Masteroppgave

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Sindre Åberg Mokkelbost

Robotisert sveising av større konstruksjoner i aluminium

Masteroppgave i Undervannsteknologi
Veileder: Prof. Olav Egeland
Juni 2019

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Sindre Åberg Mokkelbost

Robotisert sveising av større konstruksjoner i aluminium

Masteroppgave i Undervannsteknologi
Veileder: Prof. Olav Egeland
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne masterrapporten er skrevet som en del av min utdanning ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven er gjennomført siste semester på studiet undervannsteknologi der oppgaven skrives rundt samme tema som min prosjektoppgave som omhandlet robotisert sveising av ulike geometrier for båtskrog.

Med min bakgrunn fra automatisering var det naturlig for meg å ønske en oppgave innen automatisering og robotikk. Oppgaven har gjort at jeg har kunnet dra nytte av min bakgrunn, men utfordrende mekaniske aspekter ved oppgaven har også gjort at jeg har måttet utvide min kunnskap på nye temaer.

Det har vært et utfordrende og spennende prosjekt. Mens mye tid har blitt brukt til å finne retningen på prosjektet og identifisere de faktiske problemstillingene i dette prosjektet, har jeg også fått et godt grunnlag for å gå ut i arbeidslivet.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Olav Egeland for gode råd og veiledning underveis i prosjektet og for at han gav meg muligheten til å skrive master og prosjektoppgave innenfor et tema som virkelig interesserer meg.

Jeg vil også takke Leirvik AS og spesielt Morten Bjelland for at jeg har fått følge prosjektet deres og at jeg har fått være med på testingen deres i Finspång. Dette har vært et viktig grunnlag for oppgaven min da det viste seg at aluminiumssveising ikke lot seg gjøre i robotlaben på NTNU. Det har også vært svært lærerikt. Jeg vil også takke alle andre fra Leirvik AS som har

Sindre Åberg Mokkelbost

Sindre Åberg Mokkelbost
Trondheim, 10. juni 2019

Innhold

Figurer **v**

Tabeller **vi**

Sammendrag **vii**

Summary **viii**

Forkortelser og ordforklaring **ix**

1 Introduksjon **1**

1.1 Bakgrunn 1

1.2 Problembeskrivelse 2

1.3 Eksisterende litteratur 3

2 Teori **5**

2.1 Sveising 5

2.1.1 Sveiseforbindelser 7

2.2 Sveising av aluminium 8

2.2.1 Spenning og strøm 8

2.2.2 Matetråd 9

2.2.3 Beskyttelsesgass 9

2.2.4 Urenheter og oksidasjonssjikt 10

2.2.5 Termisk ledningsevne og termisk ekspansjon 11

2.2.6 Sensitivitet for prosessvariabler 11

2.2.7 Innbrenning 12

2.3 Robotisert sveising 13

2.3.1 Sensorer 13

3 Hoveddel **17**

3.1 Offline programmering og simulering i digital tvilling 17

3.2 Kalibrering arbeidsstykke-robot 18

3.2.1 Deteksjon med sensor 19

3.3 Visual Components 19
3.3.1 Simulering i Visual Components 20
3.3.2 Offline programmering i Visual Components med Post Processor 23
3.4 Dassault Systèmes DELMIA 3DEXPERIENCE 24
3.4.1 Simulering og programmering i DELMIA 3DEXPERIENCE . 24
3.4.2 Modulen Robot Programming 27
3.5 Testing 29
3.5.1 Mål med testingen 29
3.5.2 Oppsett 29
3.5.3 Teststykke 31
3.5.4 Start- og stoppblokker 33
3.5.5 Testresultat 36

4 Diskusjon **41**
4.1 Simulering 41
4.2 Offline programmering 41
4.3 Design 42

5 Resultat **43**
5.1 Fremtidig arbeid 45

Referanser **47**

A Oppsett testing **49**

B Bilder testing **52**

C Spesifikasjoner IRB2600 **62**

Figurer

2.1 Skjematisk illustrasjon av MIG og TIG sveiseprosess 6
2.2 Ulike sveiseforbindelser 7
2.3 Innbrenning 12
3.1 Utsnitt fra et eksempelprosjekt i Visual Components som viser en produksjonslinje simulert som helhet 20
3.2 Simulering i Visual Components 21
3.3 Detaljer fra simulering i Visual Components 21
3.4 Skjermbilde av Program Editor, profiler og innstillinger i Visual Components 22
3.5 Simulering i DELMIA 3DEXPERIENCE 25
3.6 Detaljer fra simulering i DELMIA 3DEXPERIENCE 25
3.7 Skjermbilde av profiler og innstillinger i DELMIA 3DEXPERIENCE 26
3.8 Utsnitt fra skott 27
3.9 Oppsettet brukt under testingen 30
3.10 Oppstilling med dimensjoner 31
3.11 Typisk Leirvik skott med detaljer 32
3.12 Teststykke som skal representere sveiseutfordringer på et Leirvik skott 33
3.13 Dimensjoner på teststykke 001 33
3.14 Utfordrene sveiser på teststykket 34
3.15 Sveisebane med og uten start og stoppblokker. 35
3.16 Bilde fra testing med teststykke 001 36
3.17 Testing av bjelke og stående sveis 37
3.18 Glippe mellom bjelkene 38
3.19 Bildesekvens fra gjennomkjøring av programmet 39
3.20 Resultat etter sveising av teststykke 001 40

Tabeller

2.1 Sammenlikning av egenskapene til stål og aluminiumslegeringer. . . . 8
3.1 Utstyrsliste 30
3.2 Oppsett for en typisk horisontal og vertikal sveis 37

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler utfordringer ved robotisert sveising av aluminium med spesielt fokus på offline programmering basert på CAD-modeller og simulering.

Robotisert sveising av ulike geometrier er simulert i Visual Components og 3DEXPERIENCE DELMIA. Det er også sett på offline programmering med begge programmene. Det er vist at 3DEXPERIENCE er et betydelig kraftigere verktøy når det kommer til offline programmering da Visual Components mangler mye funksjonalitet for å sette profiler for de ulike robotkontrollerne, spesielt når det gjelder sveising.

Det er vist at geometri har mye å si for effektiviteten og at en utforming tilpasset robotisert sveising har mye å si for hvor effektiv man kan programmere roboten i en produksjonsprosess. Standardisering av geometri gjør at man kan kjøre samme programmet på flere sveiser, og dermed også i større grad automatisere programmeringen.

Summary

This thesis discusses challenges by robotized welding of aluminum with special focus on the offline programming based on CAD models and simulation.

Robotic welding of various geometries is simulated in both Visual Components and 3DEXPERIENCE DELMIA. Offline programming has also been evaluated with both programs. It has been shown that 3DEXPERIENCE is a much more powerful tool when it comes to offline programming as Visual Components lacks much functionality for setting profiles for the various robot controllers, especially when it comes to welding.

It has been shown that geometry has a great impact on efficiency and that a design adapted to robotized welding is important for how effective one can program the robot in a production process. Standardization of geometry makes it possible to run the same program on several welds, and thus also to a greater extent automate the programming.

Forkortelser og ordforklaring

API	Application Programming Interface. Brukes om programmeringsgrensesnitt
CAD	Computer-Aided Design. Brukes om generering av tekniske tegninger med bruk av datamskiner.
Digital tvilling	Brukes om en digital modell av virkelighet. I denne oppgaven brukes det om en simulering av en robotselle
I/O	Input/output. Brukes om inn og utganger for programmerbare enheter
MIG	Metal arc inert gas sveising også referert til som GMAW.
TIG	Gas tungsten arc sveising også referert til som GTAW.

1 Introduksjon

Aluminium er et materiale med god motstand mot korrosjon, lav ledningsevne, høy styrke i forhold til tetthet og gode termiske egenskaper. Dette gjør at flere industrier der krav til lav vekt i forhold til stivhet ser til dette materialet. Tradisjonelt har aluminium hvert brukt mye i transportmidler som busser, biler, jernbane, lufttransport og sjøtransport, men også i emballasjemateriale og elektriske ledninger[1].

I biler blir aluminium mye brukt i komponenter som tar opp kollisjonskrefter i sammenstøt for sine gode egenskaper under deformasjon, men også i større biler har det blitt brukt aluminium for å redusere vekt. I den senere tid har man også sett en trend der også mindre biler, og spesielt elbiler med sine tunge batterier, bruker aluminium for å spare vekt. Dette er i stor grad presset frem av økt fokus på miljø og nye miljøkrav. Dette gjelder også i båter og skip der elektrifisering av ferger er i vinden.

Aluminium er i noen grad brukt i fritidsbåter og mindre arbeidsbåter, og også i høyhastighets katamaraner har man sett bruk av aluminium, men produksjonen er svært tidkrevende med mye manuell tilpasning og sveising. For at aluminium skal kunne brukes i større grad er effektivisering av produksjonen nødvendig.

1.1 Bakgrunn

I prosjektet *Alubåt* (2008-2010) finansiert av Norges forskningsråd ble det sett på ulike måter å produsere mer kostnadseffektive båtskrog i aluminium. Ideen var å bruke ekstruderte aluminiumprofiler med langsgående avstiver som en del av den ekstruderte profilen. Videre skulle tverrgående avstivere monteres utenpå de langsgående avstiverne, i motsetning til mer tradisjonell konstruksjon der de langsgående avstiverne går gjennom de tverrgående avstiverne i utsparinger. Denne typen konsept er kjent som *floating frame*.

I Jon Englund[2] og Lars Johan Mong[3] sine mastere fra henholdsvis 2009 og 2011 ble dette konseptet analysert med tanke på strukturell styrke for bruk i en båt av typen JumboCat 60. Dette er en høyhastighets passasjerferge på 60 meter med katamaranskrog. Begge masterne konkluderer med at floatign frame konseptet gir en dårligere stivhet enn tradisjonell konstruksjon, og at en økning av materialtykkelse er nødvendig.

I prosjektoppgaven min ble det sett på robotisert sveising av de ulike geometriene beskrevet ovenfor ved hjelp av simulering. I tillegg er også Leirvik AS kommet inn i bildet. Leirvik AS er en ledene leverandør av aluminiumsprosjekter[4], og lager blant annet boligkvarterer og helikopterdekk i aluminium til offshore installasjoner. De ønsket å utforske mulighetene for robotisert sveising av aluminium spesielt med tanke på produksjon av boligkvarterer.

1.2 Problembeskrivelse

I denne oppgave skal robotisert sveising av aluminium studeres og testes ut i eksperimenter for bruk i sveising av større konstruksjoner i aluminium. Oppgaven skal evaluere hvor egnet ulike geometrier er for robotisert sveising, og dette skal prøves ut i praksis i instituttets robotlaboratorium. Dette skal implementeres med offline programmering av sveisebaner basert på geometrimodeller av deler som skal sveises. Oppgaven skal også prøve ut sensorsystemer for deteksjon av sveisefuge og korreksjon av sveisebaner.

1.3 Eksisterende litteratur

I *Applicability of Robotic Welding for Aluminum Boat Manufacturing* [5] beskrives en case der robotisert konstruksjon og sveising av aluminiumbåt analyseres. Båtens underside består av buttsveisede plater, mens på innsiden monteres langsgående og tverrgående avstivinger. Utfordringer som beskrives er unøyaktigheter i arbeidsstykkene og at arbeidsstykkene slår seg og sprekker i sveisen. Det konkluderes med at avstivingen bør designes på en sånn måte at det skaper god plass til robotsveisingen, og at alle sveiser er tilgjengelig for en robot. En konstruksjon med T-sømmer beskrives som godt egnet for robotsveising sammen med buttsveisen. Bruk av optisk sensor til deteksjon av søm til sveising av utsiden av skroget beskrives som suksessfullt, men at laserstyrken måtte settes til høyeste nivå for å håndtere problemer med refleksjoner i aluminiumen. Til sveising av avstivingen på innsiden av skroget beskrives mangel på plass til å bruke en sveisepistol utstyrt med laser.

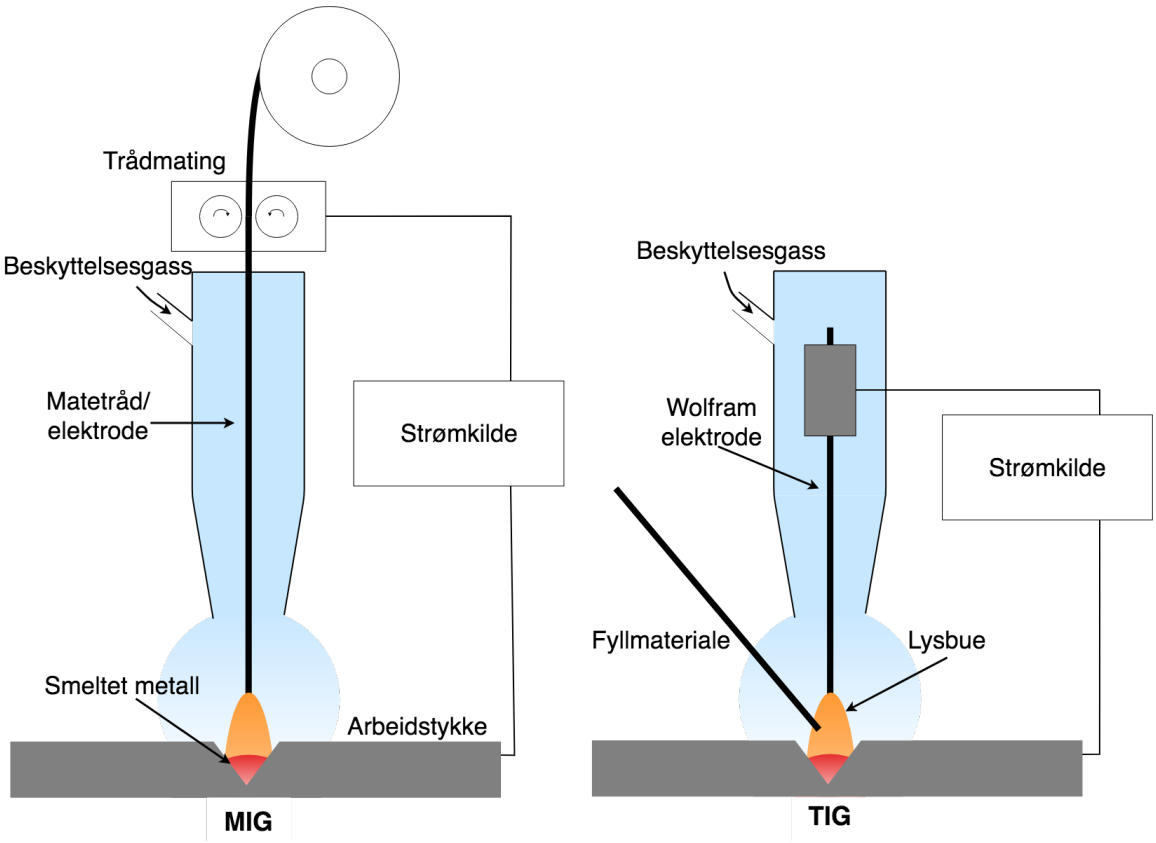
2 Teori

2.1 Sveising

Sveising er en sammenføyningsmetodesom kan brukes på plastmaterialer og metall[6]. I denne oppgaven vil det bli sett på smeltesveising av metall der lokal oppvarming smelter metallet som da flyter sammen og størkner som en del. Den vanligst måten for smelte sveising er elektrisk buesveising, der en lysbue brenner mellom arbeidsstykket og elektroden[6]. Det finnes flere ulike varianter buesveising der ulike elektroder og gass brukes. Vi kommer her til å se på *Metal Inert Gas* heretter med forkortelsen MIG og *Tungsten Inert Gas* heretter med forkortelsen TIG. Felles for begge metodene er at en dekkgass brukes for å beskytte det smeltede metallet mot atmosfæren. Gassen kan også i noen tilfeller også ha en funksjon som avkjøling.

MIG sveising også kalt *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) er en prosess der matetrådt automatisk mates gjennom munnstykket fra en trommel på sveiseapparatet. Matetråden fungerer også som elektrode. Det vil si at det er elektroden i seg selv smelter og blir en del av den størknede sveisen. Sveisen kan startes og stoppes fra en knapp på sveisepistolen. Eksterne triggere kan også brukes som pedal eller annen automatisk styring. Figur 2.1 viser skjematisk oppsett av MIG-sveising.

