



**CHALMERS**



# Bilfabrikens monteringsstation

Uppbyggnad av produktionscell  
Kandidatarbete inom Maskinteknik  
IMSX15-22-11

Karl Janestad  
Albin Jonsson  
Edvin Thorstensson  
Eskil Thulin

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP  
PRODUCTION SYSTEM LABORATORY**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



## Sammandrag

En ökande grad av automation i samhället kräver både forskning och utveckling av metoder, strategier samt verktyg för att framtidens fabriker skall klara av att producera produkter både på ett säkert och effektivt sätt. Detta projekt är givet av *Institutionen för Industri och Materialvetenskap* på Chalmers Tekniska Högskola. Bilfabriken är ett kollaborativt projekt som är delat mellan tre kandidatarbetsgrupper.

Genom att använda plattformen 3DEXPERIENCE, som på senare tid har börjat användas hos flera stora svenska företag såsom Volvo, Scania, SAAB, ABB och SKF, kommer grupperna att gemensamt arbeta mot målet som är att skapa en produktionscell där en nedskalad bilkaross skall monteras på ett sätt som efterliknar punktsvetsning. Gruppens roll är att fysiskt bygga stationen där flera robotar kommer användas för att montera bilen. Några av gruppens centrala områden inkluderar programmering av styrsystem, sensorer, ihopfogningsmetoder, inmätning, samt tillverkning av robotverktyg, verktygsställ och fixturer.

Genom förbindelsen mellan de tre grupperna och arbetet över den kollaborativa plattformen 3DEXPERIENCE, skapas en värdefull samarbetsstruktur som ger många fördelar och stor flexibilitet. Det ger även möjlighet till att jobba virtuellt i form av en digital tvilling. Projektet efterliknar också till viss del den arbetsstruktur som kan observeras ute i industrin vilket skapar ett realistisk förhållningssätt till uppdraget.

## **Abstract**

An increasing degree of automation in society requires both research and development of methods, strategies and tools for the factories of the future to be able to produce products both in a safe and efficient manner. This project is given by *Department of Industry and Materials Science* at Chalmers University of Technology. Bilfabriken is a collaborative project that is divided between three bachelor groups.

By using the 3DEXPERIENCE platform, which several large Swedish companies such as Volvo, Scania, SAAB, ABB and SKF has begun to implement, the groups will work together towards the goal of creating a production cell where a scaled-down car body will be mounted in a way which mimics spot welding. The role of this group is to physically build the station where several robots will be used to assemble the car. Some of the central areas of the group include programming of control systems, sensors, joining methods, measurement, and design as well as manufacturing of robotic tools, tool racks and fixtures.

Through the connection between the three groups and the usage of the collaborative platform 3DEXPERIENCE, a valuable collaboration structure is created that provides many benefits and great flexibility. It also provides the opportunity to work virtually in the form of a digital twin. The project also to some extent mimics the work structure that can be observed in the industry which creates a realistic approach to the assignment.

## Förord

Projektet *Bilfabrikens monteringsstation* utförs av fyra studenter i samverkan med två andra kandidatgrupper under vårterminen 2022. Valet av kandidatarbete gjordes då gruppmedlemmarna alla var intresserade av att lära sig mer om vad som krävs i en fabrik för att möjliggöra automatiserad tillverkning. I gruppen finns tre studenter från avdelningen Maskinteknik och en från avdelningen Automation och Mekatronik på Chalmers. Vi vill tacka vår examinator Dr. Henrik Kihlman för att vi fått möjligheten lära oss mer inom dessa områden som intresserar oss genom att utföra detta examensarbete. Vi vill även tacka vår handledare Per Nyquist för hans vägledning under arbetets gång samt den kunskap han har delat med sig om inom de områden som var nya för oss. Avslutningsvis vill vi också tacka de andra två kandidatgrupperna inom Bilfabriken för ett väl fungerande samarbete och en bra gruppdynamik.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Begreppslista</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inledning</b>	<b>2</b>
2.1	Bakgrund	2
2.1.1	Varför automation?	2
2.1.2	Robotcell	3
2.1.3	Produktionssystemslaboratoriet (PSL)	3
2.2	Syfte och mål	4
2.2.1	Delmål	4
2.3	De andra gruppernas roll i samarbetet	4
2.4	Avgränsningar	5
<b>3</b>	<b>Teori</b>	<b>6</b>
3.1	Robotik	6
3.1.1	De olika koordinatsystemen	7
3.1.2	Tröghetsmoment	7
3.1.3	Kollisionskontroll	8
3.2	3D-utskrifter	8
3.3	Inmätning	8
3.3.1	Tool Center Point (TCP)	8
3.3.2	Precisionsmätning med Romer-mätarm	9
3.3.3	Inmätning med spetsverktyg	10
3.3.4	Minsta kvadratmetoden	10
3.4	De sex frihetsgraderna	11
3.5	Fixtur	12
3.5.1	Flexlink	12
3.5.2	Boxjoint	12
3.6	Infästningsmetod	13
3.7	3DXPERIENCE	13
3.8	Programmable logical controller (PLC) och kommunikation	14
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>16</b>
4.1	Förberedelse	16
4.1.1	Utbildning	16
4.1.2	Uppstartsprojekt	16
4.2	Genomförande	16
4.2.1	Programera och köra ABB-robotar	16
4.2.2	Bygga monteringscellen	17
4.2.3	Inmätning av station och verktyg	18
4.2.4	3D-utskrifter	18
4.2.5	Verktygsställ	18
4.2.6	Verktyg	19
4.2.7	3DEXPERIENCE	19
4.2.8	PLC och kommunikation	20

---

<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>21</b>
5.1	Ihopmontering av bil . . . . .	21
5.2	Verktyg . . . . .	22
5.2.1	Verktygsfäste . . . . .	22
5.2.2	Vakuumsugverktyg . . . . .	22
5.2.3	Gripklor . . . . .	23
5.2.4	Infästningsverktyg . . . . .	23
5.3	Verktygsställ . . . . .	24
5.3.1	Verktygsställ för stora roboten . . . . .	24
5.3.2	Verktygsställ för gripklor . . . . .	24
5.4	Ställ för delar . . . . .	24
5.5	Material . . . . .	25
5.6	PLC och kommunikation . . . . .	25
5.7	Monteringsstation . . . . .	26
5.8	Sensorer . . . . .	26
5.9	Låsning i alla led . . . . .	26
5.9.1	Skillnaden mellan digitala tvillingen och den verkliga monteringscellen . . . . .	26
5.9.2	Inmätningprecision . . . . .	27
5.9.3	Produktion av flera bilar . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>28</b>
6.1	Utvärdering av resultat . . . . .	28
6.2	Monteringsstation . . . . .	28
6.2.1	Överensstämmelse med digitala tvillingen . . . . .	28
6.2.2	Produktion av flera bilar . . . . .	29
6.3	Omvänd ingengörsmetodik (reverse engineering) . . . . .	29
6.3.1	Samarbete . . . . .	29
6.3.2	Infästningsmetod . . . . .	29
6.4	Inmätningstoleranser . . . . .	30
6.4.1	Spetsinmätning mot romerinmätning . . . . .	30
6.5	Styrkor och svagheter med arbetet . . . . .	30
6.5.1	Styrkor . . . . .	30
6.5.2	Svagheter . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Slutsats</b>	<b>31</b>
7.1	Återkoppling till syftet . . . . .	31
7.2	Montering . . . . .	31
7.3	Fixturer, verktygsställ och ställ för bildelar . . . . .	31
7.4	Infästningsmetod . . . . .	31
7.5	PLC och kommunikation . . . . .	32
7.6	Skillnader mellan digital tvilling och verklighet . . . . .	32
7.7	Förslag till fortsättningsarbete . . . . .	32
<b>8</b>	<b>Bilagor</b>	<b>35</b>
<b>A</b>	<b>Verktyg</b>	<b>35</b>

<b>B</b>	<b>Verktygsställ</b>	<b>38</b>
<b>C</b>	<b>Ställ för bildelar samt nitar</b>	<b>40</b>
<b>D</b>	<b>Sensorer och låsningar</b>	<b>44</b>



# 1 Begreppslista

- 3DEXPERINCE - Programvara som utgör en plattform med många olika program i sig, som skapats för att möjliggöra en helhetssyn i realtid av varje del i ett projekt.
- ABB - Ett svenskt företag inom bland annat automation och robotik. Robotar av företaget benäms ABB robotar.
- CAD - Computer Aided Design. Datorstöd för att konstruera och skapa modeller. Utifrån dessa kan exempelvis ritningar och simuleringar skapas.
- Degrees of freedom - Grader av frihet som delarna kan röra sig runt i x,y och z led.
- Digital tvilling - En digital modell av något som även existerar i verkligheten (exempelvis en bil).
- Digitala-tvillinggruppen - Grupp två som skall skapa en digital tvilling av fabriken.
- Flexpendant - Handhållen operatörsenhet till ABB-robotarna.
- Framing station - Monteringsstationen där bilen monteras.
- HMI - Human machine interface. Interaktiv styrenhet för maskinoperatörer.
- Karossverkstadsgruppen - Grupp ett som skall skala ner samt printa ut karossen.
- Ladder-kod - Programspråk som används i PLC.
- Monteringsstationsgruppen - Grupp tre som skall konstruera stationen där bilen byggs.
- Offline-programering - Programmering av robot utan att vara uppkopplad till robotsystemet.
- Online-programering - Programmering av robot när man är uppkopplad till robotsystemet.
- PLC - Programmable logic controller. Styrsystem som används inom automation för att kontrollera och reglera processer.
- PSL - Produktionssystemslaboratoriet. Chalmerslokal där den fysiska monteringsstationen återfinns
- Rack - Ett samlingsnamn för ställ av delar
- Schunk - Robotens infästningsmodul som ansluter robotarmen med ett verktyg.
- TCP - Tool Center Point. Koordinaterna för verktygsspetsen i förhållande till kopplingen mellan robot och verktyg.
- Touch up - Uttryck som syftar till att uppdatera en position.
- Work object - Ett lokalt koordinatsystem som roboten kan arbeta utifrån.

