Figur 28 - Illustrasjon av lysgardiner som sikkerhetsbarriere.	32
Figur 29 - deTec4 sender og receiver [18].	32
Figur 30- Illustrasjon av microScan3 på hjørnet av robot base.	33
Figur 31 - Et døme på hvordan individuelle soner kan være inndelt [19].	33

Figur 32 - Tentativ oppkobling via PROFINET [18] [19] [60].....	34
Figur 33 - Utkast til grensesnitt for styring av robot.	35
Figur 34 - Utkast til grensesnitt for styringsparameter for fresemotor.....	35
Figur 35 - KL 4000, lineært skinnesystem for quantec roboter [22].	36
Figur 36 - Forslag til hvordan mobil plattform kan se ut.	36
Figur 37 - UR5e robot, uten endeffector [48].....	37
Figur 38 - Kommunikasjon mellom Python og UR-Robot [56].....	38
Figur 39 - Bilde av rør hvor det er oppdaget sveis markert med en boundingbox.	39
Figur 40 – Eksempel som viser forskjellen på estimert presisjon til SMN og EED.	40
Figur 41- Skjerm bilde fra labelImg ved markering av ønsket objekt, i dette tilfellet er det en sveis før sliping.	41
Figur 42- Bilder som viser de tre forskjellige tilstandene sveisen kan ha som er tatt hensyn til.	42
Figur 43 – Test av hvordan SMN og EED blir påvirket ved redusert belysning og delvis overeksponert sveis.....	43
Figur 44- Figuren viser hvordan ultralyd og temperatur sensoren er koblet til en Arduino [51].	44
Figur 45 - Deteksjon av sveis, bredde på sveis og rørdimensjon.	46
Figur 46 - Utrekning av lengde per piksel, etter målt avstand.	46
Figur 47 – Viser de forskjellige stegene blidet går gjennom før HoughLines funksjonen blir nyttet. ..	47
Figur 48 – Bilde klipt ut rundt boundingbox i figur 45, og deretter nyttet HoughLines funksjonen på.48	
Figur 49 – Bilde som viser linjene HoughLines funksjonen finner 48	
Figur 50 – Viser hvor linjene må plasseres for å bli godkjent..... 48	
Figur 51- Utrekningen som programmet gjør for å finne ut hvor på Y akse en linje passerer senter på bildet..... 49	
Figur 52 – Det øverste bildet viser alle linjene HoughLines funksjonen finner, bildet under viser gjennomsnitt av de utvalgte linjene. Det er plassert en hvit firkant bak røret for å fremprovosere uønskede linjer. 50	
Figur 53 - Kommandoer ved feilposisjonert utklipp, for å vise brukeren hvilke retninger kameraet må flyttes..... 50	
Figur 54 – Hvordan kameraet ser røret når det står rotert på kameraet, de røde linjene er lagt til i etterkant for å enklere se at de blå linjene (tegnet med HoughLines) går mot hverandre. 51	
Figur 55 – Hvordan kameraet ser røret når det er på skrått..... 51	
Figur 56 - Målsskisse av verktøyflens til UR5e Robotarm [40]. 52	
Figur 57 - Verktøyflens UR5e Robotarm og motpart tegnet i Inventor. 53	
Figur 58 - Ferdig tegning av endeffector i Inventor. 54	
Figur 59 - Assembly med komponenter. 54	
Figur 60 - Forhåndsvisning av ferdig print i Cura..... 55	

Figur 61 - Oppkobling av prototyp [49] [51] [48] [28] [50]	56
Figur 62 - Sensorer og tusj montert på 3D-printet verktøyholder festet til robotarm.....	56
Figur 63 - Subsea installasjon © LMI.	57
Figur 64 - Eksempel på berøringsprobe [59].....	59
Figur 65 - Ultralyd av rørsveis med avdekket sveis.	62

11 Akronym

LMI	Luster Mekaniske Industri AS
FVAF	Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer
SIL	Safety Integrity Level
LIDAR	Light Detection and Ranging
UR	Universal Robots
UR-RTDE	Universal Robots Real Time Data Exchange
KR 300	KR 300 2830 F
KR 500	KR 500 2830 F
SMN	SSD MobileNET
EED	EfficientDet