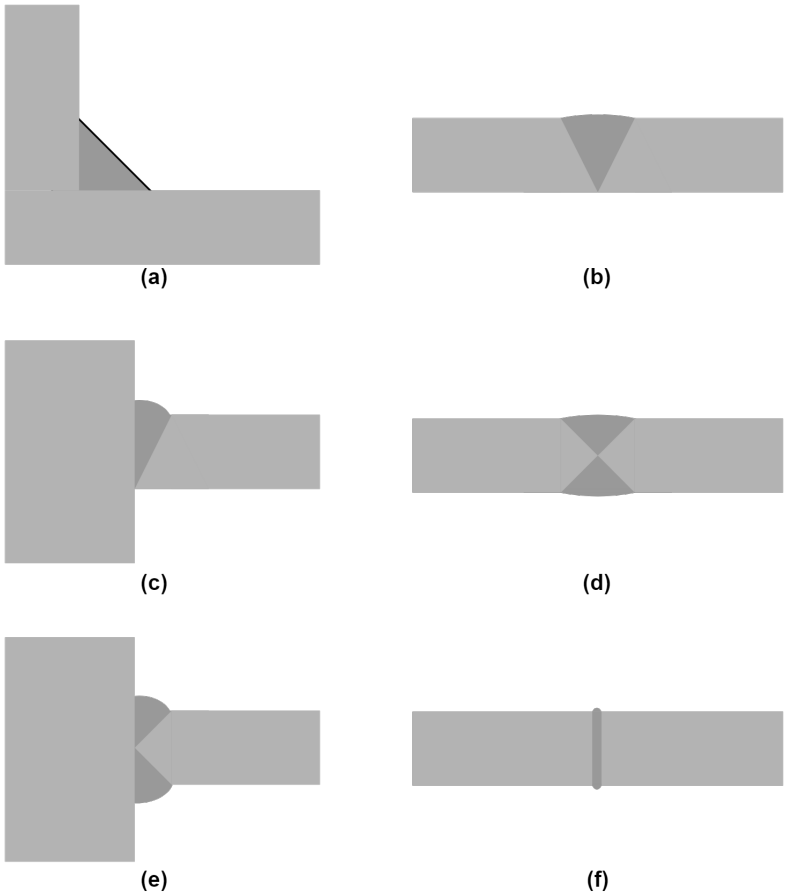
TIG sveising også kalt *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) skiller seg fra MIG ved at elektroden består av wolfram og ikke smelter. Fyllmateriale må derfor mates inn fra siden i smeltebadet. Bruk av wolfram elektrode gir en mer stabil lysbue. TIG sveising brukes derfor til sveiser der det er høyere krav til kavitet og presisjon. Denne metoden kan også brukes uten fyllmateriale. Generelt sett er denne metoden mer tidkrevende enn MIG. Figur 2.1 viser skjematisk oppsett av TIG-sveising.



Figur 2.1: Skjematisk illustrasjon av MIG og TIG sveiseprosess

2.1.1 Sveiseforbindelser

Figur 2.2 viser ulike sveiseforbindelser og hvordan de betegnes i denne oppgaven. Figuren er laget etter illustrasjon i Store Norske Leksikon om sveiseforbindelser[7]. Sveiser av typen kilsveis og 1/2 V-fuge er forbindelsens som brukes mest i denne oppgaven.



Figur 2.2: Ulike sveiseforbindelser. Kilde: snl[7]. **(a):** Kilsveis **(b):** Buttsveis, V-fuge **(c):** Buttsveis, 1/2 V-fuge. **(d):** Buttsveis, X-fuge. **(e):** Buttsveis, K-fuge. **(f):** Buttsveis, I-fuge

2.2 Sveising av aluminium

Sveising av aluminium er generelt sett regnet som mer utfordrende å sveise sammenliknet med stål. Mye av dette skyldes at aluminiumens termiske egenskaper gjør at prosessen er mer sensitiv, men også at flere forhåndsregler må tas for at et godt resultat skal oppnås uten svakheter eller sprekker. I dette kapittelet vil det gjennomgås en del av tingene som er relevante for sveising av aluminium. Tabell 2.1 vises en sammenlikning mellom egenskapene til aluminiumslegeringer og stål.

Tabell 2.1: Sammenlikning av egenskapene til stål og aluminiumslegeringer. Tallene er hentet fra *Joints in light alloys today: the boundaries of possibility*[8]

Egenskap	**Alu.legeringer**	**Stål**
Massetetthet [kg/m3]	∼2.700	7.900
Smeltetemperatur metall [°C]	470-650	1400-1500
Smeltetemperatur oksider [°C]	2060	900
Spesifikk varmekapasitet [kJ/kg*°K]	0.89	0.44
Termisk konduktivitet [W/m*°K]	235	79
Lineær lengdeutvidelseskoeffisient [mm*106/°C]	24	14

2.2.1 Spenning og strøm

Ved MIG sveising brukes som regel en strømkilde. Det vil si konstant strøm og variabel spenning. Når man sveiser aluminium brukes reversert polaritet[8]. Det vil si negativ pol på arbeidsstykket. Flere sveiseapparater har funksjonalitet som pulserer spenningen. Dette kan være DC-puls, men apparater som kan generere AC-puls eksisterer. Dette gir mindre temperaturutvikling arbeidsstykket.

2.2.2 Matetråd

Matetrådens sammensetning og tykkelse har mye og si for resultatet. Det finnes veldig mange typer matetråd med ulike tilsetninger. For sveising av aluminium bruker man som regel en tråd av aluminium. Vanlige tilsetninger er titan, silisium eller magnesium, men det finnes langt flere enn dette. Matetråden velges normalt ut i fra typen legering som skal sveises, men her er det også mange parametere som spiller inn.

2.2.3 Beskyttelsesgass

Aluminium absorberer hydrogen når den er i smeltet tilstand. Når aluminiumen smelter vil dette hydrogenet samle seg i porer som svekker sveisens egenskaper [9]. Derfor brukes en beskyttelsesgass som fortrenger atmosfæren og hindrer at den smeltede aluminiumen reagerer med atmosfæren.

Både argon og helium kan brukes som dekkgass. Helium har gode egenskaper som dekkgass da det gir en lysbue med høyere temperatur enn argon og dermed også bedre penetrering, men helium er også mer krevende å sveise for hånd [10]. Det er vanlig å bruke en kombinasjon av disse gassene i størrelsesorden 50%-75%. Til manuell sveising brukes ofte argon som hovedelement tilsatt helium i mindre konsentrasjon, mens helium som hovedelement er i en del tilfeller brukt i robotisert sveising for å kunne sveise med høyere hastighet. For å sikre at gassen dekker godt ønsker man at gassmengden skal tilpasses så man oppnår laminær strømning.

I *Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection* [10] trekkes følgene punkter frem for valg av gass:

1. Gassen må kunne generere plasma og en stabil bue mekanisme og karakteristikk.
2. Den bør gi jevn overføring av smeltet metall fra matetråden og gi ønsket mengde metalloverføring.
3. Den skal beskytte sveisehodet (i buens umiddelbare nærhet), smeltebad og matetrådens tupp mot oksidasjon.

4. Den skal bidra til å oppnå god penetrasjon og god profil på ferdig sveis.
5. Den bør ikke påvirke prosessens sveisehastighet.
6. Den bør forhindre tendenser til undercutting.
7. Den bør begrense behovet for rengjøring etter sveising.
8. Den bør ikke være skadelig for sveisemetallets mekaniske egenskaper.

2.2.4 Urenheter og oksidasjonssjikt

En av egenskapene som gjør at aluminium til et motstandsdyktig materiale er at det dannes en tynn oksidasjonsfilm Al_sO_3 på ca 0.01mm på overflaten av aluminiumen[1]. Oksidasjonssjiktet dannes i løpet av noen timer og gjør at aluminiumen ikke korroderer i luft. Dette oksidasjonssjiktet har en smeltetemperatur på rundt 2050°C[10], noe som er betydelig høyere enn aluminiumens smeltetemperatur på 660°C[10]. Oksidlaget vil derfor ikke smelte ved sveising. Dette fører til at det smeltede materialet fester seg dårlig og at sveisen blir svak. Oksidlaget er også elektrisk isolerende[10], og kan derfor gjøre det vanskelig å få tent lysbuen.

Andre faktorer som kan redusere kvaliteten på sveisen er fukt, olje og fett som kan ligge på overflaten av materialet. Det er derfor viktig at arbeidsstykket rengjøres skikkelig før sveising. Dette vil si vasking med alkohol for fjerning av olje og fett for så børstning med stålbørste for fjerning av oksider på overflatene. Etter klargjøring bør sveising gjennomføres innen to timer (helst umiddelbart) før nye oksidlag dannes.

2.2.5 Termisk ledningsevne og termisk ekspansjon

Avhengig av legering har aluminium ha 2-3 ganger høyere termisk ekspansjon enn stål. Dette gjør at det i løpet av prosessen med smelting, størkning og nedkjøling mot omgivelsestemperatur vil en større sammentrekning oppstå en ved sveising av stål. Sammentrekningen kan føre både poredannelser sveisen og at sveisen sprekker i størkningsprosessen.

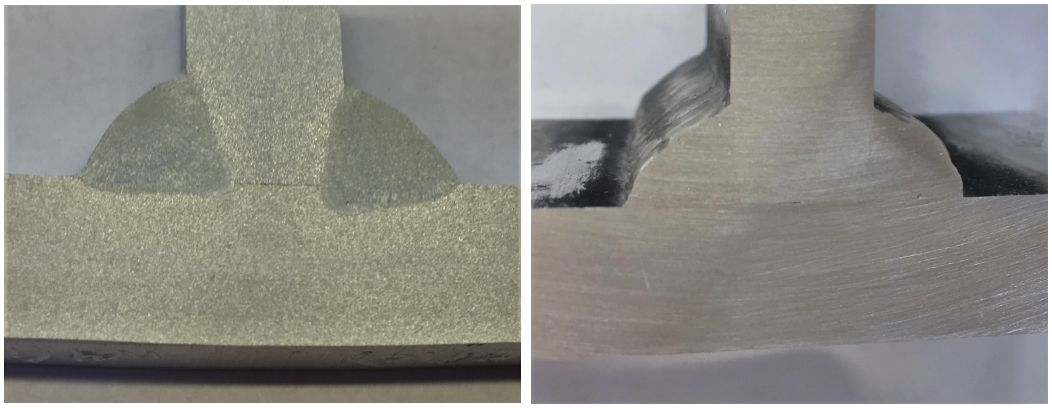
Aluminium har også tre ganger høyere termisk ledningsevne enn stål[8]. Dette fører til at varmen som tilføres i prosessen raskt sprer seg i arbeidsstykket. Dette gjør det vanskeligere å oppnå en god sveis med full penetreringen uten at det smelter hull i aluminiumen. For å håndtere dette kan kjøleelementer, for eksempel blokker av kobber, brukes til å lede varmen vekk fra arbeidsstykket. Man oppnår da et mer konsentrert smeltebad.

2.2.6 Sensitivitet for prosessvariabler

Aluminiumens lave resistivitet og smeltetemperatur sammen med god termisk ledningsevne sammenliknet med stål gjør at gjør at prosessen med sveising av aluminium er mer sensitiv for prosessvariabler. For eksempel er vinduet mellom at aluminiumen smelter, og du oppnår gjennomsveising, til du blåser hull i materialet grunnet at temperaturen sprer seg fort i området rundt sveisen betydelig mindre enn for stål. Dette gjelder spesielt variabler som matehastighet, sveisehastighet og strøm. I artikkelen*Process Sensitivity of GMAW: Aluminum vs. Steel* av T. P. Quinn[11] beskrives det 28 ganger høyere sensitivitet for matehastighet målt i lengde på lysbuen.

2.2.7 Innbrenning

Figur 2.3 viser hvordan to sveiser som på utsiden ser veldig like ut kan ha veldig ulik grad av innbrenning. Begge bildene er fra tester som er gjennomført i Finspång beskrevet i kapittel 3.5. I figur 2.3a ser vi et etset snitt av e sveis med god innbrenning. Figur 2.3b viser et snitt med dårlig innbrenning. Her kan man se konturen av de to platene. Dette tyder på at sveisen har vært for kald.



(a) **(b)**

Figur 2.3: Innbrenning **(a)** Fullstendig innbrenning. Dette er en etset snitt fra en test i Finspång **(b)** Ufullstendig innbrenning. Her kan man se konturen av de to stykkene som skulle hvert smeltet sammen

2.3 Robotisert sveising

Når en robot skal sveise stiller dette ytterligere krav til oppsett av arbeidsstykket. Roboten bruker i utgangspunktet bare forhåndsprogrammerte koordinater til å utføre jobben. Dette betyr at arbeidsstykket må spennes fast på en måte som gjør at det holdes på plass under hele prosessen. Det er også viktig at posisjon og orientering stemmer med programmet.

I boken *Welding handbook: Vol. 3 Part 1 : Materials and applications. eng. Miami, FL, 1996.*[12] trekkes frem følgende punkter som viktige ved automatisert sveising av aluminium:

- Arbeidsstykkets må være godt spent fast og de ulike delene må være presist posisjonert i forhold til hverandre langs hele sveisen.
- Det er viktig at gassen dekker tilstrekkelig for alle strømmer og hastigheter.
- Sveisepistolen må festes godt til roboten så arbeidsvinkel kan settes nøyaktig.

2.3.1 Sensorer

Touch Sensing: Denne metoden bruker sveiseelektroden til å finne punkter på arbeidsstykket[13]. Dette gjøres ved at det påføres en lav spenning på elektroden, og at roboten beveger seg mot arbeidsstykket. Når kontakt mellom arbeidsstykket og elektroden registreres kan de forventede koordinatene til arbeidsstykket justeres og roboten kan bevege seg mot et nytt punkt. Denne metoden fordrer at arbeidsstykkets form og geometri er vel definert og at arbeidsstykket har kanter som lett kan detekteres. Metode er også tidkrevende sammenliknet med andre metoder, men billig og enkel i form av materiell da implementering ofte baserer seg på en softwarebasert tolking av allerede eksisterende sensorer i sveiseutstyret og informasjon om robotens posisjon.

Through-Arc Seam Tracking (TAST): Denne målemetoden ligner på touch sensing da det også er en softwarebasert målemetode som benytter seg av eksisterende sensorer i sveiseutstyret. Metoden bruker tilbakemelding om strøm til å bestemme avstanden mellom elektroden og materialet. Ved sveising av en sveisefuge kan man bruke en *weave function* på roboten som vil føre roboten i et sikksakk rute over sveisefugen. Avstanden ned til fugen kan da brukes til å regne ut sveisefugens senter i forhold til roboten og korrigere den planlagte ruten. Dette er en vanlig metode å bruke til robotisert sveising av stål, men beskrives som lite egnet til aluminium da endringen i strøm relativ til avstand er for lav til å detektere posisjon[13].

Passiv vision sensing baserer seg blant annet på å bruke lyset fra lysbuen til å hente informasjon om sveiseprosessen samtidig som også informasjon om sømmen kan hentes [13]. Metoder der bilder som tas før selve sveiseopperasjonen brukes til å detektere posisjon til arbeidsstykket og sveisesøm med naturlig lys eller fotolys faller også inn under denne kategorien.

En utfordringe med bruk av vision ved aluminiumsveising er at aluminium er veldig reflekterende. Lys reflekteres veldig lett og materiale kan i noen tilfeller opptre som et speil. I artikkelen *Practical method to locate the initial weld position using visualtechnology*[14] beskrives hvordan de ved bare og fokusere på å finne sveisens startpunkt kan sammenligne mindre områder av bildet mot en mal, og dermed kunne verifisere om sveisens startpunkt finnes i denne delen av bildet eller ikke. Dette gjør at de slipper å lokalisere hele sveisesømmen i et stort bilde.

I *Visual sensing and penetration con-trol in aluminum alloy pulsed GTA welding*[15] beskrives utfordringer med å bruke vision til å kontrollere ulike variabler og parametere under sveisingen. Dette er vanskelig av hovedsakelig to grunner. Aluminium har relativt lavt smeltepunkt. Dette gjør at reguleringen må skje raskt. Den andre grunnen er at fargen til aluminiumen ikke endres av betydning innen temperaturområdet til smelteprosessen. Dette gjør at det å detektere smeltebadet er vanskelig. Selv etter at lyset fra lysbuen er filtrert bort stikker den flytende aluminiumen seg lite ut. I artikkelen beskrives det hvordan man ved bruk av speil og filter kan reflektere bilder av sveisen fra to vinkler ovenfra i tillegg til en vinkel under sveisen inn i ett bilde kan estimeres sveisebadets størrelse ved hjelp av *edge detection* og *curve fitting*. Denne

dataen brukes til å regulere sveisingen med tilstrekkelig penetrering.

Aktiv vision sensing bruker eksterne lyskilder som laser[13]. En veldig vanlig metode er å bruke en laser sammen med et kamera montert på armen. Laseren projiserer en linje på arbeidsstykket. Ved å analysere bildet av denne linjen vil man kunne detektere sveisesømmens posisjon form og størrelse. Man kan også bruke mer avanserte todimensjonale lasere for å kunne detektere mer informasjon i samme bilde som orientering rundt aksen til laseren[16]. Eksempler er sirkler, triangler, kryss og flere linjer parallelt. Disse systemene er relativt dyre[13].

3 Hoveddel

Grunnet manglene utstyr i NTNUs robotlab på Valgringda i Trondheim, ble Leirviks testing i Fispång i Sverige fulgt. Dette er brukt som utgangspunkt for å se på simulering og offline programmering av robotisert sveising. I dette kapittelet beskrives testingen som ble gjennomført og ulike problemstillinger som ble sett på her. Det sees på ulike programmer for simulering av robotisert sveising og offline programmering med utgangspunkt i en CAD-modell av delen som skal sveises. I tillegg drøftes selve prosessen med å programmere en robot ut ifra CAD.