## 2 Inledning

Automation är idag något som ofta kan ses ute i industrin. Enligt International Federation of Robotics har antalet installerade operationella industrirobotar ökat exponentiellt sedan 2009 (IFR, 2020), se figur 1. Exempelvis inom bilindustrin kan det finnas potential att investera i automation för repetitiva uppgifter som skall utföras i hög hastighet. Detta kandidatarbete går ut på att modellera och konstruera en monteringsstation för karossen till en miniatyrbil för att få en förståelse för utmaningarna och möjligheterna som är associerade med automatiserad produktion.

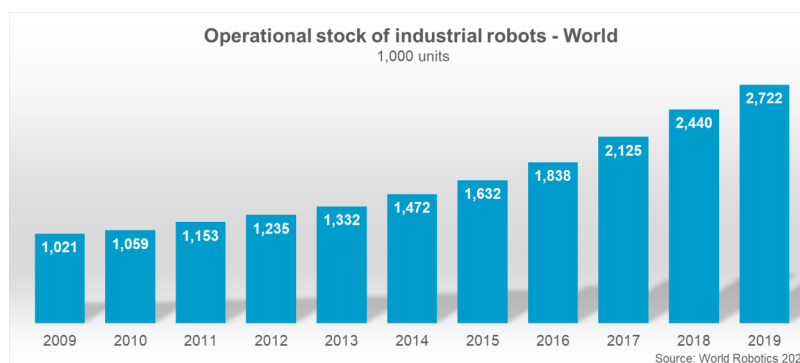
### 2.1 Bakgrund

Det har genomförts tidigare kandidatarbeten inom samma områden som delvis kunde användas som underlag till bilfabrikens projekt. Det fanns en produktionscell i programvaran 3DEXPERIENCE samt en inmätt fysisk monteringsstation som gick att använda för att komma igång med projektet. Gruppen benämns "Bilfabrikens Monteringsstation" och jobbar tillsammans med två andra kandidatgrupper, "Bilfabrikens Digitala Tvilling" samt "Bilfabrikens Karosverkstad". Kandidatgrupperna arbetar tillsammans med uppgiften att tillverka och montera en nedskalad och förenklad modell av en bilkaross. Utifrån de två andra gruppernas arbete i 3DEXPERIENCE genomfördes "Bilfabrikens Monteringsstation" för att kunna verifiera verklighetsförankringen i deras modeller och göra en slutlig montering av den nedskalade bilen.

#### 2.1.1 Varför automation?

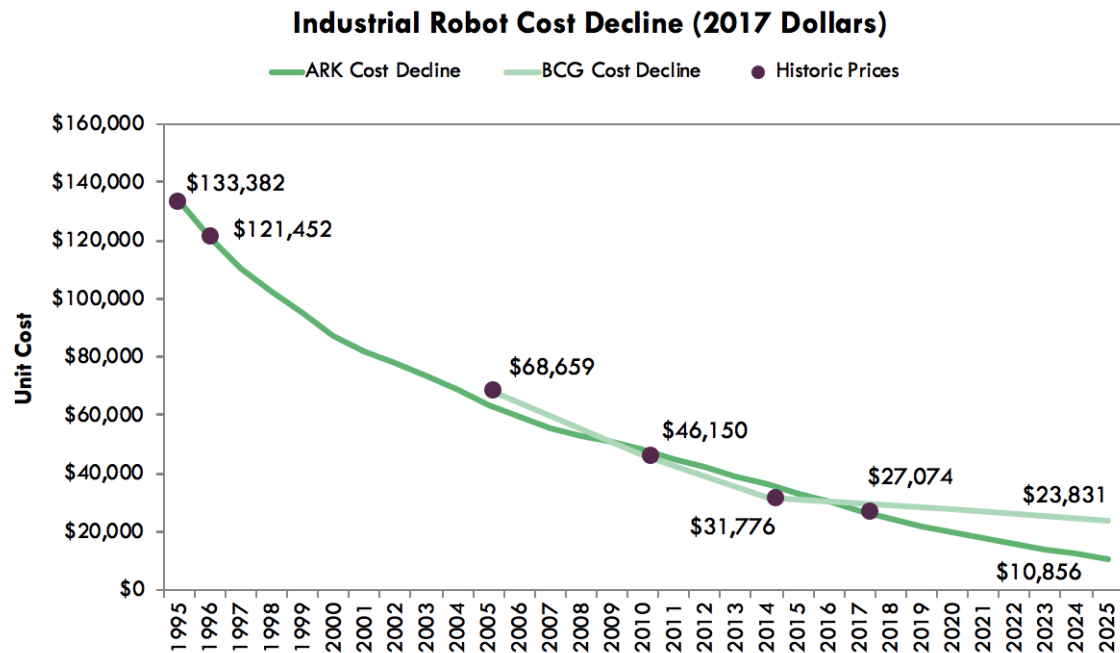
Automation med robotar är idag en växande trend inom tillverkningsindustrin och ökar i världen för varje år, se figur 1 (IFR, 2020). Enligt The Manufacturer, 2022 har en analys av tillverkningsindustrin i Storbritannien visat att hela 17,5 procent av jobben har en potential att bli automatiserade fram till år 2026. Vilket ytterligare visar på att automation kommer att användas mer inom tillverkningsindustrin framöver.

Figur 1: Årlig ökning av robotar i världen mellan åren 2009 till 2019



Samtidigt som användningen av robotar ökar minskar genomsnittspriset för robotar i världen, se figur 2 (Korus, 2019). Här kan man se de historiska priserna från 1995 och prognosen fram till 2025 av ARK och BCG. Det minskande priset kan ses som en av anledningarna till att robotar i industrin och automation ökar i snabb takt.

Figur 2: Styckpris för en robot med prognoser fram till år 2025.



### 2.1.2 Robotcell

För att projektet ska kunna genomföras både genom en digital tvilling och fysiskt behövs en robotcell byggas i verkligheten. Detta inkluderar att bygga cellens ramkonstruktion av Boxjoint och Flexlink som beskrivs närmare i avsnittet teori, se avsnitt 3.5.2 samt avsnitt 3.5.1. Projektet omfattar även att montera sensorer i cellen och bygga olika typer av ställ och fixturer till verktyg och bildelar. På robotcellen ställs krav på att allting är fullständigt fixerat, detta så att inget rör sig utan att systemet tar med det i sina beräkningar.

### 2.1.3 Produktionssystemslaboratoriet (PSL)

Chalmers Tekniska Högskola har ett befintligt laboratorium där projektgruppen kommer utföra de fysiska momenten för inmätning, tillverkning av fysisk cell och montering av den nerskalade bilkarossen. I laboratoriet återfinns de robotar som listas i 3.1 samt PLC systemet som introduceras i 3.8. På plats finns även en mindre verkstad med diverse verktyg som möjliggör att modifiera samt bygga enklare prototyper.

## 2.2 Syfte och mål

Syftet med projektet "Bilfabrikens monteringsstation" är att gruppen under läsperiod tre och fyra år 2022 skall genomföra ett projekt som ska efterlikna den monteringsprocess som sker i en bilfabrik, men i mindre skala. Slutmålet för gruppen är att tillsammans med de två andra kandidatgrupperna skapa en fabriksmiljö där en nerskalad kaross skall monteras autonomt på ett säkert sätt. Denna process skall genomföras ur ett verklighetstroget perspektiv i så hög utsträckning som möjligt med de verktyg som finns att tillgå. Detta innebär att infästningsprocessen, fixering av komponenter och verktygsbyten inte får innehålla några manuella moment.

### 2.2.1 Delmål

För att kunna följa de framsteg som gruppen tar har följande delmål satts upp:

- Alla delar som bearbetas av robotar skall vara låsta i alla led. Det realiseras med hjälp av verktyg och styrningar i monteringsbasen.
- Flera ABB robotar skall samarbeta för att autonomt montera bilkarossen. I monteringsstationen finns det tillgång till fyra stycken robotar i olika storlekar. Målet är att använda alla fyra, men gruppen kommer inte använda flera robotar än det finns behov av.
- De verktyg som är nödvändiga för att robotarna skall kunna lösa tilldelad uppgift skall vara konstruerade av gruppen. Detta görs med komponenter som antingen köps in av handledaren eller finns tillgängliga i laboratoriet från tidigare kandidatarbeten.
- Robotarna skall genomföra verktygsbyten autonomt för att öka automationsgraden i monteringsprocessen.
- Robotarnas agerande skall stämma överens med den digitala tvillingen. Bra kommunikation krävs med gruppen som hanterar den digitala tvillingen av bilen.
- Om möjligt skall produktionen skalas upp med flera bilar på rad utan driftstopp. Detta inkluderar då transportband för prototypdelar, utflödet av färdiga prototyper och en stor mängd verktygsbyten.
- Monteringsytan skall vara utrustade med sensorer och givare som skall styra robotarnas agerande.

## 2.3 De andra gruppernas roll i samarbetet

I projektet samarbetar tre olika grupper. Gruppernas namn är bilfabrikens digitala tvilling, monteringsstation och karossfabrik. Digitala-tvillinggruppen ska ta fram en digital tvilling av bilfabriken med hjälp av programvara i 3DEXPERIENCE. En digital tvilling är en digital version av bilfabriken med alla delar, fixturer, robotar och verktygsställ. Gruppen som arbetar med den digitala tvillingen ska också skapa en simulering av monteringsprocessen genom att offline-programmera robotarna som sedan används för att montera ihop bilen. Det görs med hjälp av programvara från 3DEXPERIENCE. Slutligen ska gruppen också konstruera delar av den utrustning som behövs. Karossverkstadsguppen arbetar med konstruktion av bilkarossen med hjälp av CatiaV6 i 3DEXPERIENCE och de hjälper även till med konstruktionsarbetet av robotutrustning som verktyg med mera. Delarna tillverkas i stor utsträckning av plast med hjälp av 3D-skrivare.