12 Vedlegg

- Vedlegg 1 - Universal Robots Real Time Data Exchange Eksempel
- Vedlegg 2 - Kjemisk sammensetning av Inconel 625
- Vedlegg 3 – Vibrasjonshåndboka
- Vedlegg 4 - Vibrasjonskalkulatoren fra arbeidstilsynet
- Vedlegg 5 - KR 500 Fortec-serien spesifikasjoner
- Vedlegg 6 - Fresemotor ES789 spec
- Vedlegg 7 - DeTec lysgardiner pris
- Vedlegg 8 - Lidar pris
- Vedlegg 9 - Datablad microScan3
- Vedlegg 10 - Evaluering av SSD MobileNet V2 FPNLITE og EfficientDet D1
- Vedlegg 11 - Sammenlikning av EfficientDet D1 og SSD MobileNet V2 FPNLITE
- Vedlegg 12 - Datablad deTec lysgardin
- Vedlegg 13 - Temperatursensor DHT-11
- Vedlegg 14 - Fresepakker fra KUKA
- Vedlegg 15 - Datablad KR 300
- Vedlegg 16 - Datablad KR 500 R2830 F
- Vedlegg 17 - Datablad Bosch GWS 14-125-CI
- Vedlegg 18 - Grovt prisestimat KR 500 med 16kW spindelsystem.
- Vedlegg 19 - HSD freser for integrasjon med Kuka.
- Vedlegg 20 - Keramisk Endefres fra SECO 10mm
- Vedlegg 21 - Keramisk Endefres fra SECO 25mm
- Vedlegg 22 - Mitsubishi keramisk endefres.
- Vedlegg 23 - Termiske egenskaper INCONEL 625
- Vedlegg 24 - Kort forklaring fuge og krav
- Vedlegg 25 - Mailutveksling med HSD vedr ES789
- Vedlegg 26 – Arduino Avstand Temp
- Vedlegg 27 - Collect And Labeling
- Vedlegg 28 – Robotstyring
- Vedlegg 29 -Single Object Detection
- Vedlegg 30 -Training And Detection
- Vedlegg 31 -Video Line Detection
- Vedlegg 32 -Video Pipe Dimension

Vedlegg 33 - Datablad KR 60 HA

Vedlegg 34 – Budsjett Robot

Vedlegg 35 - Ultralydsensor HC-SR04

13 Benyttet programvare

Visual Studio 2022	Brukt til å designe et grensesnitt for styring av robot og fres har vi benyttet Visual Studio 2022. Gjennom lisens som er tilgjengelig for studenter ved høyskolen kan dette programmet benyttes gratis. Programmet har vi fått omfattende opplæring igjennom studiet og ville med det kunne relativt raskt kunne klare å sette sammen et grensesnitt som har de funksjonene som kreves.
Python	Python er et objektorientert programmeringsspråk som vi bestemte oss for å lære og benytte da det finnes et hav av bibliotek til det som vi så som nyttige for prosjektet. Særlig <i>TensorFlow</i> hadde mange gode bibliotek til bruk i Python.
Autodesk Inventor	<i>Autodesk Inventor</i> er et av mange CAD-programmer laget av Autodesk. Det inneholder en rekke verktøy for å tegne og simulere krefter på mekaniske produkter [45].
Microsoft Word	Til å skrive selve rapporten har gruppen benyttet Microsoft Word som tekstbehandlingsprogram. Dette er et velkjent program for alle i gruppen og det lar oss enkelt samarbeide i et felles dokument. Det falt seg som et naturlig valg for alle i gruppen.
Microsoft Excel	Excel har vi benyttet til å lage gant-diagram samt til å utforme budsjetter. På samme måte som med Word, har alle i gruppen inngående kunnskaper om dette programmet og ved å benytte excel slapp vi å benytte tid på opplæring i nye programmer.
Microsoft PowerPoint	Brukt til blant annet å lage midtveispresentasjonen og vil bli brukt til å lage sluttpresentasjonen.
Cura	Cura er verdens mest populære programvare for 3D-printing. Den lar deg ta tegninger fra mer avanserte CAD-programmer, og med få trykk lage en enkel print, eller mer avanserte innstillinger for et mer avansert produkt [46].
TensorFlow	Åpen kildekode programvarebibliotek som primært blir brukt til maskinlæring. Vi har i dette prosjektet benyttet det til bildegjenkjenning.
Jupyter Notebook	Er en <i>open-source web</i> applikasjon for å kjøre kode.
KUKA.Load	Program som benyttes til å simulere vekt på <i>endeffector</i> og om dette