3.1 Offline programmering og simulering i digital tvilling

Et viktig mål med robotisert sveising er å kunne effektivt produsere unike deler og konstruksjoner. Dette vil si at mye av utfordringen ligger i å kunne lage programmene til robotene fra en CAD-modell av delen før delen er plassert i robotsellen. Dette vil si at en digital tvilling av robotsellen må lages der CAD-modellen kan settes in, og roboten programmeres. Dette gjør også at programmet kan simuleres før selve jobben og dermed kollisjoner og feil unngås. En tenkt produksjonsprosess kan bestå av:

1. **CAD-modell**: En CAD-modell som kan settes inn i den digitale tvillingen må lages.
2. **Definere sveiser:** Oppgaven til roboten må defineres. Det vil si at alle sammenføyninger som skal sveises må kartlegges og merkes i CAD modellen. Dette kan også gjøres som en del av første eller neste ledd.
3. **Lage robotprogrammet:** CAD-modellen plasseres i den digitale tvillingen og programmet til roboten lages. Her er det store muligheter for automatisering og gjenbruk av programmer.
4. **Plassere fysisk del i robotsellen:** Den fysiske delen som skal sveises plasseres i robotsellen.

5. **Kalibrering av faktisk posisjon:** Ved bruk av sensorer måles den faktiske posisjonen til delen. Posisjonen til delen i den digitale tvillingen justeres og programmet tilpasses den nye posisjonen. Dette kan gjøres for hele delen, men også for mindre områder på større deler for å kompensere for avvik mellom CAD-modell og faktisk del.

6. **Testing og sveising:** Programmet kan testes uten sveising for å avdekke eventuelle feil og avvik før selve sveisingen gjennomføres.

7. **Sluttkontroll:** Avhengig av kvalitetskrav kan en manuell sluttkontroll gjennomføres der sveisene gjennomgås visuelt og eventuelt med ultralyd der feil internt i sveisen kan avdekkes.

Det vil ofte være ønskelig å bruke så få manuelle steg som mulig, men avhengig av kompleksiteten og størrelsen på delen kan det også være at manuell bearbeiding må gjøres mellom disse stegene. Det kan være montering og fjerning av deler, pussing og eventuelt manipulering av delen om arbeid skal gjøres fra ulike sider. Ved sveising av aluminium må også preparering som rengjøring og pussing gjøres i forkant av sveisingen.

3.2 Kalibrering arbeidsstykke-robot

Når man skal gjennomføre et arbeid programmert i en digital tvilling, er man avhengig av at posisjon og orientering til arbeidsstykket er nøyaktig mellom roboten og programmet. Dette kan gjøres på flere måter. Det kan brukes nøyaktige referanser plassert i arbeidsområdet som bidrar til å kunne posisjonere arbeidsstykket med en tilstrekkelig nøyaktighet for roboten. Et annet alternativ er å bruke sensor til å detektere arbeidsstykkets posisjon for deretter å justere programmet etter dette. Dette gjør at man effektivt kan korrigere for avvik posisjonen uten å bruke mye tid på plassering av arbeidsstykket og kontroll.

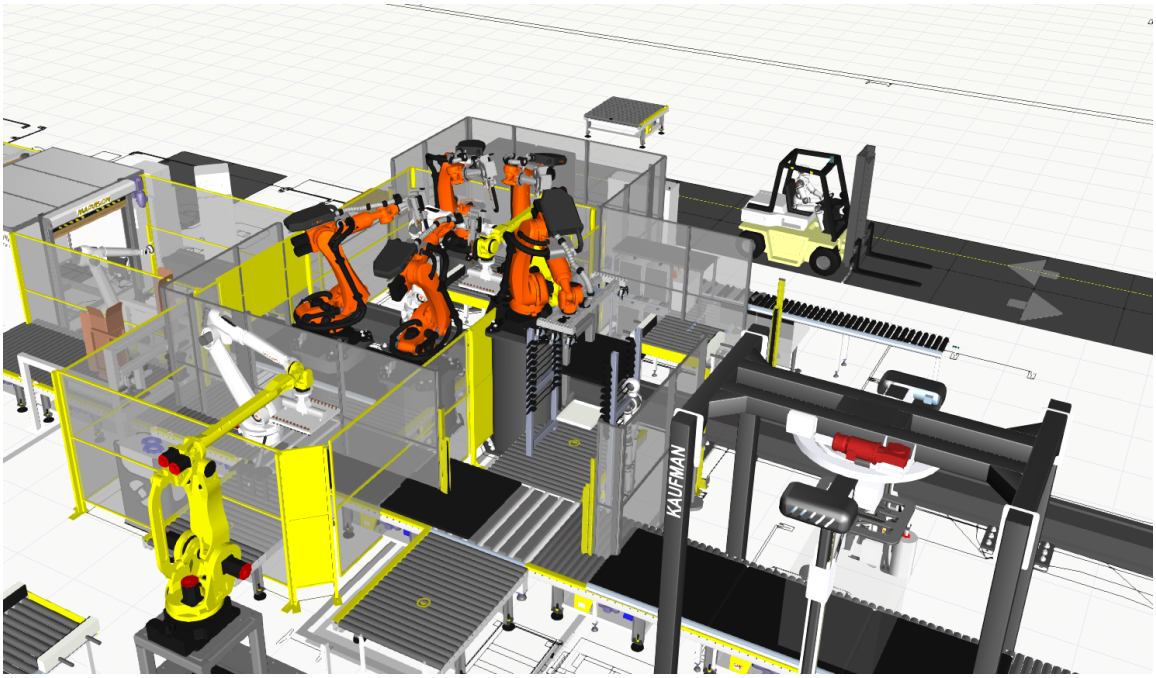
3.2.1 Deteksjon med sensor

Den enkleste formen for sensorer er å bruke *touch sensing* som er beskrevet i kapittel 2.3.1. Man bruker da elektroden på sveisepistolen eller en sensor i kappen for å detektere kontakt med arbeidsstykket. Ved å berøre to punkter på en kant eller tre punkter på et plan kan man detektere posisjon og orientering. Dette gjør at man kan finne arbeidsstykkets posisjon og korrigere dette i programmet. Denne metode gjør det også mulig å detektere avvik i arbeidsstykket og korrigere for dette.

3.3 Visual Components

Visual Components[1] er et program laget for simulering av ulike produksjonsprosesser, med spesielt fokus på robotikk. Figur 3.1 viser et skjermbilde fra et eksempelprosjekt i Visual Components. Programmet lar deg simulere en programmert robot med ulik I/O mot andre systemer, transportbånd og produktflyt. Dette gjør programmet godt egnet til å simulere interaksjon mellom roboter, maskiner og andre systemer.

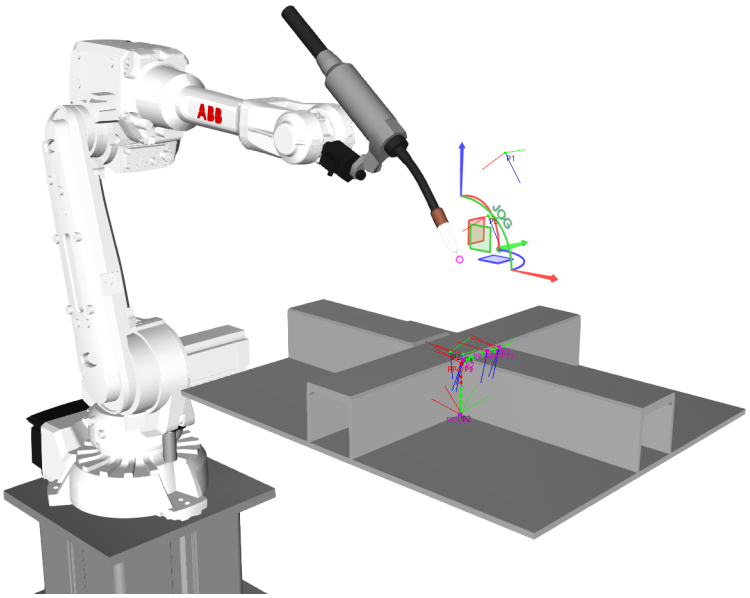
[1] `https://www.visualcomponents.com`



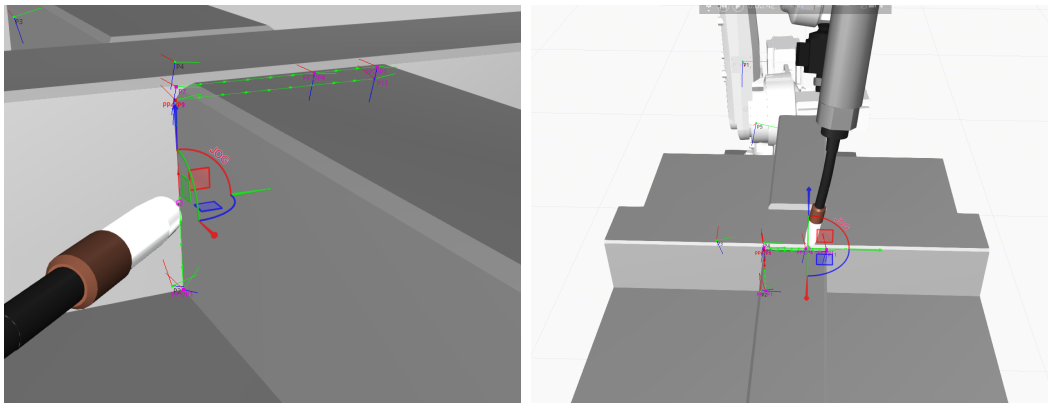
Figur 3.1: Utsnitt fra et eksempelprosjekt i Visual Components som viser en produksjonslinje simulert som helhet

3.3.1 Simulering i Visual Components

Visual Compnents er bygget om som en grafisk editor. Det vil si at roboter og komponenter trekkes inn fra katalogen og koblinger mellom robot og verktøy gjøres ved å trekke verktøyet mot roboten. Figur 3.2 og 3.3 viser oppsettet brukt i Finspång for testing av teststykke 001 beskrevet i kapittel 3.5.



Figur 3.2: Simulering i Visual Components



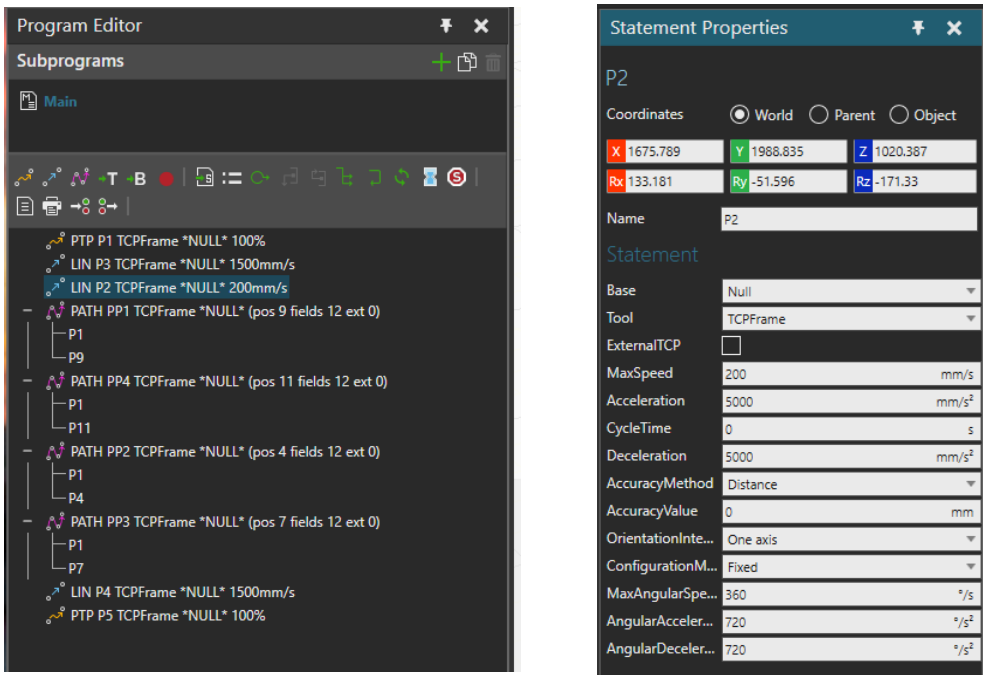
(a) **(b)**

Figur 3.3: Detaljer fra simulering i Visual Components

Et robotprogram bygges opp i programeditoren der man kan trekke og rotere det store aksekorset i vist i figur 3.2 i ulike retninger for å manipulere roboten. Man kan også manipulere ledd for ledd. Man velger deretter type bevegelse og parametere for bevegelsen vist i figur 3.4. Det er også et alternativ å lage en *Path Statement*. Man

kan da velge å følge kanter på et objekt. Dette er spesielt nyttig ved simulering av sveising der sømmen ikke er lineær eller skifter retning.

Visual Components har også en Python API som gir mulighet til å skrive egne programmer. Dette gjør at man kan lage egne funksjoner som utvider programmets funksjonalitet.



(a) (b)

Figur 3.4: Skjermbilde av Program Editor, profiler og innstillinger i Visual Components. **(a)** Program Editor. **(b)**Statment Properties for en lineær bevegelse.

3.3.2 Offline programmering i Visual Components med Post Processor

For at et program skal kunne brukes på en robot må programmet oversettes fra Visual Components XML format til programspråket til de ulike robotprodusentene. Dette kalles i Visual Components for en *post processor*. En Add-on er tilgjengelig for konvertering til VAL 3 format som kan brukes på Stäubli roboter[2]. For andre produsenter må post prosessoren skrives som et eksternt program.

Kristoffer Larsen lagde i forbindelse med sin masteroppgave fra 2016[17] et post prosessor program i javascript for *KUKA Robot Language*[3]. Programmet konverterer et program lagret i Visual Components til et filformat som kan lastes over og kjøres på en KUKA robot. Programmet er tilgjengelig fra github[4] og fremgangsmåte for bruk er beskrevet i Marius Christopher Grifftun sin masteroppgave [18] der metoden ble brukt til offline programmering av plukkeopperasjoner.

For at et program laget i Visual Components skal kunne konverteres i Post Processor må man lagre filen som en RSL fil som igjen leses som en XML fil i Post Processor. Java scriptet må kjøres i en IDE (Integrated Development Environment), for eksempel Eclipse[5] eller Netbeans[6]. I tillegg må JDK[7] (Java Development Kit) være installert for å kunne kompilere programmet.

Når programmet kjøres vil ett vindu komme opp der man kan velge filen som skal konverteres. Den konverterte filen vil da ende opp i en mappe kalt *result* og er av typen SRC.

[2] `https://www.visualcomponents.com/staubli-add-on/`
[3] `https://en.wikipedia.org/wiki/KUKA_Robot_Language`
[4] `https://github.com/kristofferlarsen/PostProcessor`
[5] `https://www.eclipse.org`
[6] `https://netbeans.org`
[7] `https://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html`

3.4 Dassault Systèmes DELMIA 3DEXPERIENCE

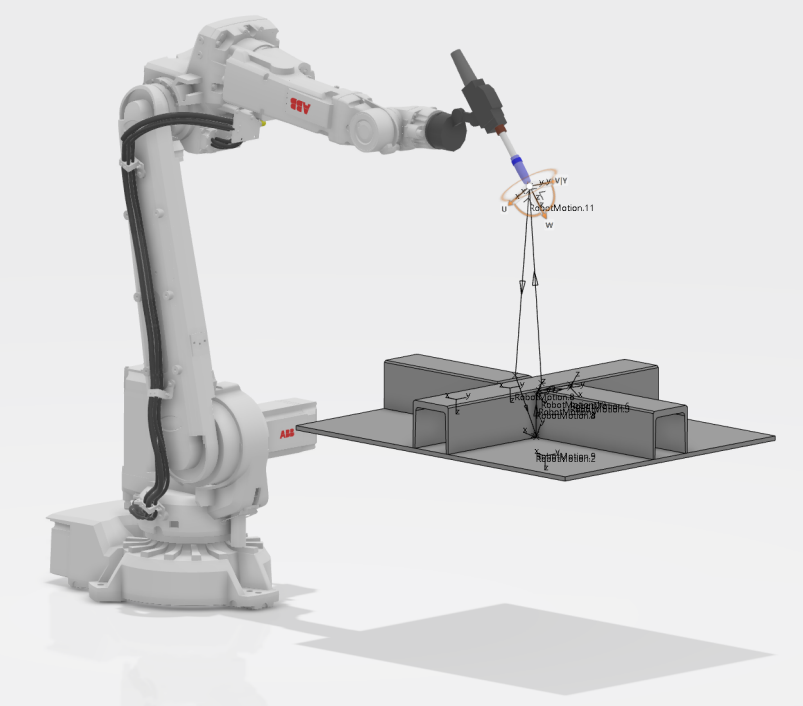
DELMIA[8] er Dassault Systèmes sin programvare for simulering og programmering av industriprosesser med roboter. DELMIA er en del av 3DEXPERIENCE plattformen, som inkluderer en lang rekke annen programvare som fungerer sammen modulært.