## 2.4 Avgränsningar

- Antalet komponenter som ska monteras ihop får inte överskrida en nivå som gör komplexiteten ej hanterbar.
- Koden för robotarna ska genereras av digitala tvillinggruppen.
- PLC-programmet ska ha enkel struktur och inte bli överarbetat. Det vill säga att fokus inte ska ligga på att göra ett komplicerat PLC-program, utan PLC:n används som hjälp för att ihopmonteringen sker på ett säkert och kontrollerat sätt.
- Infästningsmetoden ska inte innehålla någon form av svetsning.
- I robotcellen får inga metoder som skapar spill, kladd, gaser eller skräp användas. Exempelvis borrar, limning eller uppvärmning. Detta för att robotarna eller elektronik inte skall ta skada.

### 3 Teori

I följande avsnitt presenteras den teori som är grunden till projektet och krävs för att förstå det arbete som genomförts.

#### 3.1 Robotik

För att genomföra en slutlig montering av en nedskalad bil kommer fyra stycken robotar användas som finns tillgängliga i PSL, se 2.1.3. I detta projekt används uteslutade ABB robotar i tre olika storlekar, se figur 3a, 3b och 3c. De tre robotorna skiljer sig åt i egenskaper som exempel räckvidd och maximal lyftkapacitet, se Tabell 1. Robotarna benämns hädanefter lilla, mellanstora och stora roboten. Datan i tabell 1 kommer från ABB's hemsida (ABB, 2022d), (ABB, 2022c), (ABB, 2022b).

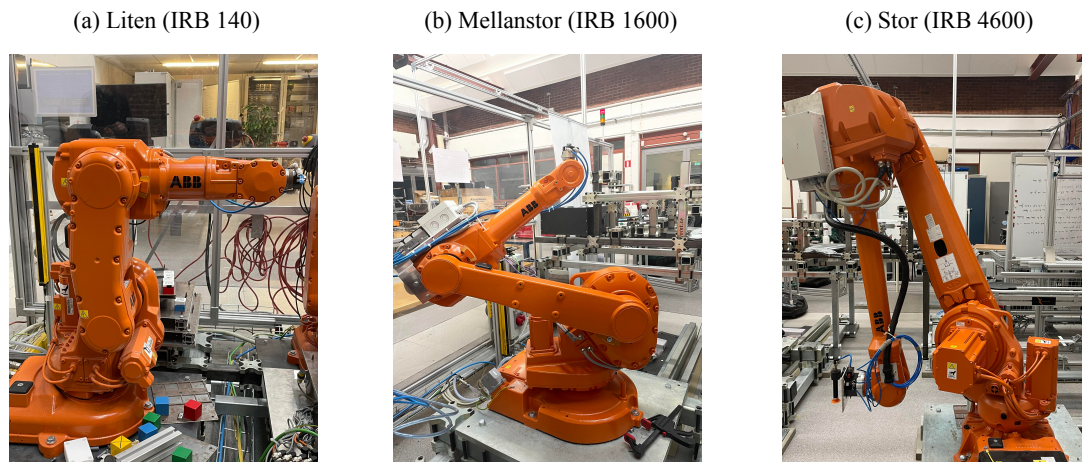
Tabell 1: *Modeller robotar*

Storlek	Stora	Mellanstora	Lilla
Variant	IRB 4600 M2004	IRB 1600 M2004	IRB 140 M200
Modell	IRB 4600-40/2.55	IRB1600-8/1.45	IRB140IRB140
Skydd	Standard	Standard	Standard
Räckvidd	2,55 [m]	1.45 [m]	0.810 [m]
Maxlast nyttolast	40 [kg]	8.5 [kg]	6 [kg]

Robotarna som används styrs med hjälp av en kontrollenhet som heter flexpendant. På flexpendanten visualiseras bland annat robotens position, Rapidkoden och olika inputs och outputs med en informationsdisplay. Kontrollern används för exempelvis manuell körning, inmätning, kalibrering av verktyg och punkter samt att online-programmera roboten. Det innebär att man manuellt använder sig av kontrollern för att programmera rörelsebanor, punkter och kommandon. Den manuella körningen tillåter då endast en hastighet av 250 mm per sekund till skillnad från det automatiska läget då 2500 mm per sekund tillåts.

Programmeringen av roboten görs med programmeringsspråket Rapid som är språket ABB har skapat för att styra ABB-robotarna. För att styra manipulatern, det vill säga själva roboten, används kinematik. Kinematiken är hur det bestämda koordinatsystemet används för att beskriva både rotation och translation av robotens leder. Detta görs med hjälp av transformationsmatriser som multipliceras ihop vilket ger positionen av den sista leden i förhållande till exempelvis robotens baskoordinatsystem (Ben-Ari och Mondada, 2017). Robotarna använder även pneumatik för att fästa verktyg och för att använda verktygens funktioner, exempelvis suga tag i föremål eller aktivera olika verktyg som en gripklo eller ett sugverktyg. För pneumatiken används främst slangar i storleken 6mm och 4mm i diameter.

Figur 3: De tre olika robotmodellerna.



### 3.1.1 De olika koordinatsystemen

Det existerar olika koordinatsystem i robotcellen där de mest centrala presenteras här. Utgångspunkten är ett globalt koordinatsystem som ligger i hörnet av monteringscellen. I detta befinner sig robotarnas baskoordinatsystem. Varje robot har också i sin tur ett koordinatsystem i varje led. Slutligen finns det även ett koordinatsystem i sista leden där verktyget är placerat. Alla dessa används för att systematiskt beräkna hur robotarna skall röra sig för att nå en viss position, och även hur robotarna är positionerade i förhållande till varandra. Koordinatsystem är ytterst nödvändigt för att över huvud taget kunna köra och programmera robotarna. Stor hänsyn måste tas för att alla robotarna skall positionera sig rätt. Man kan även skapa *workobjects* som är koordinatsystem vilka roboten kan utgå från när den ska utföra sina rörelser. Detta kan vara användbart exempelvis för att lättare definiera hur robotarna skall röra sig. Även ifall man behöver förflytta dessa koordinatsystem så kan de *targets* (positioner som roboten flyttar sig till) lätt flyttas med om de är definierade i *workobjectets*.

### 3.1.2 Tröghetsmoment

Vid robotrörelser i högre hastigheter med tyngre verktyg så har tröghetsmomentet en inverkan. Roboten använder verktygens vikt och masscentrum för att beräkna tröghetsmomentet som i sin tur används för att styra robotens rörelser. Roboten tar hänsyn till tröghetsmomentet för att styra acceleration och hastighet när robotrörelser utförs. Vikten och tröghetsmomenten på de verktyg som används i det här fallet är i princip försumbara i relation till robotarnas specifikationer. Exempelvis om ett verktyg väger 2 kilo och roboten enligt specifikation ska kunna hantera 100 kg, så blir verktygets tyngd i princip helt försumbar när roboten beräknar kinematiken. I tabell 2 presenteras samtliga verktygs vikter.

Tabell 2: Vikter för verktyg

Verktyg [Namn]	Vikt [kg]
Gripper bakdel	0.43
Gripper sidor	0.45
Gripper till tak	0.42
Sug botten	1.38
Nitpistol	2.02

### 3.1.3 Kollisionskontroll

ABB:s detektion för kollision är mycket sofistikerad och fungerar genom att den letar efter onormala vridmoment i alla axlar (ABB, 2022a). Detektionssystemet fungerar helt utan några extra mekaniska delar eller kablage. När en kollision upptäckts backar roboten ett par millimeter och stannar sedan. Därefter kan man styra den manuellt eller starta om programmet.

## 3.2 3D-utskrifter

De 3D-skrivare gruppen har tillgängliga är av modellen Original Prusa i3 mk3 (PRUSA research, 2022). För att få en högpresterande 3D-utskrift krävs det en stabilt gående skrivare som kan komma upp i tillräckligt hög temperatur (Birkelid m. fl., 2022). I undersökningen testas prestandan på *Prusa i3 mk3* och där redovisas att skrivarens munstycke kommer upp i en temperatur på 292 grader celcius samt en temperatur på plattan på 120 grader celcius. Till själva skrivaren används mjukvaran *PrusaSlicer*, ett tillhörande program till skrivaren som tar en digital ritning och planerar upp skrivarens arbete. Detta program tillåter en STL-ritning som vanligtvis exporteras från CAD, att dela upp geometrin i en planerad rutt för skrivaren så att den kan skriva ut objektet med stödmaterial. Detta för att utskriften skall vara stabil under proceduren så att precisionen bibehålls.

## 3.3 Inmätning

Under projektets gång gjordes inmätningar av olika typer för att digitala-tvillinggruppen skulle kunna göra korrekta program och simulationer utifrån de koordinatsystem som mättes in. Teorin bakom dessa inmätningar presenteras nedan.

### 3.3.1 Tool Center Point (TCP)

För varje tillverkat verktyg krävdes inmätning av dess TCP. Detta görs för att de koordinatsystem som existerar i cellen skall kunna förhålla sig till de som definieras som verktygets mittpunkt. Därefter beräknar roboten vilken TCP det inmätta verktyget har med hjälp av ekvationssystem och minsta kvadratmetoden, se avsnitt 3.3.4. Utifrån denna punkt offline-programmeras sedan den digitala-tvillinggruppen robotarna med respektive verktyg.

### 3.3.2 Precisionsmätning med Romer-mätarm

I projektet används en *Hexagon Romer Arm*, se figur 4. Detta är en manuell portabel mätarm som används för precisionsmätning genom att den mäter in koordinater med en kula från spetsen relativt en inmätt referenspunkt eller sitt eget koordinatsystem (Hexagon, 2022a). Kulan som sätts på spetsen av mätarmen, en så kallad probe, används för att mäta och har en syntetisk rubinspets som är mycket slitstark (Higherprecision, 2007). Bilder på de prober som användes visas i bild 5. De prober som används är H00007187-50, H00007189-50 och H00007186 (Hexagon, 2022b). Mätarmen kan även användas för att jämföra CAD-ritningar med exempelvis 3D-printade delar för att se hur mycket de fysiska delarna skiljer sig från den virtuella modellen. Skillnaden mellan den digitala delen och den fysiska är viktigt, då man vill uppnå en hög noggrannhet för att öka precisionen i offline-programmeringen av robotarna. Genom att mäta in nya koordinatsystem i monteringsstationen relativt det globala koordinatsystemet som redan finns inmätt i robotcellen, 3.1.1 kan koordinatsystemen i den digitala tvillingen kalibreras.