3.4.1 Simulering og programmering i DELMIA 3DEXPERIENCE

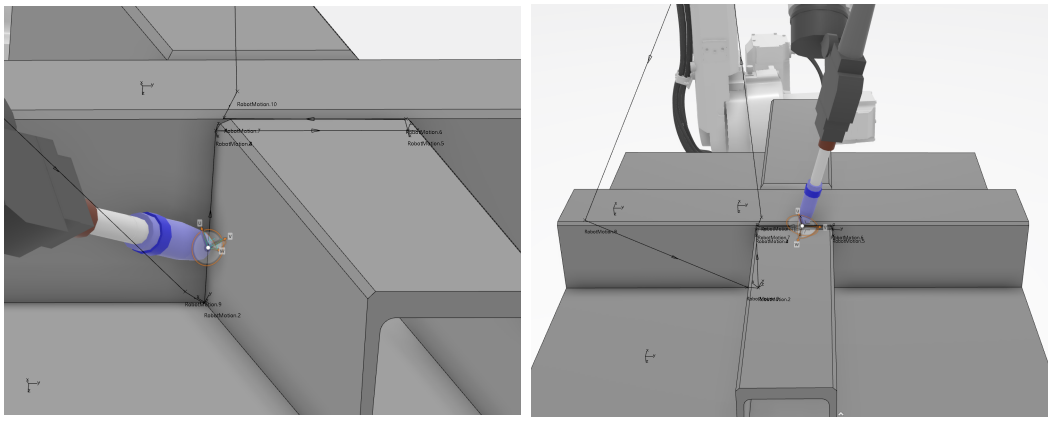
Som et ledd i å kunne sammenlikne Visual Components og DELMIA 3DEXPERIENCE som simuleringsverktøy er testingen som ble gjort i Finspång satt opp i begge programmene. Dette gjør at men kan sammenlikne programmene på like jobber, og samtidig kunne sammenlikne mot en reell test.

I DELMIA vil en simulering bygges opp i en *manufacturing cell*. Under denne sellen organiseres alt av komponenter som roboter, verktøy og deler i tillegg til programmer og koblinger mellom delene hierarkisk. Produksjonsellene kan også organiseres under produksjonslinjer og fabrikker. Dette gjør at alt har en hierarkisk tilhørighet der det er lett og bygge prosjekter opp i moduler som lett kan kopieres over i et annet system. Dette gjør også at man kan definere posisjoner (Tags) og baner som kan grupperes i *TagGroups* på nivåer over roboten. På denne måten kan man lage sveisebaner og posisjoner knyttet til en del uten at delen er plassert i produksjonscellen. Figur 3.5 og 3.6 viser teststykke 001 med baner og tags i DELMIA 3DEXPERIENCE.

[8] `https://www.3ds.com/products-services/delmia/`



Figur 3.5: Simulering i DELMIA 3DEXPERIENCE

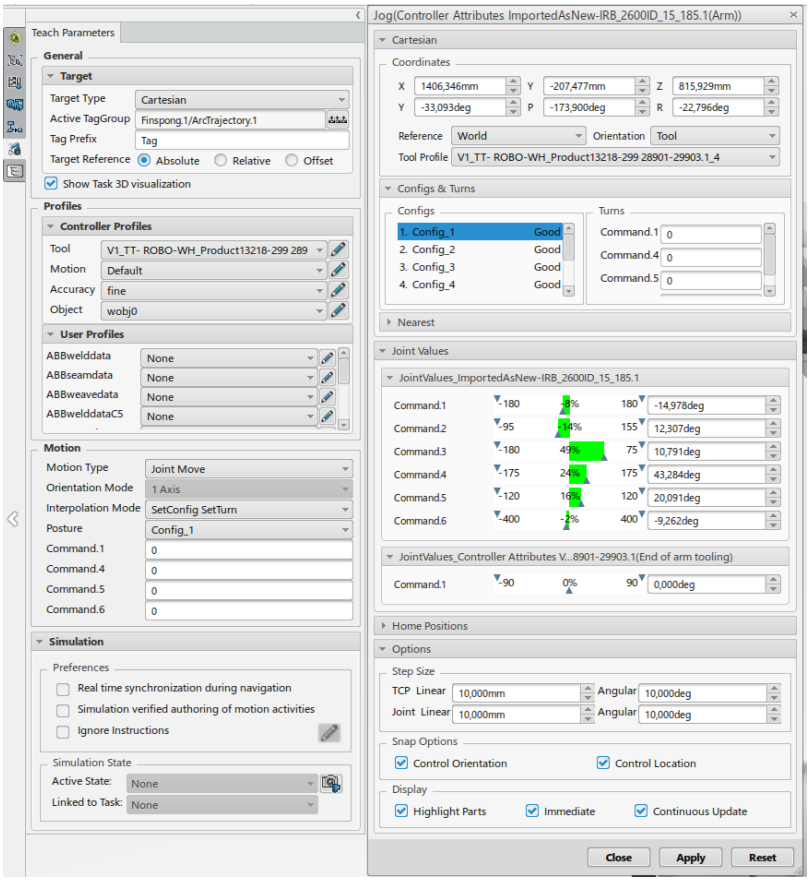


(a) **(b)**

Figur 3.6: Detaljer fra simulering i DELMIA 3DEXPERIENCE

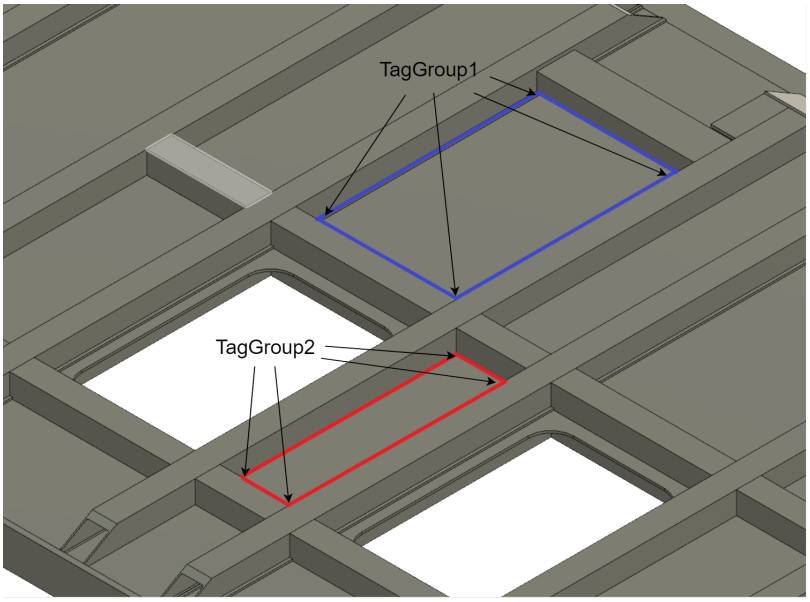
Roboten kan manipuleres ved å dra i det oransje aksekorset, eller ved å styre roboten ledd for ledd. Figur 3.7 viser en del av innstillingene som gjøres for hvert mål. Blant

annet kan man definere egne profiler for bane, sveising og wieve. I tillegg får man god oversikt over mulige konfigurasjoner for et mål, og kan lett justere vinkler hastigheter.



Figur 3.7: Skjermbilde av profiler og innstillinger i DELMIA 3DEXPERIENCE

Ved å definere posisjonene i et program relativ til en eller flere grupper med tags kan man bruke samme programmet til å definere alle bevegelser mens tagene har ulike posisjoner. Dette kan være svært nyttig om en jobb består av de samme bevegelsene men på ulike steder. For eksempel vil et skott kunne deles opp i flere tilsvarende deler som kan kjøres med samme program, men som er definert av to ulike grupper med tags. I figur 3.8 vises et utsnitt fra skottet til Leirvik der to slike områder markert. Her vil man, ved å definere en tag i hvert hjørne, kunne kjøre samme programmet for sveising av de markerte områdene selv om dimensjonene er ulike.



Figur 3.8: Utsnitt fra skott

3.4.2 Modulen Robot Programming

Når arbeidsstykket er plassert i den digitale sellen, og programmet er laget, kan man programmere roboten. Dette gjøres i en egen modul som kalles *Robot Programming*. Her kan man installere kompilatorer for de ulike programmeringsspråkene og generere programmer som kan overføres til roboten. Man kan også koble til robotens styreenhet ved bruk av RRS[19]. Ved å ta inn oppmålte punkter fra roboten ved for eksempel bruk av *touch sensing* (se kapittel 2.3.1) kan man kalibrere posisjonen til arbeidsstykket og justere programmet før det lastes opp til roboten. Under følger et program generert ut i fra simulering av tester med teststykke 001 beskrevet i kapittel 3.5. Programmet er generert for ABB roboten brukt under testingen i Finspång som bruker språket RAPID[9]. Legg merke til hvordan den første *MoveJ* funksjonens posisjon er definert med en tag variabel.

[9] `https://en.wikipedia.org/wiki/RAPID`

```
%%%
VERSION:1
LANGUAGE:ENGLISH
%%%
MODULE RobotTask
  PERS robtarget Tag2:=[[1254.703,0.000,1277.789],
      [0.327039,0.000000,0.945011,0.000000], [0,2,-2,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E
      +09,9E+09,9E+09]];
  PERS tooldata V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2:=[TRUE,[[104.817,0.000,326.610],
       [0.899479,0.000000,0.436965,0.000000]], [0.000,[0.000,0.000,0.000],
      [1.000000,0.000000,0.000000,0.000000],0.000,0.000,0.000]];
  PROC RobotTask()
    MoveJ Tag2,v1000,fine,V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveJ [[1406.347,-207.477,815.938],[0.006208,0.204026,0.935359,0.288858],
        [-1,0,-1,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v500,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveJ [[1264.722,17.028,604.479],[0.395441,-0.060468,-0.847680,-0.348438],
        [-1,0,-1,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v500,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveJ [[1247.041,35.002,591.981],[0.395435,-0.060466,-0.847683,-0.348437],
        [-1,0,-1,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v10,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1247.040,35.002,709.012],[0.525399,-0.104132,-0.697595,-0.475893],
        [-1,0,0,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v10,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1247.041,35.001,709.016],[0.232949,-0.084570,-0.963143,-0.104588],
        [-1,0,0,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v1000,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1247.044,165.000,709.026],[0.114340,0.159826,-0.966942,-0.162497],
        [-1,0,-1,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v10,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1249.589,162.409,717.604],[0.071283,0.183134,-0.977098,0.081608],
        [0,0,-1,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v1000,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1253.179,38.797,719.614],[0.099033,0.005909,-0.982065,0.160330],
        [0,-1,0,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v10,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveL [[1257.166,45.344,738.841],[0.099041,0.005910,-0.982064,0.160331],
        [0,-1,0,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v500,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
    MoveJ [[1254.706,0.000,1277.779],[0.327036,0.000000,0.945012,0.000000],
        [0,2,-2,0],[0.000,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],v1000,fine,
        V1_TT_ROBOWH_Product13218299_2;
  ENDPROC
ENDMODULE
```

3.5 Testing

I utgangspunktet var det ønskelig å teste robotisert sveising av aluminium i tillegg til sensorering på NTNUs robotlab Valgrinda i Torndheim. Dette lot seg ikke gjøre da det tilgjengelige sveiseutstyret ikke var egnet for sveising av aluminium, og mangel på egnede sensorer til testing. Det er derfor valgt å følge Leirvik AS sin testing i hos Hydro ASA i Finspång i Sverige.

3.5.1 Mål med testingen

Leirvik hadde flere mål med testingen.

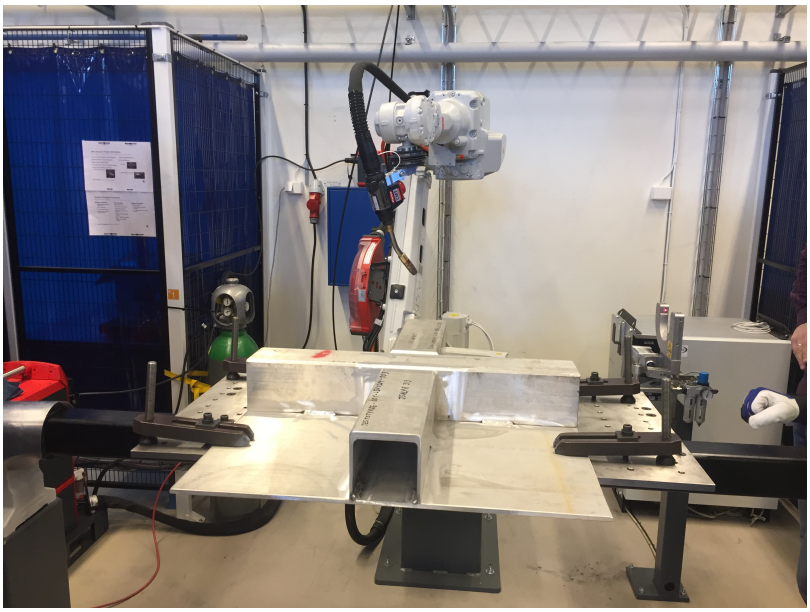
- **Kvalitet på sveis:** Generelt sett var det ønskelig å teste kvaliteten på sveisen en robot kan gjennomføre.
- **Effektivitet:** Det var ønskelig å se om sveisehastigheten kunne økes og om tykkere tråd kunne brukes. Dette kan også gjøre at men ved flerlag sveising kan klare seg med færre lag.
- **Redusere antall start og stopp:** Det var ønskelig å sem om roboten kunne sveise mer kontinuerlig på kompliserte sveiser.
- **Generelle erfaringer:** Generelt samle erfaringer og avdekke nye problemstillinger med robotisert sveising.

3.5.2 Oppsett

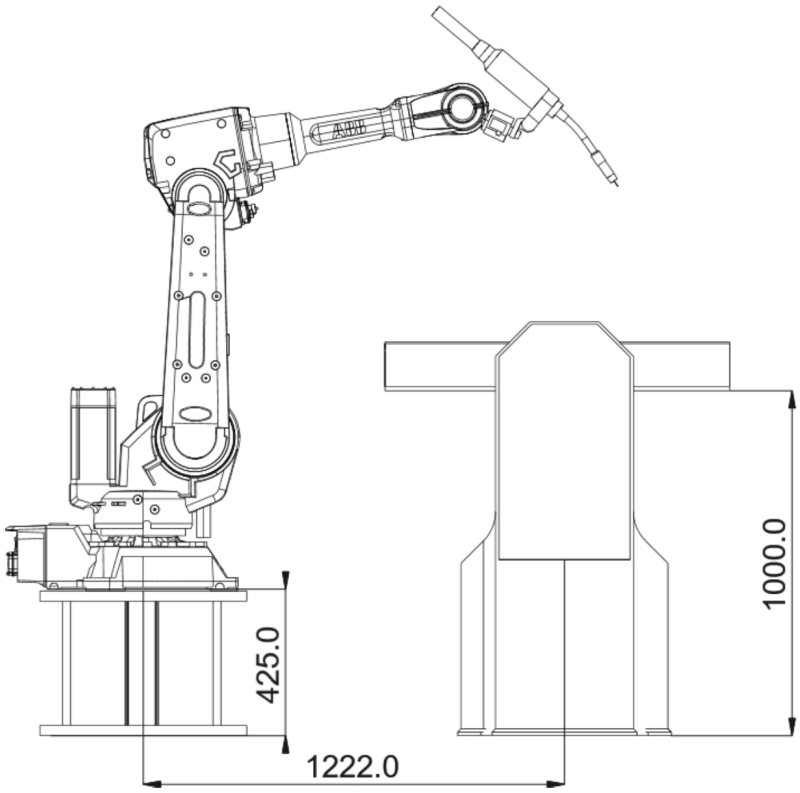
Det er utført testing sammen med Leirvik AS. Testingen ble gjennomført i en robotselle i hos Hydro ASA i Finspång, Sverige. Robotsellen er utstyrt med en sveiserobot av typen ABB IRB2600-12/1.85. Sveiseutstyret består av en Fronius TPS 500i kilde med WF 60i Robacta Drive pistol og WF 25i REEL R trådmater. I tillegg har sellen et dreiebord av typen IRB2600 som kan rotere arbeidsstykket. Dette sto i horisontal posisjon under alle testene. Figur 3.9 viser oppsettet som ble brukt. Tabell 3.1 viser utstyret som ble brukt.

Tabell 3.1: Utstyrsliste

Utstyr	Type
Sveiseutstyr	
Strømkilde	TPS 500i
Kjøleenhet	CU 1400i Pro/MC
Trådmater (stasjonær)	WF 25i REEL RC
Trådmater (robot)	WF 60i Robacta Drive CMT/W
Trådbuffer	SB 60i R
Robotutstyr	
Robot	IRB2600-12/1.85
Kontrollenhet	IRC5 Single
Manipulator for arbeidsstykke	IRBP L300
Håndkontroll	IRC5 Teach Pendant



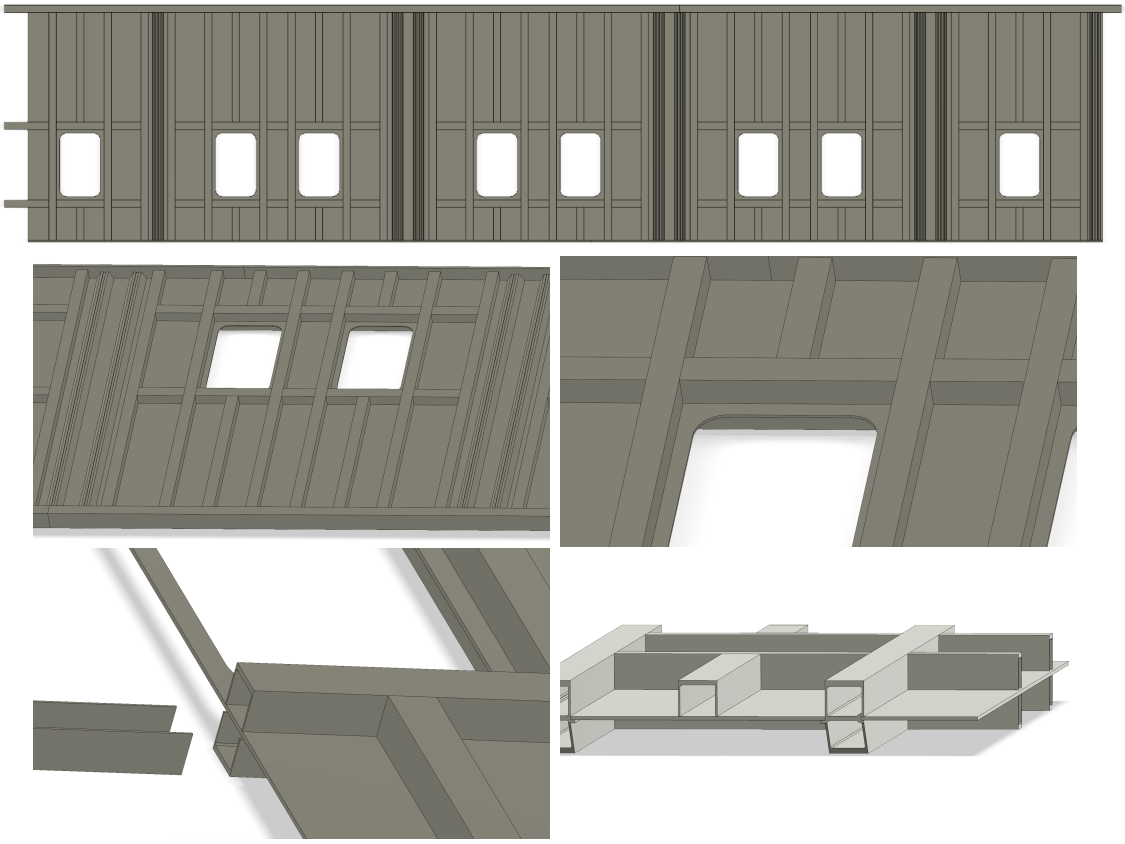
Figur 3.9: Oppsettet brukt under testingen



Figur 3.10: Oppstilling med dimensjoner

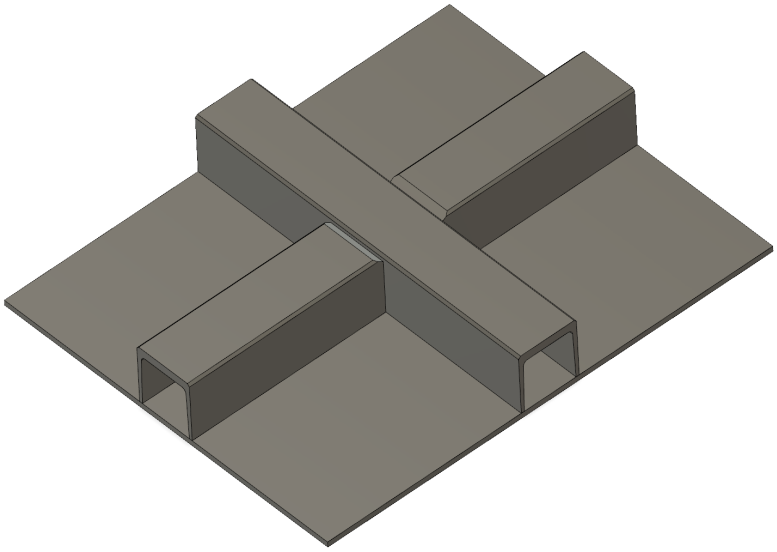
3.5.3 Teststykke

Figur 3.11 viser et typisk skott som Leirvik AS lager. Dette er veggen til en etasje på et offshore boligkvarter og er brukt i prosjektet til Leirvik AS som en typisk sveisejobb for en eventuell robotselle. Skottene kan ha lengder opp til 14 meter og er rundt 4 meter høye. De sveises i dag liggende før de monteres i på boligkvarteret med kran. Skottene er ofte bygget opp av plater med tykkelse i størrelsesorden 12mm med bjelker montert på en eller begge sider. Skottene kan også ha områder med ekstruderte profiler.

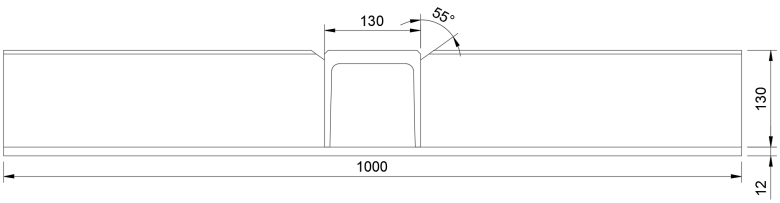


Figur 3.11: Typisk Leirvik skott med detaljer

For å kunne teste ulike utfordringer ved sveising av skottet har Leirvik konstruert flere teststykker som skal representere utfordrerne sveiser på skottet. Figur 3.12 viser teststykke 001. På dette teststykket får man testet sveising av et krysningspunkt mellom to bjelker. Stykket består av en plate med dimensjonene 800mm, 1000mm og 12mm og bjelker. Bjelkene sveises som et kryss på platen. Der bjelkene møtes er det på oversiden av den ene bjelken avfaset en 13mm fuge med 55° vinkel. Dette er vist i figur 3.13.



Figur 3.12: Teststykke som skal representere sveiseutfordringer på et Leirvik skott



Figur 3.13: Dimensjoner på teststykke 001

3.5.4 Start- og stoppblokker

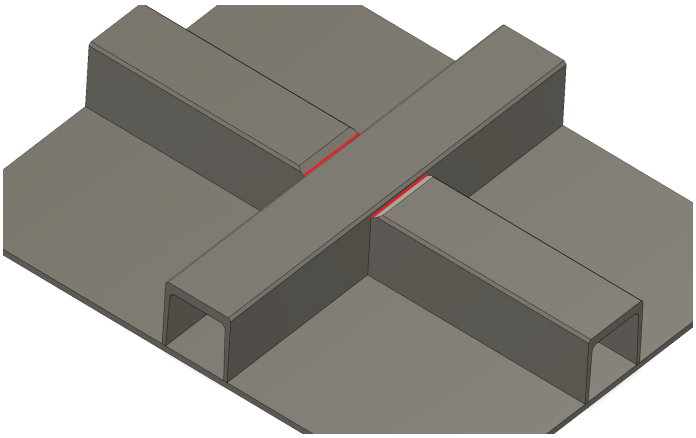
Ved manuell sveising har Leirvik en konkret problemstilling ved sveising av krysninger av bjelker på skottene.

Når man starter en sveis vil det ta noe tid før sveisebadet har oppnådd full temperatur. Dette gjør at den første delen av sveisen vil ha lavere kvalitet med ufullstendig innbrenning. Det samme gjelder ved avslutningen av en sveis. I kritiske områder der men er avhengig av at sveisen har høy kvalitet langs hele fugen vil man normalt manuelt fjerne området med dårlig sveis med vinkelsliper for deretter å sveise dette området på nytt. Et annet alternativ er å bruke start og stoppblokker der dette lar

seg gjøre. Dette er blokker av aluminium som plasseres midlertidig der sveisen starter og slutter. Med blokkene starter man sveisen på blokken så den dårlige delen av sveisen fjernes i etterkant.

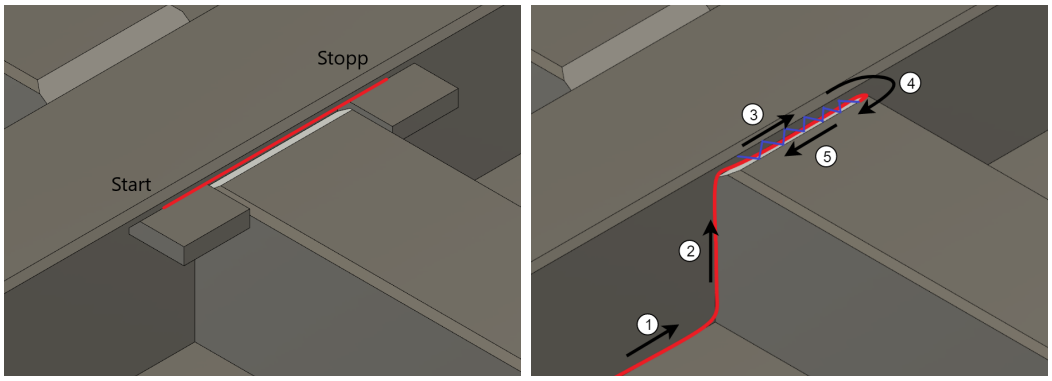
Begge disse metodene beskrevet ovenfor er tidkrevende da det krever ytterligere manuelt arbeid med flere bytter av verktøy i tillegg til at materialforbruket øker. Leirvik ønsket derfor å teste om men ved bruk av robotisert sveising kunne redusere antall ganger man startet og stoppet en sveis. Dette fordi roboten bedre kan håndtere overgangen mellom to typer sveiser da et menneske vil bruke tid til å finne riktige bevegelse og hastighet i tillegg til at roboten kan ender sveiseprogram underveis i sveisen.

Den konkrete problemstillingen det er sett på er sveising av oversiden på et krysningspunkt mellom to bjelker markert i rødt i figur 3.14. Dette er en fuge der man normalt vil legge flere sveiser lagvis. Normalt vil en ved manuell sveiser først sveise de vertikale sidene av bjelkene for deretter å montere en startblokk og en stoppblokk som vist i figur 3.15a. Sveiseren vil da starte og stoppe sveisen på blokkene, og i etterkant fjerne blokkene. Dette gjør at starten og slutten på sveisen fjernes mens hele sveisen i fugen er av god kvalitet. Normalt ville man ved manuell sveising legge minst tre tråder her ved bruk av 1.2mm tråd.



Figur 3.14: Utfordrene sveiser på teststykket

I figur 3.15b vises hvordan man ønsket at roboten skal legge banen. (1) Roboten går rett fra kilsveis mellom platen og bjelken til vertikal kilsveis (2). Her kreves bytte av sveiseprogram til høyere mating og pendling. Det er ønskelig at pistolen rettes noe oppover så tidlig som mulig, altså sveising med push. Man kommer deretter over i en horisontal V-fuge (3). Her er det relativt tynt gods nederst i fugen, og det kan være noe glipp avhengig av kvaliteten på forarbeidet. Det er derfor viktig med presis med presis plassering av pistolen så tråden ikke dyttes ned i glippen. Deretter skal roboten gå tilbake (4), uten å stoppe, for å fylle fugen med tråd nummer to(5). Her må også roboten pendle.



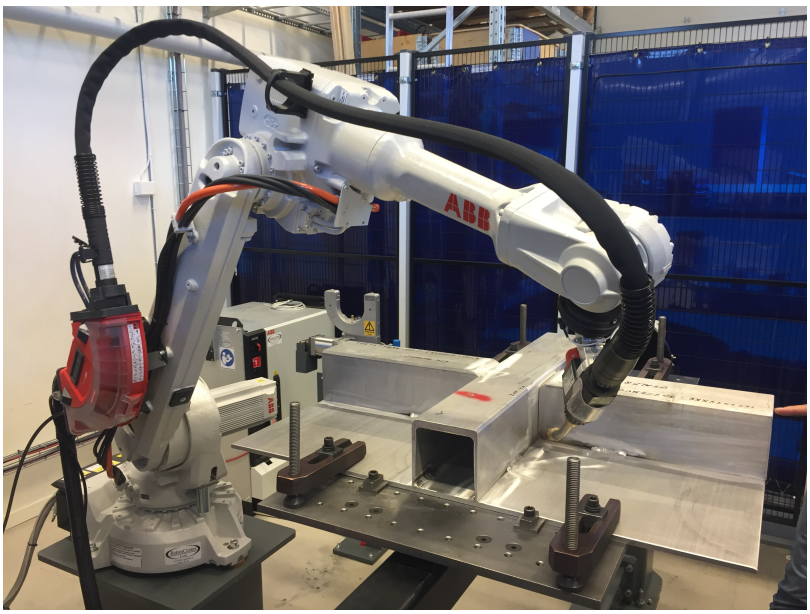
(a) **(b)**

Figur 3.15: Sveisebane med og uten start og stoppblokker. **(a)** Manuell sveising med start og stoppblokker. **(b)** Robotisert sveising uten å stoppe.

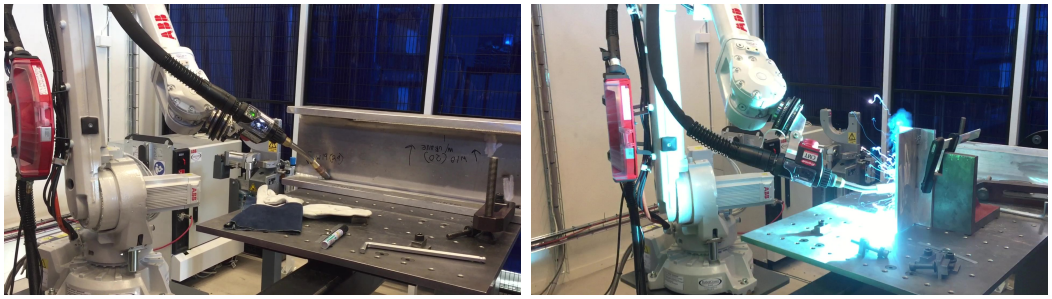
Ved å sveise sekvensen ovenfor oppnår man en kontinuerlig sveis uten stopp i nederste tråden. Dette gjør at man unngår buk av start og stoppblokker noe som reduserer antall manuelle steg og gir mer flyt i automatiseringen i tillegg til å redusere tidsforbruket. Ved bruk av robot kan man også bruke tykkere tråd 1.6mm. Dette øker sveisehastigheten og reduserer antall lag som trengs i en flerlags sveis.

3.5.5 Testresultat

Som beskrevet i kapittel 3.5.3 er det gjennomført testsveising. Figur 3.16 viser oppstillingen som er brukt ved sveising av teststykke 001. Det ble også gjennomført testsveising av bjelke og generelle tester på vertikal sveising som vist i figur 3.17. Det vil her fokuseres på teststykke 001 da dette er testen som er mest utfordrende rent robotteknisk. Grunnet mangel på tid fikk ikke Leirvik utført alle testene de ønsket. Derfor ble det prioritert de generelle testene med horisontal og vertikal kilsveis, bjelke og teststykke 001. Roboten ble programmert med håndkontroll (ABB IRC5 Teach Pendant) av en ansatt i Hydro ASA som kjenner roboten og systemet godt.



Figur 3.16: Bilde fra testing med teststykke 001



(a) (b)

Figur 3.17: Testing av bjelke og stående sveis

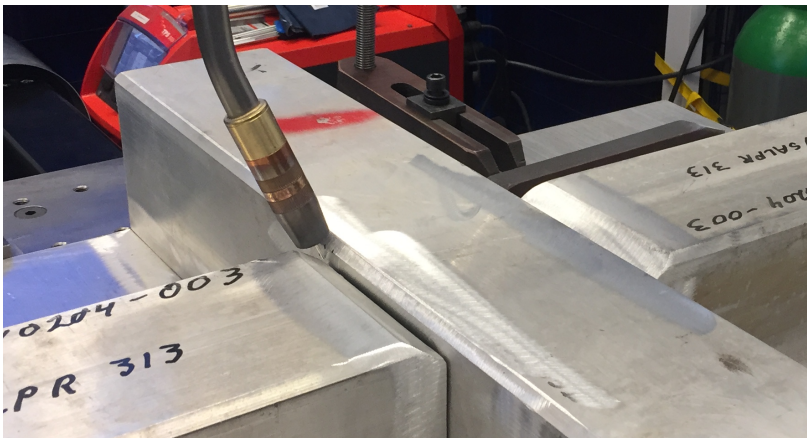
Det ble gjennomført flere testsveiser på vertikal sveis for å fine riktige parametere til sveiseapparatet. Tabell 3.2 viser oppsettet som ble brukt for typisk horisontal og vertikal sveis. Dette er verdier som ble endret underveis i testingen basert på hva slags sveis som ble gjennomført og erfaringer underveis. Som beskrevet i kapittel 3.5.3 var det flere målsetninger med denne testen.