Figur 4: *Romerarmen som används för inmätning.*



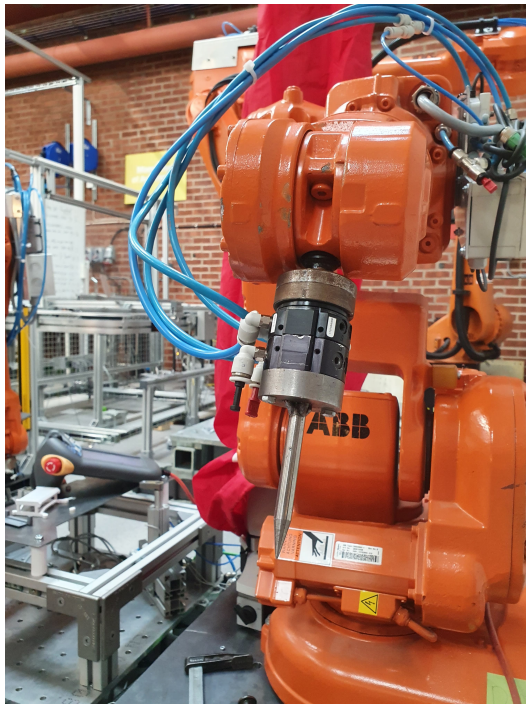
Figur 5: *Proberna som används.*



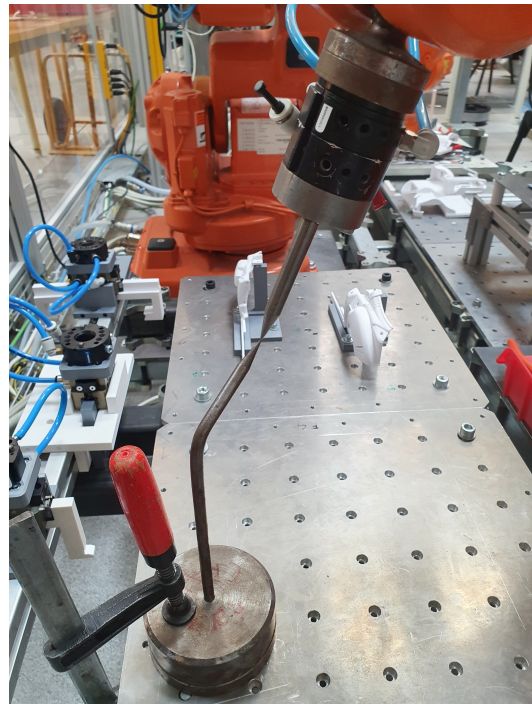
### 3.3.3 Inmätning med spetsverktyg

Utöver inmätningen med romerarmen finns ett annat mätutförande för att ta fram koordinater för robotarna. Teorin går ut på att det sätts ett verktyg i form av en spets på roboten, se figur 6. Spetsens TCP mäts sedan in genom att köra roboten så att verktygsspetsen hamnar mot en fastmonterad spets upprepade gånger, se figur 7. Spetsen kan sedan användas för att mäta in punkter utifrån robotens baskoordinatsystem. Mätutförandet har något lägre precision än inmätning av Romerarmen men används för projektets ihopmontering då precisionen anses vara tillräckligt hög. Skillnaden mellan inmätningarna presenteras i resultatet vid 5.9.2.

Figur 6: Inmätningssätt för spetsinmätning.



Figur 7: Inmätning av TCP med en fastmonterad mätspets som referens.



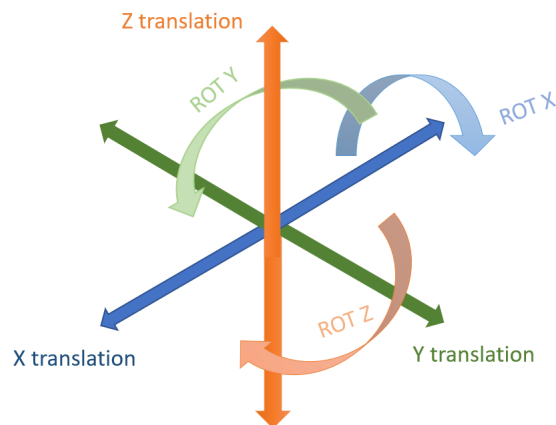
### 3.3.4 Minsta kvadratmetoden

Vid denna inmätning används en metod som kallas minsta kvadratmetoden för att beräkna mätarmens position i förhållande till olika koordinatsystem. Inom matematiken används minsta kvadratmetoden för att anpassa en funktion utifrån observerade mätvärden, för att kunna jämföra vart olika koordinatsystem befinner sig i relation till varandra. I det här fallet så är de observerade mätvärdena de koordinater som mäts in med Romer mätarmen och robotarnas egna koordinatsystem. Minsta kvadratmetoden används sedan genom att beräkna närmaste lösningen till mätvärdena. Ett polynom som minimerar avstånden till samtliga mätpunkter estimeras sedan.

### 3.4 De sex frihetsgraderna

För att låsa fast objekt så behöver hänsyn tas till alla frihetsgrader. Det finns i varje led av en tredimensionell kropp tre stycken linjära och tre roterande frihetsgrader, se figur 8. Det går att röra ett 3D-föremål i linjär riktning längs de tre axlarna samt rotera det runt sina egna axlar. 3-2-1 metoden är en metod som går att tillämpa för att låsa önskade frihetsgrader och begränsa delarnas rörlighet vid exempelvis bearbetning eller montering (Prescient Technologies, 2022). Detta är något som kan användas vid exempelvis verktygstillverkning och positionering av delar.

Figur 8: *Frihetsgrader*



### 3.5 Fixtur

En fixtur håller föremålen som ska bearbetas på plats och används för att underlätta tillverkning och montering av produkter (Pollack, 1988). Det är viktigt att hålla föremål på plats för att uppnå hög noggrannhet vid maskinbearbetning. Fixturer består av en struktur som skapar ett förhållande mellan komponenterna, arbetsstycket och positioneras samt låsning av frihetsgraderna. Under projektet så har både fixturer såsom Boxjoint och Flexlink använts.

Inom den tillverkande industrin används så kallade dedikerade fixturer, vilket är en typ av fixtur som är utformad för endast en specifik komponent med ett ändamål (Andersson m. fl., 2014). Exempelvis en fixtur för en specifik sidodörr till en bil eller ett specifikt verktyg. De dedikerade fixturena kan inte användas till flera delar och har därmed inte multifunktionalitet. Ledtiden för design och tillverkning är också större då de måste specialutformas, och ej kan massproduceras vilket gör dem mer kostsamma.

#### 3.5.1 Flexlink

*Flexlink AB* är ett företag baserat i Göteborg som skapar modulära industrilösningar, exempelvis transportband och strängpressade aluminiumprofiler (Flexlink, 2016). Dessa lösningar kan appliceras av gruppen vid uppbyggnaden av robotcellen och erbjuder mycket flexibilitet då profilerna kan kapas till de längder som behövs samt monteras ihop på många olika sätt. Profilerna möjliggör också montering av exempelvis sensorer och andra fixturer. Modulariteten som är den stora fördelen med Flexlink beror på att komponenterna är standardiserade stänger med rektangulärt 45x45 mm tvärsnitt, se bild 9, med inåtgående försänkningar som tillåter montering av fler bitar i alla räta vinklar ut från stängan. Det finns även möjlighet att fästa ihop Flexlink med boxjoint som beskrivs nedan.

Figur 9: *Flexlink Tvärsnitt*



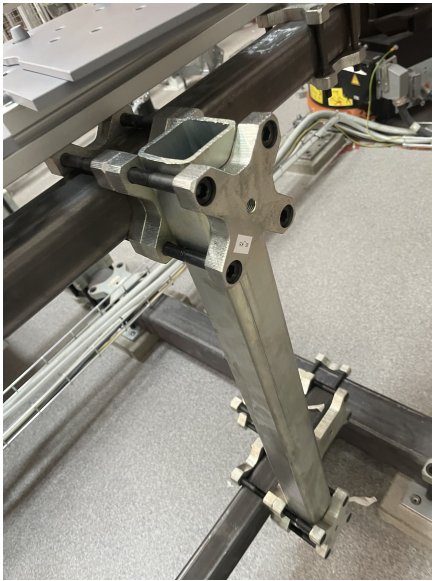
#### 3.5.2 Boxjoint

Boxjoint är ett modulärt fixtursystem i stål se figur 10. Det möjliggör flexibel arbetshållning och passar bra för olika ramkonstruktioner till exempelvis svets eller monteringsprocesser. Boxjoint möjliggör sammanfogning av balkar till en ramkonstruktion utan behov för svetsning. Konstruktionen sammanfogas istället med standardplattor och skruvförband där bultarna dras åt med ett högt vridmoment. Boxjoint är flexibel på flera sätt, med sin modularitet, smidighet och dess låga kostnad (Kihlman och Engstrom, 2010). Till skillnad från

Flexlink är Boxjoint tyngre och mer robust, samt kräver ett specifikt vridmoment vid montering för att bli så rakt som möjligt. Av den anledningen passar sig boxjoint till tyngre last som till exempel industrirobotar. Alla fyra robotar ingående i detta projekt står på boxjointställningar. Även metallplattorna i monteringsstationen sitter förankrade i dessa pelare. BoxJoint utvecklas och distribueras idag av företaget Prodtex som även erbjuder ett digitalt designverktyg för att konstruera fixturerna virtuellt (Prodtex, 2022). Balkarna är fyrkantsprofiler i storlekarna 400x400 mm ner till 25x25 mm. Det finns även specialvarianter med rektangulär geometri för sammanfogning av olika dimensioner. Standardplattorna finns för olika skruvstorlekar och godstjocklekar finns mellan 8-25 mm.