- Undersøke om robotsveising kan redusere antall start og stopp under sveising av et bjelkekryss
- Teste om tykkere matetråd kan brukes ved robotisert sveising. Dette gjør at sveisehastigheten kan økes samt at ved flerlags sveis kan antall lag reduseres.
- Generelt samle erfaring om robotisert sveising på aluminium

Tabell 3.2: Oppsett for en typisk horisontal og vertikal sveis

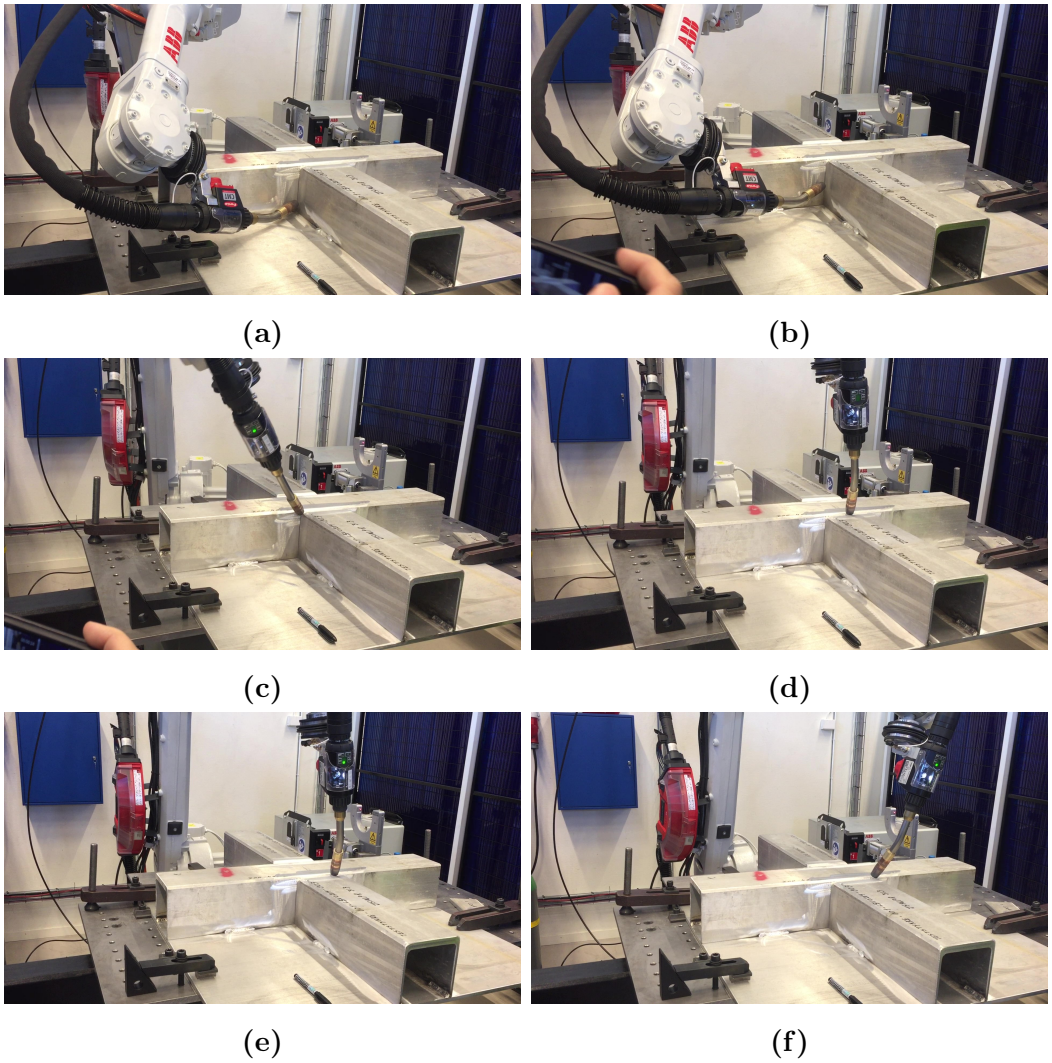
	Horisontal	**Vertikal**
Tykkelse matetråd	1.6 mm	1.6 mm
Matehastighet	8 m/min	6 m/min
Sveisehastighet	8 mm/s	6.5 mm/s
Vinkel	65° (push)	3°

Sveisen ble startet i den vertikale delen av fugen (markert som nummer (2) i figur 3.15b). Dette siden den mest kritiske delen å teste er overgangen mellom vertikal kilsveis og horisontal fugsveis. Også posisjoneringen og vinkelen på det første laget i fugsveisen er kritisk da avfasingen gjør at godset er tynt og at en liten glippe som vist i figur 3.18 kan oppstå avhengig av kvaliteten på det manuell arbeidet. Dette gjør at det for kan brennes hull. Vinkelen og posisjonen er også viktig her for at sveisen skal få innbrenning på begge stykkene.



Figur 3.18: Glippe mellom bjelkene

Figur 3.19 viser bildesekvens hentet fra en video av gjennomkjøring av programmet for sveising av teststykke 001. I 3.19a og 3.19b kan man se hvordan roboten går til en vinkel litt under 90° mot sømmen så fort dette lar seg gjøre (push). Første lag i fugsveisen (figur 3.19c, 3.19d og3.19e) legges med 90° vinkel mot sømmen, men med tråden så den peker inn mot veggen på bjelken så det ikke skal brennes hull i avfasingen på den møtende bjelken. Sveisen legges mot høyre i disse bildene. I figur 3.19f har roboten snudd og begynt å legge lag nummer to i fugen. Her legges sveisen mot venstre. Sveisen legges med 65° vinkel mot sømmen (push) og med pendling (weave). Under testen ble andre laget avsluttet 50mm før enden på bjelken så første lag kunne undersøkes.



Figur 3.19: Bildesekvens fra gjennomkjøring av programmet

Figur 3.20 viser den ferdige sveisen etter testing av teststykke 001. Man kan se at første lag i fugsveisen har noe dårlig innbrenning mot avfasingen, noe som også ble bekreftet når snittet av sveisen ble undersøkt i etterkant. Dette er delen av sveisen som er lengst til venstre i figur3.20b. Ved senere tester ble dette korrigert ved å justere vinkelen på pistolen.

(a) **(b)**

Figur 3.20: Resultat etter sveising av teststykke 001

4 Diskusjon

4.1 Simulering

I oppgaven testes Visual Components og Dassault Systèmes DELMIA 3DEXPERIENCE til simulering av en sveisejobb. Begge programmene kan detektere kollisjoner og er gode verktøy til å teste ut roboter i et gitt produksjonsmiljø før en investering. Når det kommer til programmering mangler Visual Components en del funksjonalitet på profiler til de ulike robotene. Blant annet kan ikke wieve og sveiseprofiler legges inn på en enkel måte. Begge programmene har funksjonalitet for følging av kanter og linjer, og programmene er veldig like ved programmering med jogging, altså at roboten styres til punkt for punkt som lagres.

4.2 Offline programmering

Både Visual Components og DELMIA 3DEXPERIENCE støtter i varierende grad offline programmering. Visual Components er avhengig av en *post processor*, noe som gjør at dette bare er en delvis støttes. Som beskrevet under simulering mangler Visual Components funksjonalitet knyttet til robotens profiler. Dette gjør at dette må legges inn i robotprogrammet manuelt etter at programmet er generert. Programmet støtter en Python API som tillater at egne funksjoner kan lages. Dette gjør at en del at disse svakhetene kan kompenseres med egen kode.

DLEMIA er generelt et større program med flere funksjoner. Blant annet har det en egen modul for sveising. Bruk av tags for posisjoner gjør også at programmer lett kan overføres til tilsvarende jobber med andre dimensjoner og posisjoner. Dette gjør at DELMIA også egner seg godt i en produksjonsprosess. I tillegg har 3DEXPERIENCE som platform moduler for maskinering, prosessplanlegging og logistikk.

4.3 Design

Start og stopp på en sveis er kritiske områder der redusert kvalitet på sveisen oppstår, og dermed må manuell bearbeidelse gjøres i etterkant for å rette opp. I kapittel 3.5 vises det hvordan en robot kan klare overganger som ikke lar seg gjøre ved manuell sveising. Dette vil si at et design laget med hensyn på at en robot skal kunne sveise mer kontinuerlig vil føre til reduksjon i antall start stopp, og dermed færre inngrep som må gjøres manuelt.

Design og utforming bør også tilpasses en mer effektiv programmering. Dette vil si å standardisere former og oppbygning av konstruksjonene så sveising av tilsvarende former kan gjøres med samme skalerbare program. Spesielt i DELMIA som beskrevet i kapittel 3.4 er det gode muligheter for å basere programmeringen på tags som gir mulighet for gjenbruk av skalerbare programmer. Her er også mulighetene for å automatisere programmeringsprosessen stor.

5 Resultat

I denne oppgaven er det sett på robotisert sveising av større konstruksjoner i aluminium. Det er brukt simulering med Visual Components og DELMIA 3DEXPERIENCE for å se på hva geometri og utforming har og si for effektivitet og prosess, i tillegg til at det er sett på hvordan programmene egner seg for offline programmering i en produksjonsprosess. Leirvik AS sin testing i Finspång er også fulgt der en noen av testene er brukt som utgangspunkt for simulering og programmering i denne oppgaven.

Siden Visual Components har flere mangler når det kommer til programmeringsdelen blir offline programmering å se på som en delvis støttet funksjon. Spesielt mangel på weave og sveiseprofiler for de enkelte robotkontrollerne gjør at programmet egner seg dårlig til offline programmering av sveising da dette må legges til manuelt i programmet i etterkant. I tillegg er det bare post prosessor til STÄUBLI roboter som er tilgjengelig via en egen add-on som leveres via Visual Components plattformen. Andre postprosessorer som er beskrevet i kapittel 3.3.2 er også tilgjengelig, og Python API gjør at programmet i stor grad kan tilpasses med egne funksjoner.

DELMIA 3DEXPERIENCE er et betydelig større program en Visual Components. Funksjonene til de ulike robotkontrollerne er i større grad integrert i programmet noe som gjør at blant annet weave og sveisprofiler kan inkluderes i simulering og offline programmering. En egen modul for robot programmering der kompilere til de fleste programmeringsspråkene er inkludert i pakken.

Det er viktig å bemerke at begge programmene kan i stor grad tilpasses med egen kode, og også kommersielle tredjepartsmoduler. Dette vil si at en del av ulempene nevnt spesielt for Visual Components ikke trenger å være absolutt. Likevel er det liten kan man si at DELMIA har betydelig mer innebygget funksjonalitet, og uten tillegg og egen tilpassing vil være det sterkeste programmet.

Det er flere motiver til å gå over til robotisert sveising. I tillegg til innsparinger i menneskelig arbeidskraft kan også effektiviteten økes, og dermed også produktiviteten. Fra testingen i Finspång kan man se at en robot kan sveise med tykkere tråd og høyere strøm. Dette gjør at man kan øke hastigheten, og også at antall lag i en lagvis søm kan reduseres. Man ser også at robotens evne til å takle overganger mellom ulike typer sømmer gjør at en robot kan sveise mer kontinuerlig enn ved manuell sveising. Dette er mye grunnet at roboten kan justere sveiseprogram og hastigheter samtidig som den sveiser, men også grunnet robotes evne til å repetere samme bevegelsen.

Det er vist at geometri har mye å si for effektiviteten og at en utforming tilpasset robotisert sveising har mye å si for hvor effektiv man kan programmere roboten i en produksjonsprosess. Standardisering av geometri gjør at man kan kjøre samme programmet på flere sveiser, og dermed også i større grad automatisere programmeringen.

5.1 Fremtidig arbeid

Sveising med roboter er ikke noe nytt tema, men det er en del ting som bør undersøkes videre når det gjelder robotisert sveising av aluminium. Også selve programmeringsbiten er et område som bør sees på.

For at robotisert sveising på denne måten skal være effektivt bør programmeringen skje så effektivt som mulig. Dette vil si at en større grad av automatisert programmering der man, med utgangspunkt i posisjonen til sveisefugene, kan generere robotprogrammet med minst mulig grad av manuelt arbeid.

Et annet tema med aluminium er oksidering og urenheter som må fjernes før sveising. Dette må gjøres manuelt før arbeidet, og bør ideelt sveises innen to timer etter rengjøring for å unngå at nytt oksidasjonssjikt dannes. En automatisering av denne prosessen med mulig bruk av laser vil gjøre at prosessen blir mindre avhengig av manuell fjerning underveis i prosessen. Spesielt på store sveisejobber som skottet beskrevet i denne oppgaven vil en robotiserig av denne oppgaven være nyttig da roboten ikke vil rekke alle sveisene før et nytt oksidasjonssjikt dannes.

Referanser

[1] Bjørn Pedersen. *Aluminium. I Store norske leksikon.* Apr. 2018. URL: https://snl.no/aluminium (Hentet 05.12.2018).

[2] Jon Englund. «Structural strength of work boats and high speed crafts with floating frames». Masteroppg. KTH Centre for Naval Architecture, des. 2009.

[3] Lars Johan Mong. «Structural strength of work boats and high speed crafts with pre-fabricated, floating panels in aluminum». Masteroppg. Norwegian University of Science og Technology, jun. 2011.

[4] Leirvik AS. *About us. leirvik.no.* URL: https://leirvik.com/about-us/ (Hentet 10.06.2019).

[5] Paul Kah mfl. «Applicability of Robotic Welding for Aluminum Boat Manufacturing». I: *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 8.1 (2014). ISSN: 2532-5655.

[6] Einar Halmøy, Almar Almar-Næss og Tor John Rødsås. *Sveising. I Store norske leksikon.* Nov. 2017. URL: https://snl.no/sveising. (Hentet 08.12.2018).

[7] Almar Almar-Næss. *Sveiseforbindelser. I Store norske leksikon.* Nov. 2017. URL: https://snl.no/sveising. (Hentet 03.06.2019).

[8] L.M. Volpone og S Mueller. «Joints in light alloys today: The boundaries of possibility». I: *Welding International* 22 (sep. 2008), s. 597–609. DOI: 10.1080/09507110802411518.

[9] P Kah. «Automation of Aluminum Alloy Welding». I: *RESEARCH 2013 (ICMER 2013)* (2014), s. 145.

[10] Muyiwa Olabode, Paul Kah og Jukka Martikainen. «Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection». I: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 227.8 (2013), s. 1129–1137. ISSN: 0954-4054.

[11] Timothy P Quinn. «Process sensitivity of GMAW: aluminum vs. steel». I: *Welding Journal* 81.4 (2002), 55s–60s.

[12] W Oates og American Welding Society. *Welding handbook : Vol. 3 Part 1 : Materials and applications.* eng. Miami, FL, 1996.

[13] Paul Kah, Esa Hiltunen og Jukka Martikainen. «Sensing in Aluminum Alloy Welding». I: *Advanced materials research* 849 (2013), s. 291–297. ISSN: 1022-6680.

[14] Xizhang Chen mfl. «Practical method to locate the initial weld position using visual technology». I: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30.7 (okt. 2006), s. 663–668. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-005-0104-z.

[15] Chongjian Fan, Fenglin Lv og Shanben Chen. «Visual sensing and penetration control in aluminum alloy pulsed GTA welding». I: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42.1 (mai 2009), s. 126–137. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-008-1587-1.

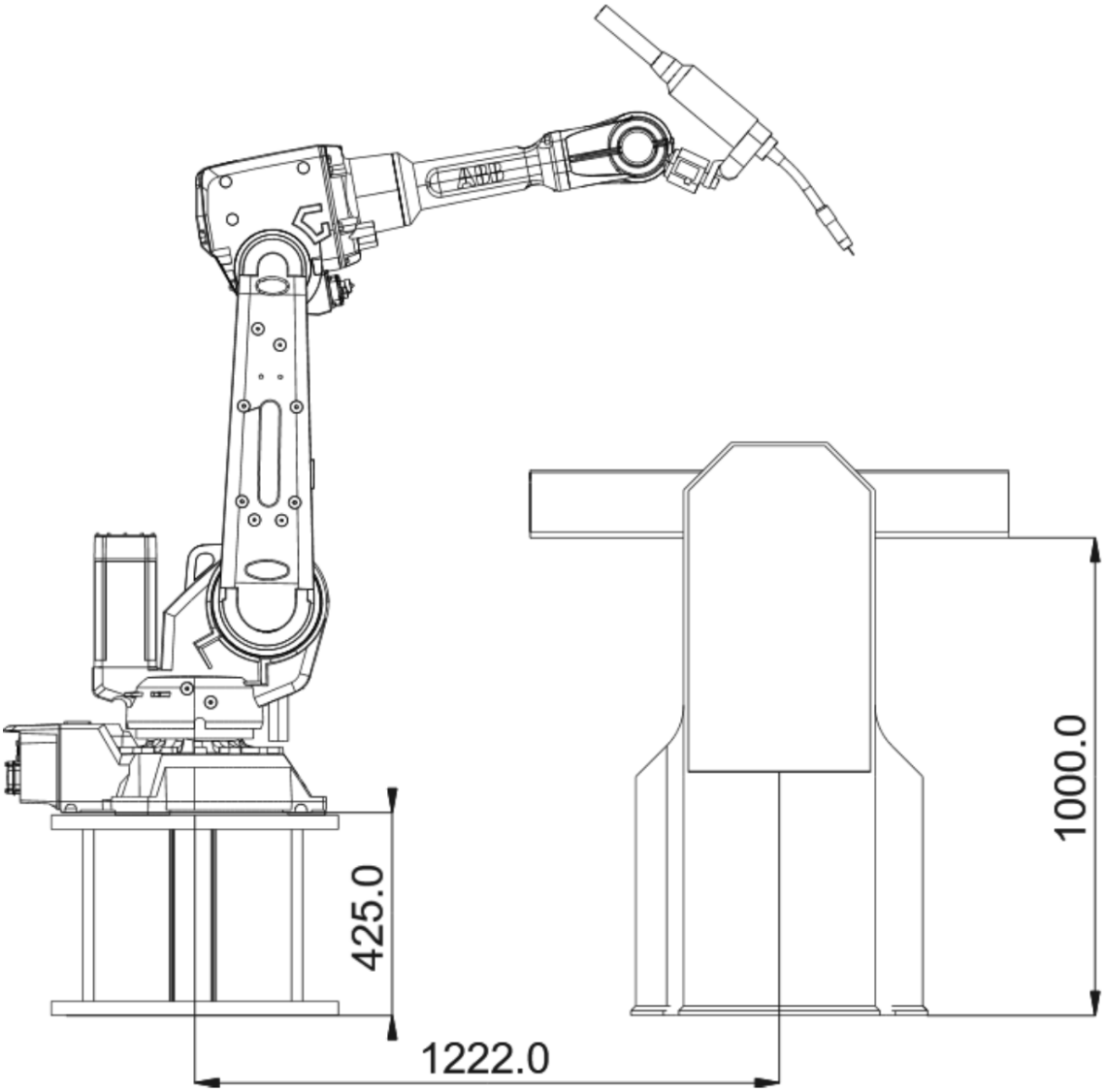
[16] Jawad Muhammad, Halis Altun og Essam Abo-Serie. «Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding». I: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88.1 (jan. 2017), s. 127–145. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-016-8707-0.

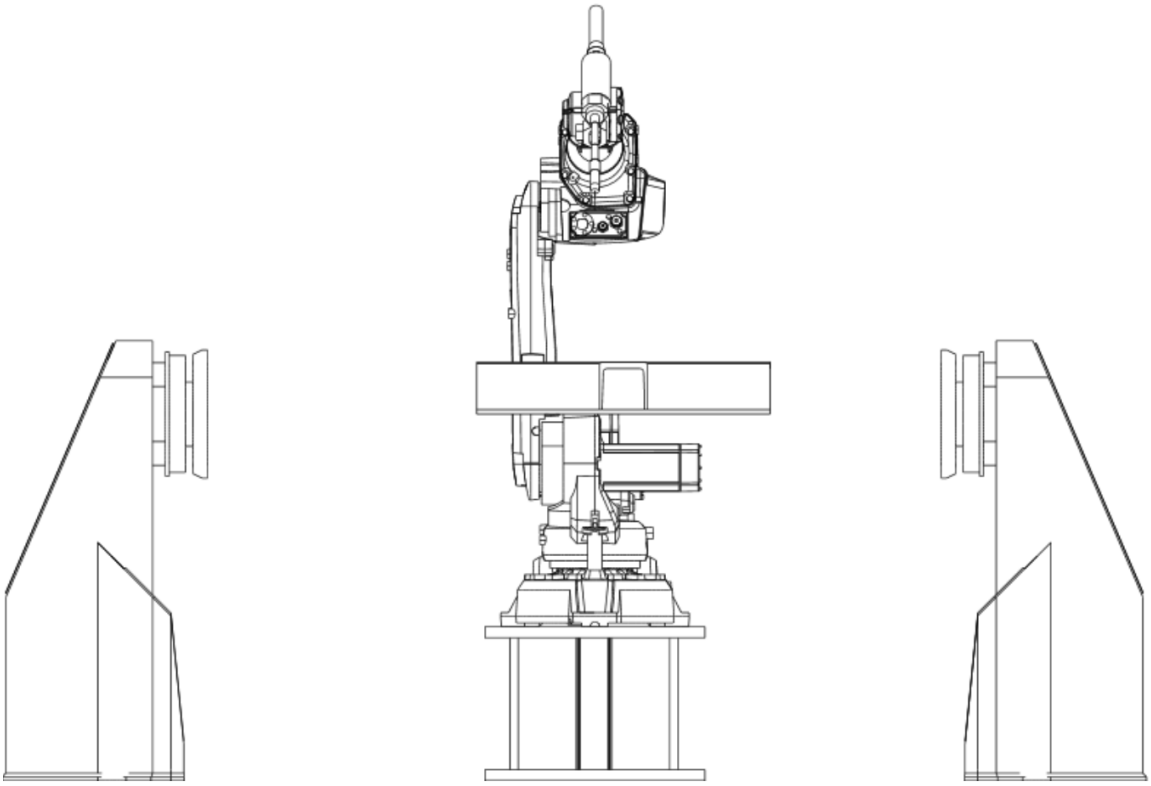
[17] K.Larsen og A. Bjørkedal. «Robotic Assembly Using 3D and 2D Computer Vision». Masteroppg. Norwegian University of Science og Technology, jun. 2016.

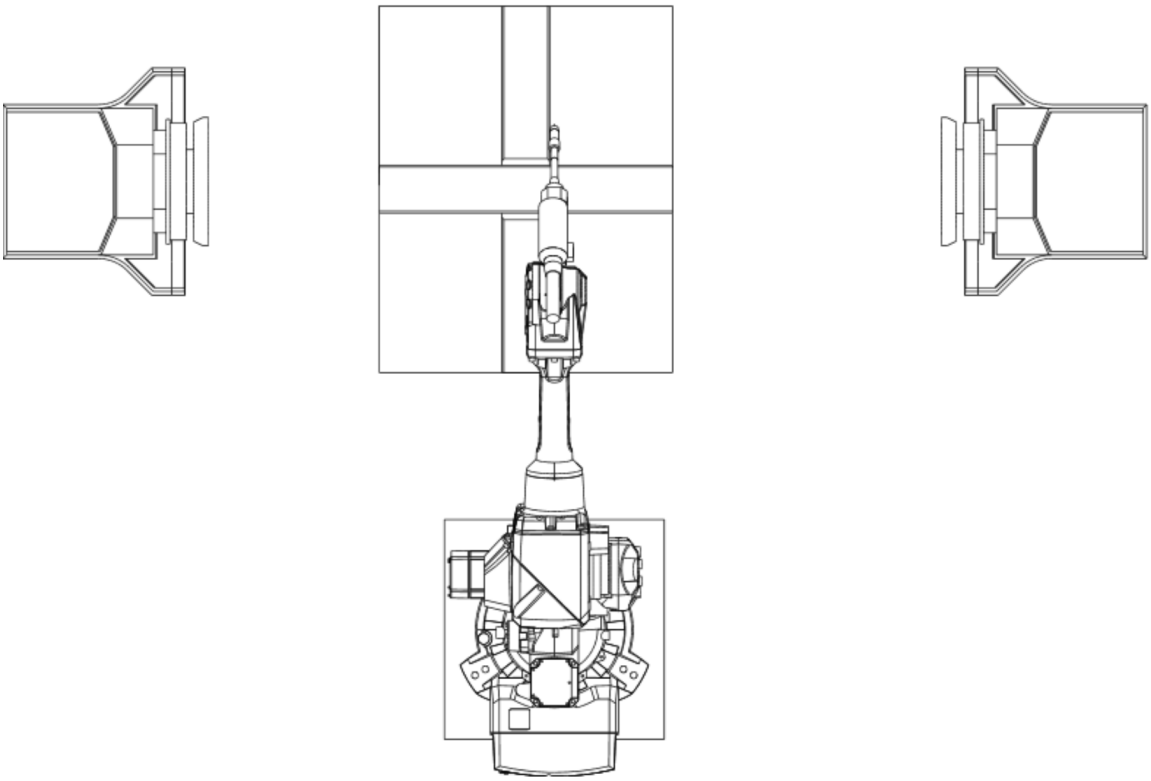
[18] M.Grifftun. «Robotic Assembly of Power Electronics». Masteroppg. Norwegian University of Science og Technology, jun. 2017.

[19] Rolf Bernhardt, Gerhard Schreck og Cornelius Willnow. «The Realistic Robot Simulation (RRS) Interface». I: *IFAC proceedings volumes* 27.4 (1994), s. 321–324. ISSN: 14746670.