Figur 10: Olika uppsättningar av BoxJoint.

(a) Verktygsställ ovanifrån



(b) Verktygsställ botten



### 3.6 Infästningsmetod

En infästningsmetod syftar på tillvägagångssättet som används för att sammanfoga separerade komponenter. I bilindustrin används ofta punktsvetsning som infästningsmetod. På grund av avgränsningen att svetsning inte skall användas har ett antal andra metoder testats för att möjliggöra en fungerande montering. Utförandet innebär att en popnitspistol är monterad på roboten, se figur 3b. Roboten hämtar upp en nit i ett ställ för att sedan föra in en popnit av plast i ett hål där delarna skall sammanfogas. Själva nitningen sker med hjälp av pneumatik och utförandet blir likt en vanligt popnitsutförande.

### 3.7 3DEXPERIENCE

3DEXPERIENCE är en kollaborativ plattform som strävar till att koppla ihop olika områden i produktutvecklingsprocessen för att tillåta en översikt av helhetsbilden över samtliga områden. Det är en molnbaserad tjänst som tillhandahåller en rad olika applikationer där allt arbete sparas i en databas, lättillgängligt för de olika arbetsenheterna att komma åt varandras arbete. Plattformen ska bidra till att lättare och snabbare ta mer relevanta informerade beslut tack vare att det finns bättre tillgång till fler olika utvecklingsområden i projektprocessen där produkter utvecklas. Det blir lättare att koppla ihop människor, data, lösningar och idéer i en

enda intuitiv miljö för hela produktutvecklingen.

I 3DEXPERIENCE navigationen finns det tillgång till ett brett utbud av alla programvaror från företaget Dassault Systèmes. Det mest relevanta tillägget i 3DEXPERIENCE heter Robot Programming och tillåter off-line programmering. Detta innebär att simulationer som görs i programmet automatgenererar Rapid kod som är exekverbar av den verkliga roboten och ska då efterlikna simulationen. Plattformen tillhandahåller även sociala och kollaborativa appar, programvara för 3D-modellering samt verktyg för simulering (3DExperienceReferens, 2022).

Programvaran som tillåter 3D-modellering i 3DEXPERIENCE heter CatiaV6 och möjliggör skapandet av komponenter, ihopmontering av komponenterna och att skapa ritningar. Funktionerna i CatiaV6 som möjliggör detta heter part design, assembly design och drafting.

### **3.8 Programmable logical controller (PLC) och kommunikation**

PLC är en dator som använder logiska uttryck. PLC används i situationer där många saker händer samtidigt och man måste strukturera upp ordningen på händelser och sätta regler på vad som får hända i en viss tidpunkt. Detta är främst ur säkerhetsperspektiv då man vill ha kontroll över vad som händer i cellen. Särskilt när man använder sig av flera givare och instrument behövs en central enhet som läser alla variabler och kan ta beslut som inte ignorerar någon del av systemet (Bolton, 2015). Gruppen kommer primärt använda sig av en Siemens-modell, som är uppkopplad mot ett nätverk av flera robotar, sensorer och en dator där man kan programmera PLC:n.

I den Siemens-modell av PLC som gruppen använder så används ladder-programmering. Det kan liknas vid ett elektriskt nätverk där både parallellkopplingar och seriekopplingar av villkor är möjliga att använda. Villkoren skall vara uppfyllda för att en läsbar variabel skall ändra värde. En läsbar variabel som ändrar värde kan till exempel resultera i att någonting fysiskt händer i robotcellen. Att styra flera variabler samtidigt gör att man på ett kontrollerat sätt utföra uppgifter med en eller flera robotar samtidigt. Villkoren man använder sig av kan vara exempelvis att säkerhetsgrinden till monteringscellen skall vara stängd eller att sensorn skall känna av monteringsplattan för att roboten ska tillåtas börja montera bilen. Flera ladder-nätverk bygger tillsammans upp ett funktionsblock. Dessa block kan man kalla på från andra ställen i koden vilket gör den mer tillgänglig, och man kan även kombinera funktionsblock med kompletterande ladder-kod för att få mer lättläst kod och undvika att missförstånd ska uppstå.

För att kommunicera mellan olika nätverk använder man så kallade PLC-taggar och HMI-taggar. Dessa taggar fungerar som globala variabler och möjliggör även att man kan styra koden med hjälp av ett HMI, (human machine interface). HMI är en interaktiv informationsdisplay som agerar som en slags bro mellan människan och maskinssystemet och möjliggör för operatören att kunna styra systemet på ett säkert sätt med knappar på displayen utan att behöva programmera PLC-kod. Till ett PLC-program används vanligtvis ett HMI som ofta kan simuleras i ett program som kommer från tillverkaren. I Siemens heter verktyget WinCC, som är ett program som simulerar en riktig HMI och har samma funktionalitet (Salih m. fl., 2017).

Själva hårdvaran PLC sitter monterad på en vägg inuti ett skåp, se figur 11. Hårdvarans display används sällan, istället programmas koden utifrån tillverkarens medföljande mjukvara på en PC. Enheten är nätverksuppkopplad med en extremt snabb anslutning som heter Profibus ( Profibus & Profinet International, 2022). På denna buss är stora delar av maskinerna i PSL uppkopplade, vilket gör att PLC:n har data om det mesta som händer i robotcellen. Både robotar, sensorer och säkerhetsmekanismer är ihopkopplade och styrda av PLC:n.

Figur 11: *Siemens Simatic s7-1500*



## 4 Metod

Nedan presenteras hur gruppen arbetat för att uppnå samtliga delmål.

### 4.1 Förberedelse

För att komma igång med arbetet och lära sig grunderna genomfördes de moment som beskrivs nedan.

#### 4.1.1 Utbildning

Eftersom gruppen inte sedan tidigare hade mycket erfarenhet inom varken PLC eller automation och robotteknik inleddes arbetet med utbildning inom området. Genomförd och planerad utbildning under de första veckorna var följande:

- En robotlabb i Robotstudio för att lära sig grunderna om hur man kontrollerar ABB robotar på ett säkert sätt. Detta gjorde att gruppen självständigt kunde sätta in punkter för roboten så att det blev möjligt att online-programmera in arbetsrutiner för att testa olika delar av produktionen.
- En säkerhetsgenomgång av handledare över vilka regler och hur robotcellen fungerade. Detta för att gruppen ska kunna vara i robotcellen på ett säkert sätt och kunna köra robotar utan handledares närvaro.
- En introduktion över hur man mäter in TCP, samt hur workobjects, se begreppslista under avsnitt 1, och punkter i kordinatsystemet mäts in med hjälp av romer-mätarmen. Detta för att gruppen själva skulle kunna mäta in objekt, arbetsytor och verktyg.

#### 4.1.2 Uppstartsprojekt

För att karossverkstaden skulle bekanta sig med sina verktyg samt för att gruppen skulle komma igång med något överkomligt som kunde ge viktiga insikter inför resten av projektet, bestämdes att ett mini-projekt skulle genomföras. Under detta projekt var tanken att en modell bestående av två delar samt fyra fästpunkter skulle skapas på samma sätt som den slutgiltiga bilen. För gruppens del blev det även fokus på att göra de två första verktygen med tillhörande verktygsställ, att vara med och hjälpa de andra grupperna med framtagning av tillräckliga 3D-utskrifter samt online-programmera in ett testprogram i roboten för få en känsla för vilka infästningsmetoder som skulle fungerat. Det var även under den här fasen som viktiga idéer kring hur verktygsbyte kunde genomföras uppkom.

### 4.2 Genomförande

Under stycket presenteras de moment som behöver genomföras under projektets gång för att uppfylla syftet med projektet.

#### 4.2.1 Programera och köra ABB-robotar

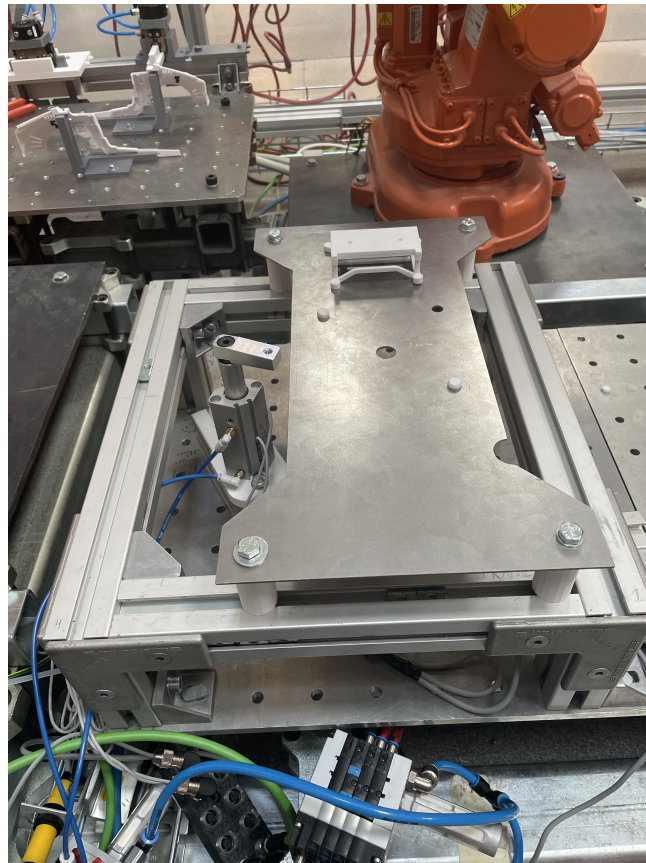
De ABB robotar som fanns i PSL utgjorde grunden för att montera bilen, tanken var att de olika robotarna skulle köras samtidigt och utföra förflyttningar av delar med verktygen. Digitala tvillinggruppen offline-programmerade robotarna och därefter kördes den virtuella simulation i den fysiska cellen. Utförandet och samverkan med robotarna presenteras i avsnitt 5.1 och diskuteras i avsnitt 6.2.

#### 4.2.2 Bygga monteringscellen

För att bilen skulle kunna sättas ihop krävdes mycket av stationen där monteringen utfördes. Det behövdes verktyg som skulle tillverkas av gruppen och dessa behövde ha möjligheten att förvaras i verktygsställ där roboten skulle kunna hämta och lämna varje verktyg. Det behövdes också fixturer till alla delar som ingick till bilen och en monteringsyta där bilen skulle sättas ihop. Utöver detta används även sensorer, fixering av delar samt simplare PLC-programmering för att möjliggöra monteringsprocessen.

Monteringscellen byggdes på en robust stålplatta. En ram sattes ihop av Flexlink aluminiumprofiler och förstärktes med beslag, för att skapa grunden till monteringsplattan, se figur 12. Därefter monterades monteringsplattan fast på fyra stöd som i sin tur monterades på Flexlink-ramen. Anledningen till att monteringsplattan gjordes upphöjd var för att underlätta åtkomsten för robotarna vid monteringen samt att ge mer plats för pneumatiken, aktuatorer och eventuella sensorer undertill.

Figur 12: *Flexlinkställning*



### 4.2.3 Inmätning av station och verktyg

Tanken från början var att Romer mätarm skulle användas under projektets gång för precisionsmätning, se figur 4. Mätningarna skulle göras kontinuerligt och används för att säkerställa att offline-programmeringen stämde överens med verkligheten samt genom att mäta toleranser på de 3D-printade karosdelarna. Det var även tanken att vid mindre noggranna uppmätningar använda ABB robotarna som mätverktyg där ett verktyg med en spets sätts på robotarna för att sedan manuellt mäta in koordinater.

De båda inmätningssättet skulle komplettera varandra genom att användas i olika sammanhang beroende på noggrannheten som krävdes. Detta diskuteras i 6.4. För att mäta in verktygens TCP och hitta centerpunkten av verktygen användes metoden att sätta en tejpbit över gapet över en gripklo. Därmed gick det att mäta en punkt på tejpens som satt centrerad.

Slutligen användes även en metod för kontrollinmätning för att få fram värden på hur stora felen vid inmätning var, med hjälp av romerarmen. Detta gjordes genom att först använda den stora roboten och köra roboten till 16 olika punkter runt arbetsytan. Därefter kalibrerades romerarmen utifrån dessa punkter och då kunde romerarmens position erhållas i förhållande till baskoordinatsystemet för den stora roboten. Sedan mättes workobjects in med hjälp av romerarmen för att på så sätt få ett mer precist mätvärde. Positionen kunde sedan användas för att jämföra koordinaterna med robotinmätningen. Resultatet presenteras i 5.9.2.

### 4.2.4 3D-utskrifter

För att effektivisera processen så skulle så mycket som möjligt skrivas ut i de tre 3D-skrivarna gruppen hade tillgång till. Detta innefattar delar till slutprodukten, verktyg med tillhörande ställ samt infästningsmetoder. Planen var att karosverkstaden skulle skriva ut delar och komponenter i hög takt för att testa många olika alternativ. Denna plan sattes igång tidigt under projektet och flera idéer testades och bidrog till att ta fram de slutliga versionerna. Under projektets gång testades de 3D-utskrivna plastkomponenternas stabilitet för att se om de kunde användas, eller om komponenterna behövde tillverkas i metall för att få mindre flexibilitet och högre stabilitet.

### 4.2.5 Verktygsställ

Efter lärdomarna som framkom av mini-projektet påbörjades design i CAD av ett modulariserat, 3D-printat verktygsställ som skulle kunna hålla alla typer av stora verktyg. Det var även viktigt att detta passade ihop med de verktygsfästen som hade skrivits ut samtidigt. Första iterationen, se bilaga 22, blev en rektangel som det gick att fästa styrpiggarna i samt urgröpningar för verktygsfästets bultar. Detta gjordes så att de två delarna passade ihop utan mellanrum. Det visade sig senare att en bättre lösning var att skriva ut även styrpiggarna som en del av verktygsstället. Verktygsstället var designat för den stora roboten och planen var att komma fram till ett verktygsställ som gick att haka i flera likadana ställ i. Detta för att ha en såpass enkel och stark konstruktion att stället kunde skrivas ut och användas direkt. Ambitionen var även att för de mindre robotarna ha ett likadant fast mindre ställ för att göra allting modulariserat.

#### 4.2.6 Verktyg

Två olika typer av verktyg, sugverktyg och gripklor, hade börjat skissas på. Dessa två varianter hade olika krav på verktygsfäste för att kunna monteras på roboten med rätt vinkel, och för att passa med verktygsstället designades en verktygsfäste, se bilaga A, som verktyget skulle byggas på. De första verktygen som konstruerades utgick ifrån det fästet, vilket ändrades senare för de små robotarna. Där behövdes istället mer individuella fästen eftersom gripklor har mer komplexa geometrier. Hela tiden hade gruppen i åtanke att få TCP:n med så kort hävstång som möjligt från roboten. Detta skulle bidra till ökad stabilitet. Vilket material som skulle användas för gripklorerna var svårt att avgöra eftersom de komplexa formerna talade för att 3D-printing skulle vara det bästa sättet. Detta gjorde att gruppen tog stor hjälp av karossverkstaden för att komma fram till utskrivna gripklor som var tillräckligt starka för att inte böja sig.

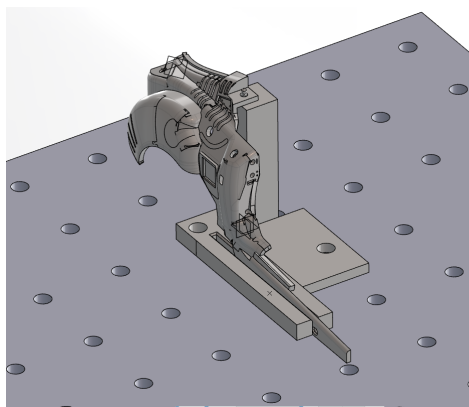
#### 4.2.7 3DEXPERIENCE

Under projektet har gruppen arbetat med konstruktion av diverse komponenter till stationen. Exempelvis fixturer, verktygshållare och annat som behövts för att bygga upp monteringsstationen. För att 3D-modellera alla komponenter har den molnbaserade tjänsten 3DEXPERIENCE använts som är en kollaborativ plattform. Under projektet kunde därför olika CAD-ritningar som gjorts av de andra grupperna lätt hittas och importeras för att lättare kunna designa nya delar som skulle passa det specifika syftet. Verktyget för 3D-modellering som 3DEXPERIENCE tillhandahåller är Dassaults Systèmes programvara CatiaV6.

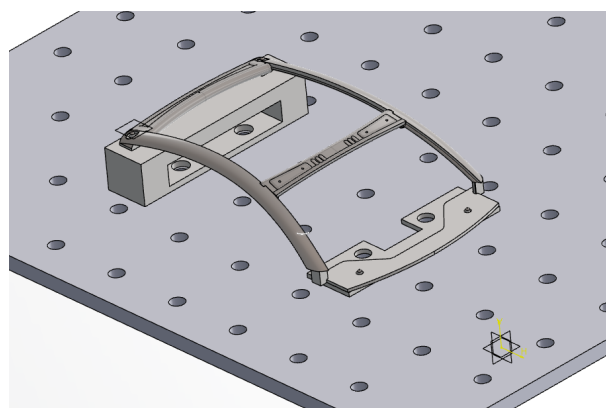
När monteringsplattan skulle tillverkas så användes importerade modeller av bilkarossen från karossverkstaden för att anpassa monteringsplattan efter sensorer och andra geometriska begränsningar. Vid konstruktion av verktygshållarna så importerades en digital CAD-modell av verktygen för att kunna anpassa verktygshållare som passade verktygen på ett precist sätt. När fixturerna utvecklades användes funktionen assembly design i CatiaV6. 3D-modellen av plattan, fixturerna och verktygen monterades ihop digitalt för att kontrollera funktionaliteten, detta för att kunna se att verktygsstället passade till plattan och var anpassat till verktygen, se figur 13.

Figur 13: Digitala fixturer medellerade i CatiaV6

(a) Fixtur till sidodel på karossen



(b) Fixtur till taket på karossen



#### 4.2.8 PLC och kommunikation

PLC-programmeringen genomfördes med hjälp av programvaran Siemens Tia portal. I utbildningen ingick därför en genomgång av Siemens tia portal programvara, där gruppen fick en överblick i programmet. Under projektets gång testades flera olika alternativ till uppsättning av sensorer och det var viktigt att skapa ett program i PLC:n som enkelt kunde anpassas efter eventuella förändringar i den verkliga stationen.

Efter utbildningen fick gruppen tilldelat ett program som innehöll gamla arbeten och exempelvis redan konfigurerade inputs och outputs (I/O). Genom att studera detta program försökte gruppen få en klarare bild av hur PLC:n har använts för att exempelvis styra robotar, hämta information från sensorer, och styra ställdon. Detta program konstaterades efter halva arbetet vara oanvändbart och projektet rensades så att endast säkerhetsfunktionerna kvarstod. Därefter bestämdes det hur det nya projektet skulle kodas, nämligen efter standarder enligt handledarens förfrågan. Detta var nödvändigt för att arbetet skulle kunna användas i framtida projekt på ett mer verklighetstroget sätt. Ett mycket simpelt HMI producerades genom att använda en mall i form av en existerande HMI på datorn. Slutligen för att få robotarna att röra på sig krävdes att de programmerats av digital tvillinggruppen. Detta gjordes i Rapid. Denna kod genererades i form av en instruktionslista från 3DEXPERIENCE. Det var denna kod som formaterades och exekverades av robotarna med hjälp av PLC:n.