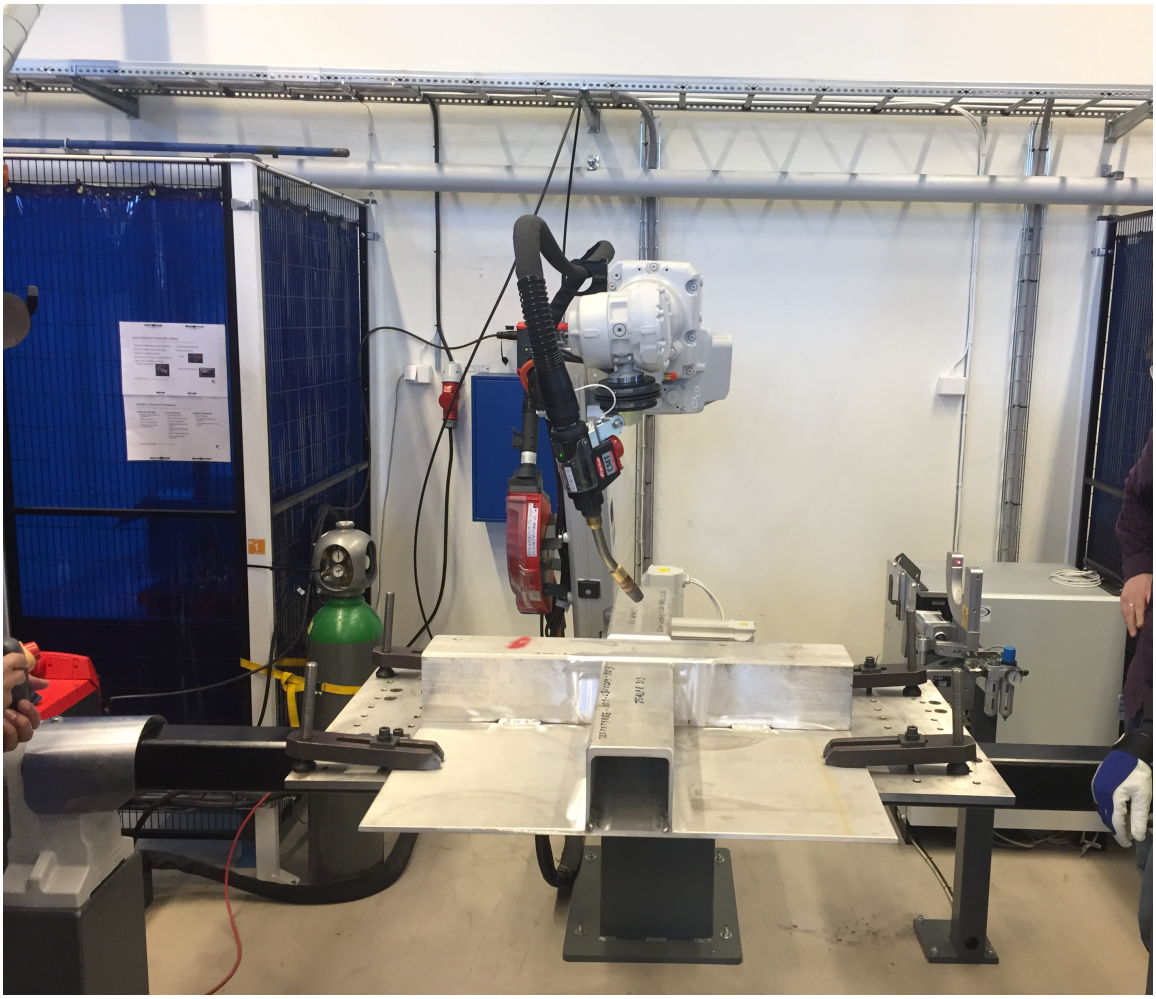
A Oppsett testing

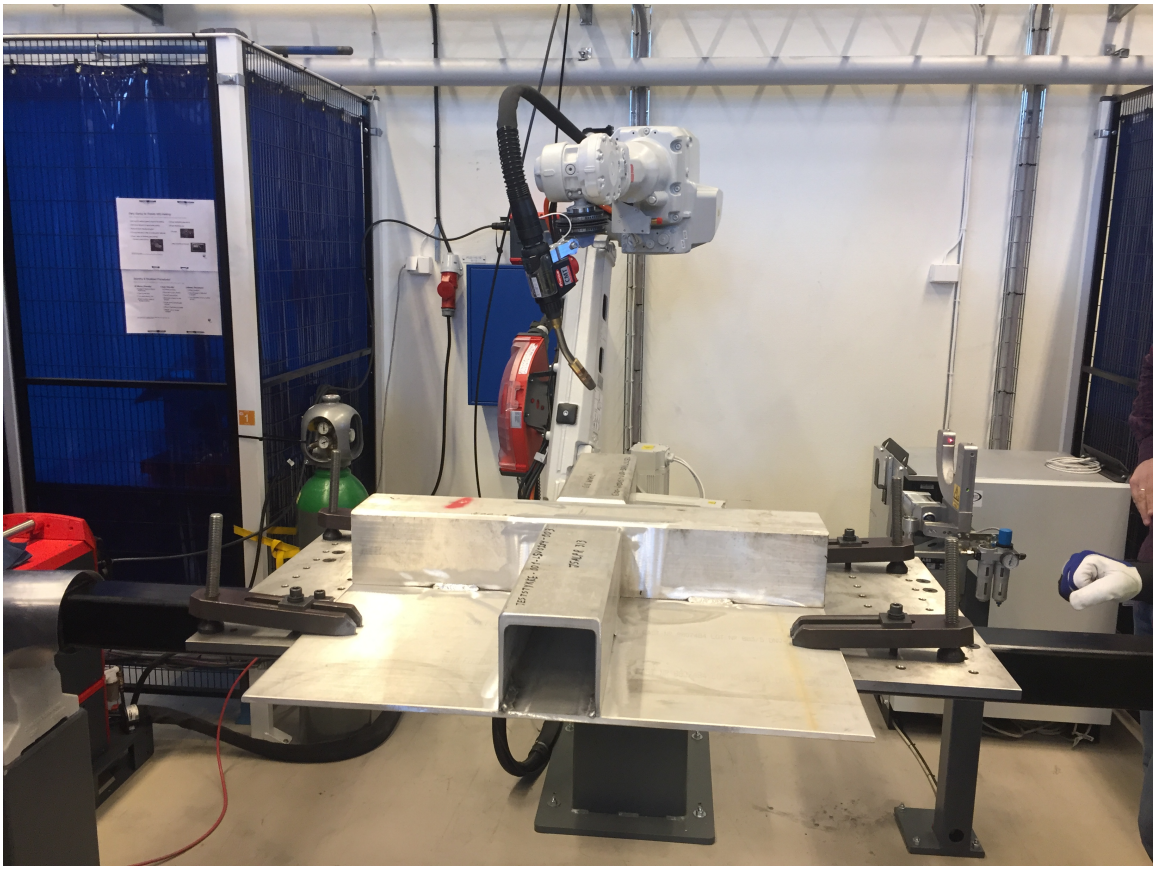


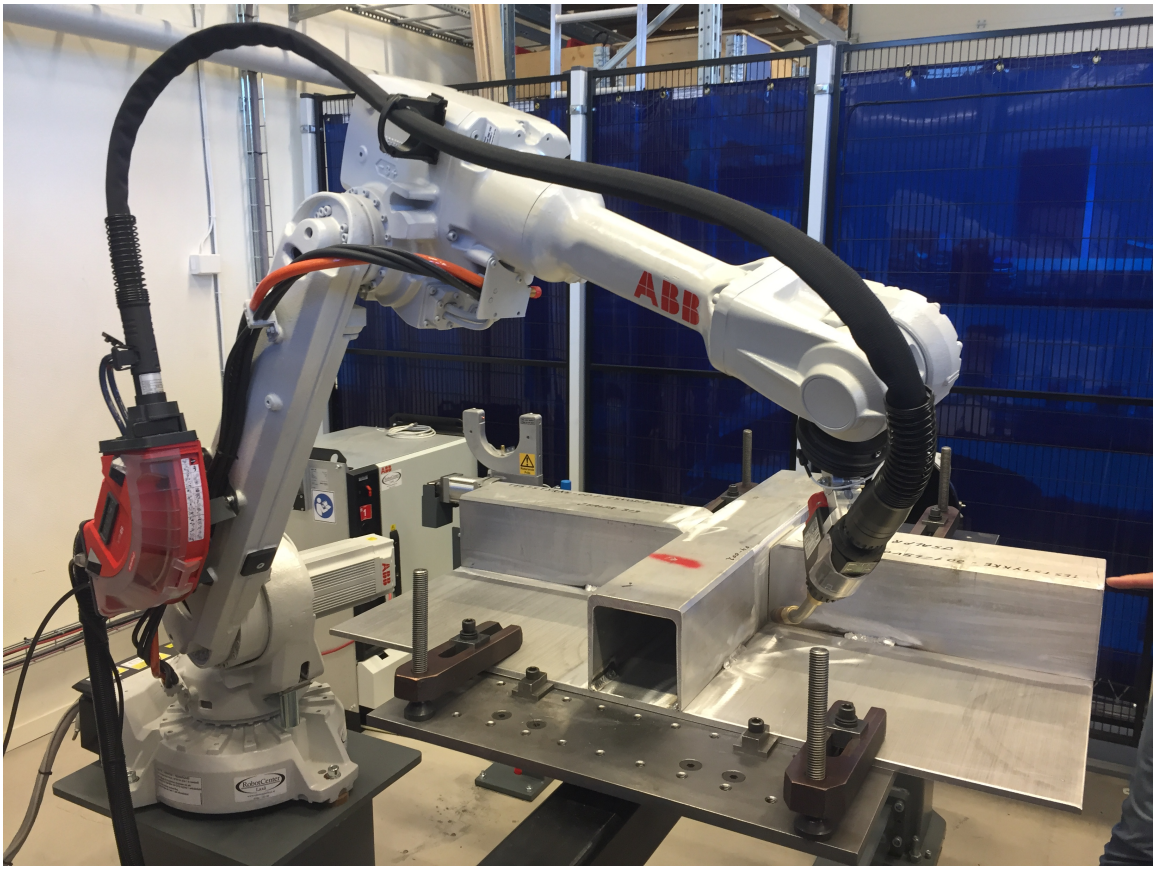




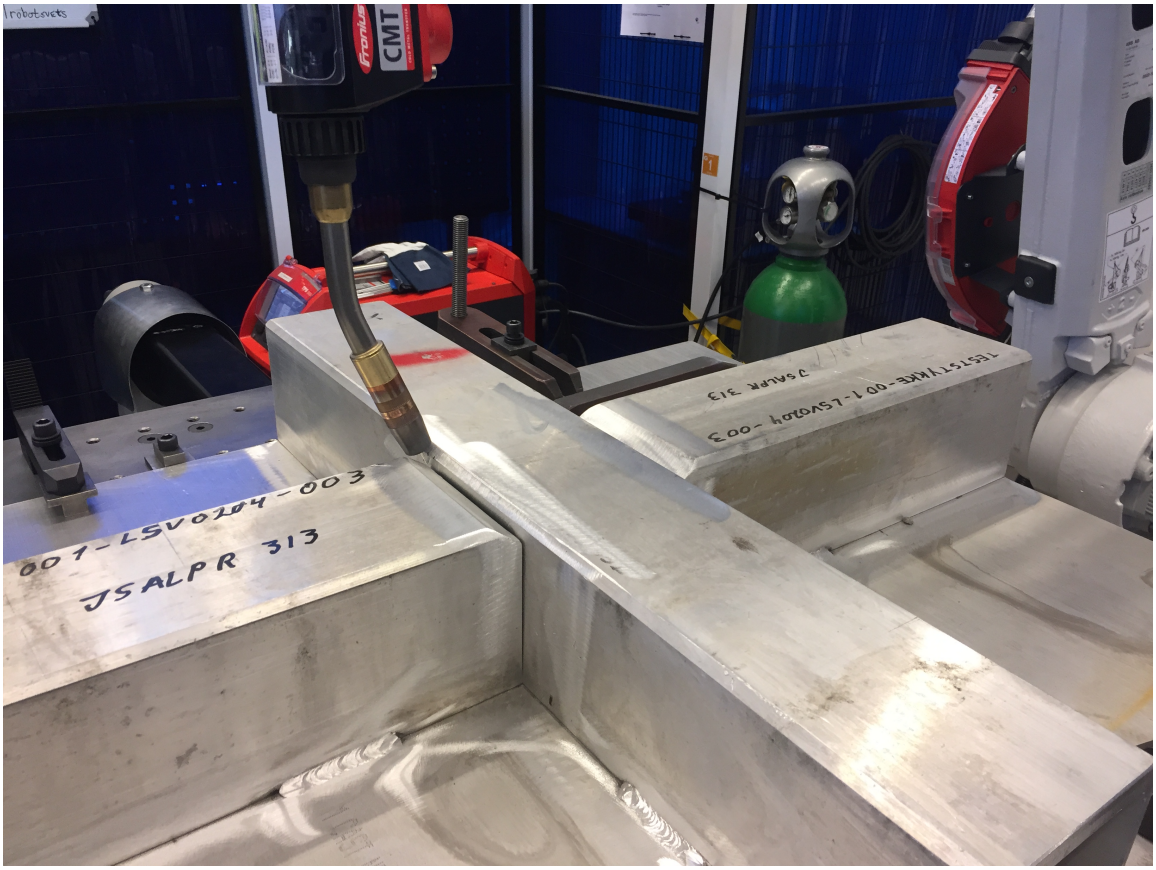
B Bilder testing







ABB


robotevets
Fronius
CMT
001-LSV0104-003
JSALPR 313

TESTSTYKKE-001-LSV0204-003
JSALPR 313
TESTSTYKKE-001-LSV0204-003
JSALPR 313

~11:20
003
-40

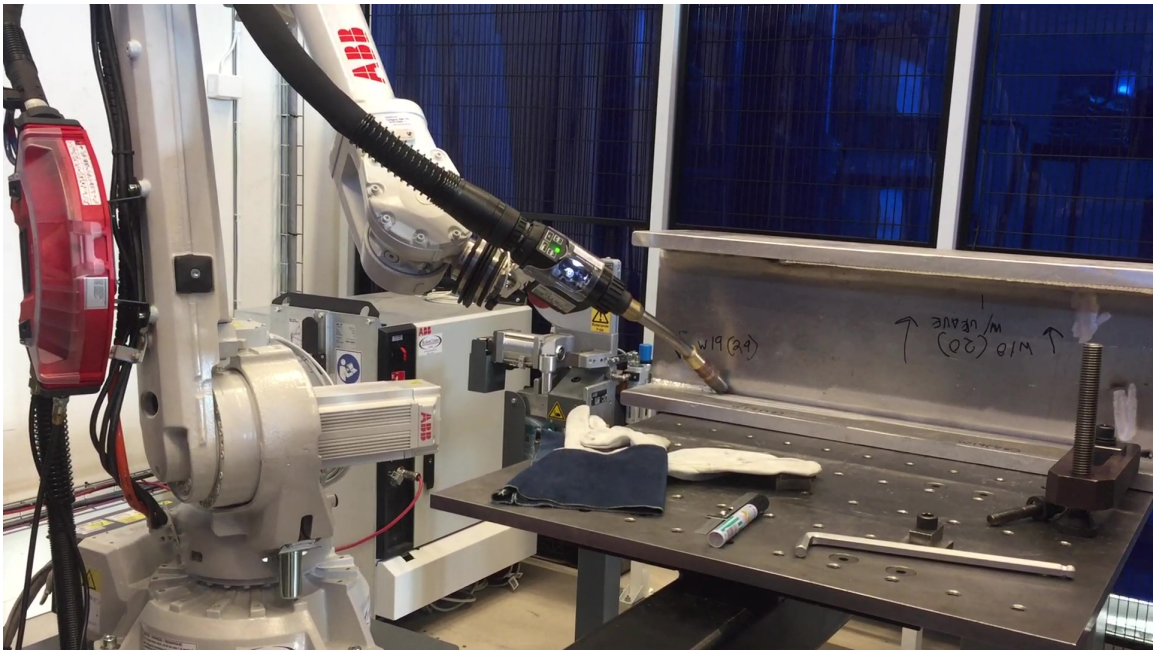


ABB
W19(24)
W10 (20)
W/ LEAVE

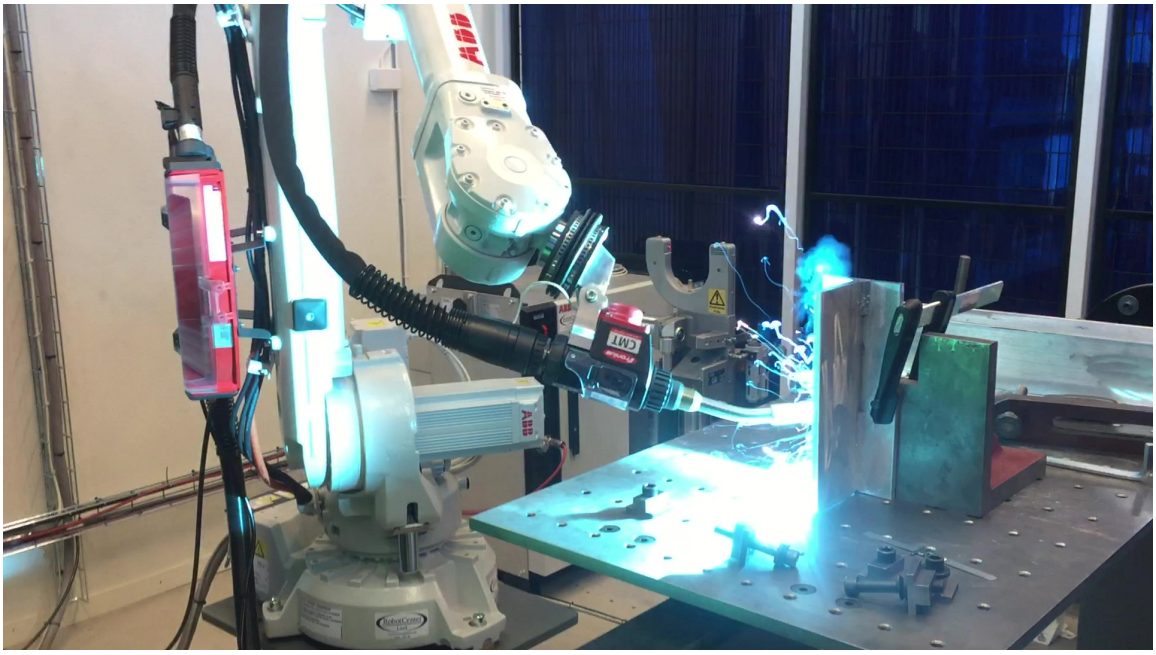
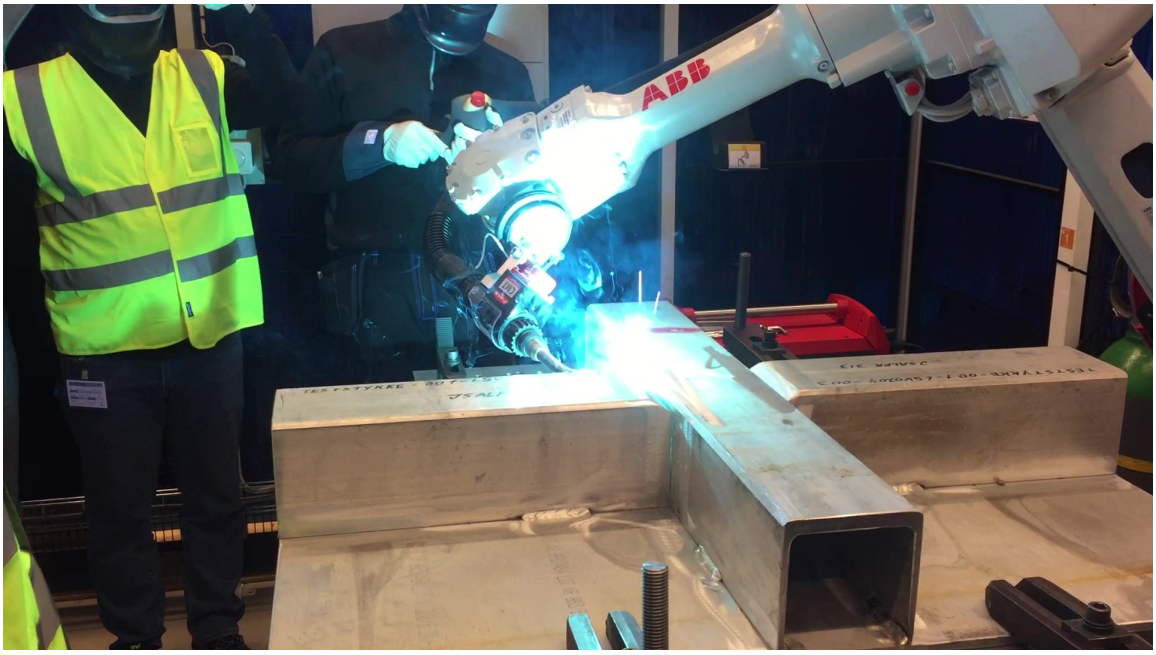


ABB
CMT



ABB

C Spesifikasjoner IRB2600

Utdrag fra datablad IRB2600-12/1.85[10]

[10] https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0142EN_B&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

—

Specification

Robot version	Reach (m)	Handling capacity (kg)	Wrist torque (Nm) Axis 4 & 5	Axis 6
IRB 2600-20/1.65	1.65	20	6.3	16.7
IRB 2600-12/1.65	1.65	12	1.8	10
IRB 2600-12/1.85	1.85	12	1.8	10
Number of axes	6+3 external (up to 36 with MultiMove)			
Protection	Standard IP67; optional FoundryPlus 2			
Mounting	Floor, wall, shelf, tilted, inverted			
Controller	IRC5 Single Cabinet			

—

Performance (according to ISO 9283)

	Position repeatability	Path repeatability
IRB 2600-20/1.65	0.04 mm	0.13 mm
IRB 2600-12/1.65	0.04 mm	0.14 mm
IRB 2600-12/1.85	0.04 mm	0.16 mm

—

Technical information

Electrical Connections	
Supply voltage	200-600 V, 50/60 Hz
Energy consumption	3.4 kW
Physical	
Robot base	676 x 511 mm
Robot height	
IRB 2600-20/1.65	1382 mm
IRB 2600-12/1.65	1382 mm
IRB 2600-12/1.85	1582 mm
Robot weight	
IRB 2600-20/1.65	272 kg
IRB 2600-12/1.65	272 kg
IRB 2600-12/1.85	284 kg
Environment	
Ambient temperature for mechanical unit	
During operation	+5°C (41°F) up to +50°C (122°F)
During transportation and storage	–25°C (13°F) up to +55°C (131°F)
During short periods (max. 24 h)	up to +70°C (158°F)
Relative humidity	Max. 95%
Noise level	Max. 69 dB (A)
Safety	Double circuits with supervision, emergency stops and safety functions, 3-positions enable device.
Emission	EMC/EMI-shielded
Options	Foundry Plus 2

Data and dimensions may be changed without notice.

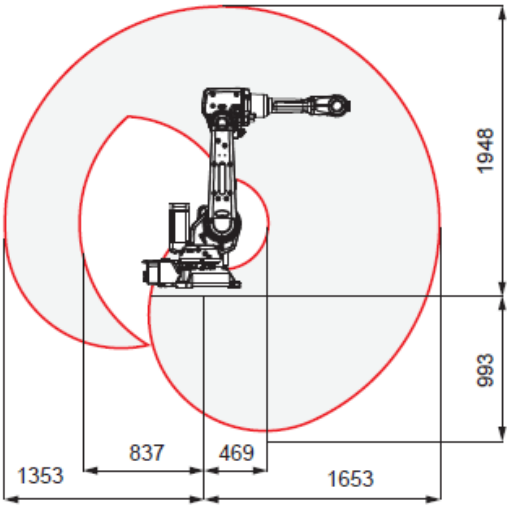
—

Movement

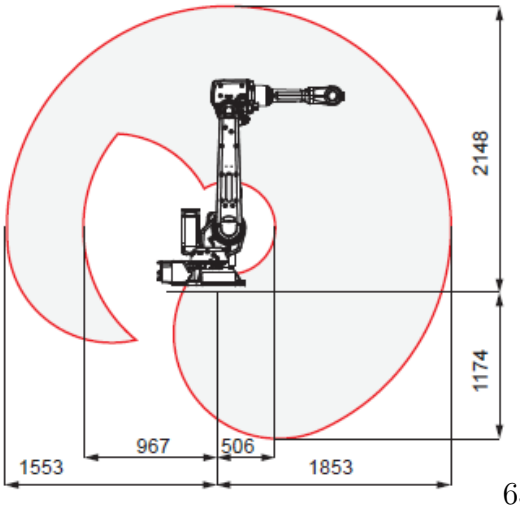
Axis movement	Working range	Axis max speed
Axis 1 rotation	+180° to -180°	175°/s
Axis 2 arm	+155° to -95°	175°/s
Axis 3 arm	+75° to -180°	175°/s
Axis 4 rotation	+400° to -400° Max. rev: +251 to -251	360°/s
Axis 5 band	+120° to -120°	360°/s
Axis 6 turn	+400° to -400° Max. rev: + 274 to - 274	500°/s

A supervision function prevents overheating in applications with intensive and frequent movements.

Working range, IRB 2600-20/1.65, IRB 2600-12/1.65



Working range, IRB 2600-12/1.85



NTNU

Kunnskap for en bedre verden