## 5 Resultat

Nedan presenteras projektets resultat. Dessa har tagits fram löpande under hela projektets gång genom en itererande process för att uppnå ett så bra slutresultat som möjligt. Så långt som projektet har kommit fungerar olika sekvenser av monteringen, men hela monteringen har inte hunnit testas än. Digitala tvillinggruppen är inte klara med programmeringen av sekvenserna och därmed har inte hela monteringen kunnat testas. Efter att slutmonteringen utförts är planen att färdigställa PLC:ns sekvensiering och zonallokering som ännu inte är helt klar då den kan göra klarts först efter programmeringen av robotsekvenserna. Monteringen förväntas färdigställas innan den muntliga presentationen av projektet genomförs.

### 5.1 Ihopmontering av bil

Monteringen går igenom följande steg utifrån utgångsläget där alla delarna ligger på respektive ställ, samt att robotarna har sina startverktyg. All popnitning sker av mellanstora roboten då denna har verktyget nitpistolens fastsatt under hela sekvensen. På grund av åtkomlighet och att robotarna inte skulle köra in i varandra krävdes två extramoment där hela bilen vreds 180 grader. Detta var inte planerat från början utan fick läggas till då problemen med robotarnas åtkomst upptäcktes vid monteringsmodelleringen. I figur 14 kan bilen ses placerad på monteringsplattan.

1. Hjulhuset tas till monteringsplattan och fästs på sin plats i en infästning på bakre halvan av monteringsplattan.
2. Bilgolvet monteras i mitten av plattan över hjulhuset. Nitar sätts i bilgolvet ner till hjulhuset. Bilgolvet låser hjulhuset i z-led, och bilgolvet låses i sin tur i z-led med hjälp av en cylinder. Två nitar sätts genom bilgolvet bakdel ner i hjulhuset. En sensor indikerar att bilgolvet är på plats och tillåter processen att fortsätta
3. Bakdelen plockas och sätts på plats av en robot och nitas fast.
4. Hela bilen vrids 180 grader med hjälp av sugverktyg. Detta för att kunna komma åt vid nitning av framdel och höger dörr.
5. Framdel plockas och hålls på plats och nitas med 3 nitar.
6. Höger dörr sätts på sin sida av bilgolvet och nitas fast med 3 nitar.
7. Hela bilen vrids 180 grader med hjälp av sugverktyg. (Detta för att kunna komma åt vid nitning av framdel och höger dörr.
8. Vänster dörr sätts på sin sida av bilgolvet och nitas fast med 3 nitar.
9. Sista niten sätts i framdelen på vänster sida.
10. Taket sätts fast och nitas fast på fyra ställen.

Figur 14: Slutgiltig position och montering av bilen på monteringsplattan.



## 5.2 Verktyg

För att kunna montera ihop bilen konstruerades verktyg till robotarna utifrån varje moments individuella behov. Varje robot har olika verktyg och dessa är specialanpassade för just denna nerskalade bil. Gruppen har upptäckt att i de flesta fallen ett verktyg skall konstrueras för en industrirobot, är det hållfastheten för plasten som inte är tillräcklig för att möta de krav som ställs på verktyget både för hållfastheten samt precisionen. Plasten har en tendens att böja sig vilket gör att precisionen går förlorad. Detta går dock att kompensera med korta avstånd till verktygets TCP och en ökning av tjockleken på de utskrivna delarna. Med dessa kompenseringar går det i de flesta fall att få bort de böjningarna som uppstår i materialet så att inverkan är så pass liten för TCP:n att det är försumbart.

### 5.2.1 Verktygsfäste

Vår första iterering av ett 3D-utskrivet verktygsfäste, se figur 16 i bilaga A, visade på att formen av verktygsplattan uppfyllde funktionaliteten. Däremot hade plattorna en tendens att böja sig vid höga spänningar, vilket gjorde att gruppen beslutade sig för att tillverka plattorna i stål istället. Prototypen utvecklades genom att plattan gjordes längre och att hål skapades för montering av ett rör med ett sugverktyg i änden.

### 5.2.2 Vakuumsugverktyg

Olika former och storlekar av vakuumsugar testades som verktyg. För projektet används de för lyft av bilens bottenplatta. Stabilitet och sugförmåga är avgörande faktorer för att verktygen skall fungera som tänkt. Ett av verktygen som konstruerades var ett sugverktyg i metall som användes till att lyfta bottenplattan, se figur 18 i bilaga A.

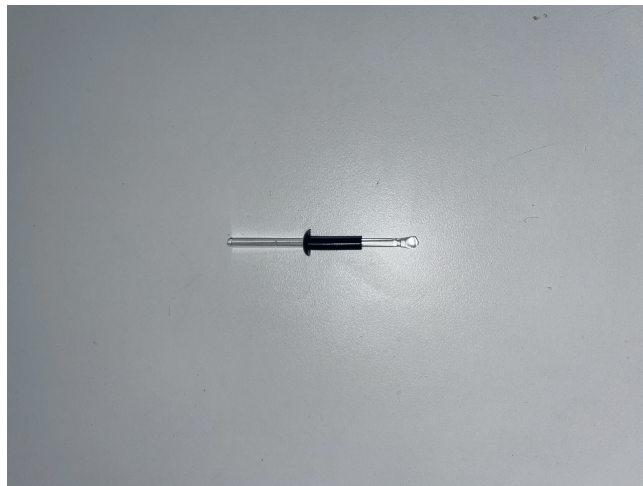
### 5.2.3 Griplor

Verktyg av ihopklämningskaraktär fungerar som en pneumatiskt styrd klämma för att kunna greppa bildelar. De används då delar inte har plana ytor som inte går att använda sugverktyg på. På dessa verktyg ställs höga krav på precision och repeterbarhet, då detta kan var en stor brist annars. I bilaga A presenteras de tre griplor som används.

### 5.2.4 Infästningsverktyg

För att efterlikna punktsvetsning som infästningsmetod så används popnitning i projektet. Verkyget som konstrueras för infästningsmomentet av bilen utgår från ett pneumatiskt nitverktyg av modell Proset 1600 POP Rivet Gun (Emhart Technologies, 2008). Se bilaga A för verktyget samt figur 15 för nitarna som användes. För att kunna fästa popnitsverktyget på en av robotarna skapades en ram som monterades på popnitsverktyget. Ramen har två hålbilder i sig som passar både de stora och små Schunk-adaptrarna för att möjliggöra byte av adaptrarna vid behov av montering på antingen de stora, mellanstora och små robotarna. Till detta skapades en pneumatisk avtryckningsmekanism som är till för att kunna avfyra pistolen med hjälp av robotens tryckluft och därmed möjliggöra automatisering av hela nitprocessen. Det monterades en 3D-utskrivna tratt på munstycket av popnitspistolen som möjliggjorde en instyrning av niten i hålet för att kompensera för små precisionsfel som kunde göra att niten inte hamnade rätt i nitpistolens mynning.

Figur 15: *Plastnit som användes vid montering*



## 5.3 Verktygsställ

Verktyg som inte används av robotarna behöver förvaras i låsta positioner och därför skapades olika verktygsställ som kommer presenteras nedan. Nitpistolens har inget verktygsställ eftersom den mellanstora roboten endast kommer användas för popnitning. Alla ställ har konstruerats så att delarna endast kan lyftas rakt upp och är låsta i alla andra led.

### 5.3.1 Verktygsställ för stora roboten

Det verktygsställ som blev det slutgiltiga för den stora roboten var den modulariserade, utskrivna plattan som monterades på en Flexlink-skena. Ett flertal plattor har monterats fast på rad längs en Flexlink-skena med ytterligare en skena som stöd. Denna lösning var fullt tillräcklig och böjer sig endast marginellt av de små krafterna skenan utsätts för.

### 5.3.2 Verktygsställ för gripklor

För de gripklor som används av de små robotarna skapades specialgjorda ställ som passade varje individuellt verktyg, se bilaga B. Dessa har komplexa geometrier, och tack vare att de är 3D-utskrivna är passformen mycket bra. Dessa ställ är också monterade på rad längs en Flexlink-skena placerad bakom de två små robotarna, då räckvidden är tillräcklig för båda robotarna.

## 5.4 Ställ för delar

För att monteringen av bilen skulle fungera krävdes det att bildelarna kunde fixeras på förbestämda platser i cellen. Detta för att kunna med hög precision plocka upp dem med roboten. Därför skapades olika komponentställ, se bilaga C. Alla ställ har konstruerats så att delarna endast kan lyftas rakt och är låsta i alla led.

- **Ställ för bilsida:** Bilsidan är två spegelvänt identiska delar, därför konstruerades två spegelvänt identiska ställ. Dessa håller delen upprätt och rak med en skena och låser delen med en pigg på ovandelen av sidan.
- **Ställ för tak:** Stället för takdelen är bestående av två mycket små och enkla komponenter. Eftersom det bara behövs fyra kontaktpunkter för takdelen, och inget rakt under den böjda delen, sitter istället två enkla plattor med pigg på för att fixera denna del.
- **Ställ för bottenplatta:** Bottenplattan sitter på samma sätt både före och efter monteringen, alltså med tre printade instyrningspigg enligt 3-2-1 metoden.
- **Ställ för bakdel:** Bakdelens ställ är en kloss med detaljer som matchar bakdelen samt har två pigg på toppen för att låsa delen.
- **Ställ för hjulhus:** Hjulhusets ställ är mycket likt och följer samma koncept som stället för bakdelen.
- **Ställ för framdel:** Detta ställ är det största av ställen och har en platt och utbredd geometri med fyra pigg för framdelens låsning.
- **Nitmagasin:** För att nitarna skulle kunna förvaras vid montering skapades ett slags magasin. Varje gång roboten hämtar en nit så faller nästa nit ner på samma position vilket gör att nitarna kan hämtas från samma position vid varje tillfälle, se figur 32. Detta underlättade för programmeringen av roboten då bara en punkt behövdes för nitens upphämtningsposition som är bottenpositionen i magasinet.

## 5.5 Material

I arbetets tidigare stadiet uttrycktes från projektets handledare en önskan att i största möjliga utsträckning använda de tillgängliga 3D-skrivarna för att tillverka delarna till monteringsstationen och verktygen. Detta för att kunna skriva ut CAD-modellerna och få dem i handen direkt, detta innebär att flera prototyper kan testas och slutprodukten blir välprövad som koncept. Den stora nackdelen med att använda sig av 3D-utskrift är den bristande hållfastheten vid stora laster. Detta kompenseras med smarta designval. De mest kritiska delarna gjordes istället i aluminium för ökad hållfasthet och precision. Materialet som användes för 3D-utskriften var till en början PLA (Polylakid), men problem uppstod vid utskrift av större delar då delarna blev skeva. Genom att byta mellan de olika plasterna som används för 3D-utskrift, från PLA till PETG (Polyethylene Terephthalate Glykol), kunde större delar skrivas ut utan att få lika stora problem. Plasten PETG tål även högre värme samt är starkare än PLA vid rumstemperatur (Kivelä, 2021).

## 5.6 PLC och kommunikation

Programmen som skrevs för robotar och andra enheter i detta arbete syftar till att på ett säkert sätt styra kritisk logik i arbetsstationen och i robotarna. Programmen består av flera nivåer av kommunikation, där den lägsta nivån är robotens egna kod som genereras av digitala tvillinggruppen. Denna kod innehåller instruktionslistor med rörelser som roboten ska genomföra. Detta är mycket svårläst för en människa och därför delas de olika uppgifterna som roboten genomför i olika fall eller *CASES* som det heter i Rapid. Den slutgiltiga lösningen blev att varje robot fick ett enda CASE eftersom det inte behövdes alternativa arbetssätt för roboten, utan de gör sina uppdrag i samma ordning varje gång. I Rapidkoden finns även variabler som hemposition deklarerade och robotens diverse ut och ingångar sätts. Rapid är det språk som roboten förstår, men inte PLC:n. Därför finns ”interlocksom är en slags överförbar variabel i form av ett heltal som kan förstås av både robotarna och PLC:n. Man får alltså själv som programmerare komma på vad varje siffra ska innebära för systemet och skriva ner det i ett separat dokument.

Kommunikationen med Rapidkoden till roboten sker med ABB:s egna funktionsblock i PLC:ns kod. Det är ett komplext block med en stor mängd I/Os, komplexiteten kommer från den stora mängd funktioner och alternativ som robotarna kommer med. Detta funktionsblock är en viktig komponent i stationslogiken som programmerats i blocket Stationlogic”. Detta funktionsblock innehåller all logik som krävs för att monteringen skall fungera på ett säkert sätt. Till exempel sätts interlock inuti Stationlogic så att robotarna kan vänta på att respektive uppgift blir utförd så de inte kör samtidigt och kolliderar.

Programmeringen av PLC var en hög prioritet, och det tog upp relativt mycket tid under mittdelen av projektet. Trots det pausades PLC-utvecklingen tillfälligt mot slutet eftersom robotarnas rörelser ännu inte hade blivit helt färdigprogrammerade. Det bestämdes att ta upp programmeringen av PLC:n när allt som skulle ske i robotcellen var bestämt. Detta då det var oklart vilka villkor man skulle sätta i ladderkoden när programmen för robotarna inte var klara. När programmeringen återupptogs var monteringen ännu inte helt klar och PLC:n programmerades i syfte att kunna färdigställas vid ett senare tillfälle. II nuläget är inte PLC:n fullt utvecklad men planen är att färdigställa den så fort alla robotsekvenser är färdiga.

## 5.7 Monteringsstation

Monteringsstationen byggdes genom att en ram av Flexlink-skenor monterades på en stor metallplatta. På ramen monterades upphöjd monteringsplatta, fotoelektriska sensorer och en cylinder som fixerar monterade delar. Flexlink-skenorna sågades till bitar av rätt längd och monterades ihop med tillhörande beslag, däremot behövdes monteringsplattan, fästen till sensorer och cylindrar tillverkas från grundmaterial. Detta gjordes i många fall med 3D skrivaren, men i monteringsplattans fall var den för stor för att skrivas ut och skapades istället i metall med hjälp av vattenskräming.

## 5.8 Sensorer

Två sensorer har monterats på arbetsstationen, se bilaga D. Sensorerna kopplas till PLC:n och används för att PLC:n skall veta vad som verkligen händer under monteringen och för att låsa fast bilen på monteringsstationen. Sensorerna inkluderar två fotoelektriska sensorer som känner av ifall bilens bottenplatta är på monteringsplattan, samt om den sista delen, taket är monterat. Sensorn som känner av om bilens bottenplatta sitter under monteringsplattan och känner av bottenplattan genom ett hål i monteringsplattan, se figur 33. Detta används sen för att PLC:n ska kunna veta när det är säkert att klämma fast botten med låscylindern.

## 5.9 Låsning i alla led

Delar som bearbetas med robotarna var tänkta att låsas i samtliga led. Detta är ett område där gruppen har tänkt om, detta eftersom det inte alltid är möjligt eller ens nödvändigt att låsa en del i Z-led. Bilgolvet som är en kritisk del låses med hjälp av en cylinder som hindrar rörelser i Z-led, och hjulhuset som låses tack vare en annan del som monteras uppe på, därav blir det en enkel och realiserbar lösning. I andra fall som till exempel fallet med dörrarna blir det komplicerat att låsa dessa i alla led innan infästningen sker. Istället löses detta med att en robot låser fast delen under infästningen. Detta gäller även taket och framdelen på bilen. Genom att designa verktygen på ett smart sätt kunde delarna ändå vara låsta i alla led utan att externa faktorer så som låscylindrar behövdes.

### 5.9.1 Skillnaden mellan digitala tvillingen och den verkliga monteringscellen

Under arbetets gång krävdes att den verkliga modellen stämde överens med den digitala tvillingen. Därför gjordes många mätningar och testkörningar för att kunna säkerställa att precisionen kunde hållas och att den robotkod som gruppen fick ut kunde köras i verkligheten. Att få modellen att stämma helt med verkligheten visade sig vara ett relativt stort problem. Det var ofta som det skiljde ett par millimeter mellan verklighet och modell. Det fanns små fel som gjorde att exempelvis hämtning av nitar var problematiskt. Det visade sig också att de 3D-printade delarna skiljde sig från de faktiska modellerna på grund av att plastutskriften inte blev identisk modellen.

### 5.9.2 Inmätningprecision

Ett intressant resultat som gruppen ville få ut av de olika inmätningssmetoderna är hur avstånden för koordinaterna skilde sig åt. Detta jämfördes med de två inmätningssmetoderna, mätsspets eller 16-punkts inmätning med romerarm. Under avsnittet 3.3 presenteras teorin för de olika inmätningarna. Dessa inmätningar skiljde sig betydande för respektive x,y och z. Inmätningarna utfördes relativt långt från arbetsytan i kombination med att det finns flera avgörande faktorer för att få ut pålitlig data, detta diskuteras i 6.4. Differans på inmätningarna presenteras i Tabell 3. Mätplaceringarna i tabellen syftar till två av de viktigare punkterna i monteringscellen. Basplatta hörn och monteringsplatta hörn är de koordinater den digitala tvillinggruppen har använt sig av vid programmering av robotarna i 3DEXPERINCE. Vid beräkning av medelvärdet för felet är medelavvikelsen för det två utförda mätningarna **2,36** mm.

Tabell 3: *Differans av x,y och z mellan de två olika inmätningssmetoderna.*

Mätplacering	Koordinat	Avstånd med 16-punktsinmätning romerarm [mm]	Avstånd med verktygsspetsinmätning [mm]	Differans [mm]
Basplatta hörn	x	129,28	124,8	4,48
Basplatta hörn	y	1897,65	1900,57	-2,92
Basplatta hörn	z	-34,15	-34,76	0,61
Monteringsplatta hörn	x	-6,62	-8,79	2,17
Monteringsplatta hörn	y	1820,31	1823,84	-3,53
Monteringsplatta hörn	z	178,46	178,03	0,43

### 5.9.3 Produktion av flera bilar

Under projektet hann inte grupperna realisera målet att kunna producera flera bilar i en sekvens, alltså att utan manuellt arbete mellan varje montering kunna fortsätta och montera fler bilar i rad.

## 6 Diskussion

Detta avsnitt innehåller diskussion och jämförelser med liknande projekt samt diskussion av gruppens resultat.

### 6.1 Utvärdering av resultat

Till att börja med var detta kandidatarbete något som inte gjorts i liknande form sedan 2015, vilket med kombination med att handledarnas taktik varit att ge ett fritt och öppet arbetsätt från början resulterade i en brist på struktur och oklarheter i hur arbetet skulle avgränsas och schemaläggas. Ytterligare en faktor som bidragit till bristen på struktur var det stora samarbetet mellan de två andra grupperna. Eftersom alla grupper hade sin egen vision om arbetet fick kompromisser göras och informella möten hållas, detta bidrog till ett långsammare arbetstempo och process. Gruppen planerade upp arbetet efter bästa förmåga och satte igång med utbildning, tester och samverkan med de andra grupperna.

Under projektets gång har gruppen fått uppleva hur det är att jobba med ett projekt som är väldigt likt vad gruppen förmodligen kommer arbeta med senare ute i arbetslivet. Något som märkts är att frekvent kommunikationen mellan grupperna är extremt viktig. Att alla grupper funnits på plats i PSL har gjort att det var lätt att exempelvis gå mellan grupperna och stämma av, ställa frågor samt få råd om designval. Detta har gjort att alla grupper haft en bra bild av hur långt de andra grupperna hade kommit i processen under arbetets gång.

### 6.2 Monteringsstation

För att ytterligare utveckla och förbättra monteringsstationen hade man kunnat skapa de delar som är 3D-utskrivna i metall istället. Detta för att öka stabiliteten, precisionen samt hållbarheten av exempelvis fixturer, verktygshållare och verktygen. Det hade även varit bättre ifall man hade kunnat centrera monteringsplattan där bilen sätts ihop mer och flyttat den längre mot den stora roboten då detta hade ökat åtkomligheten för några av robotarna.

#### 6.2.1 Överensstämmelse med digitala tvillingen

Resultatet var att det ofta skiljde sig mellan verklighet och virtuell modell. Några anledningar till att det skiljer sig kan bero på att inmätningen av cellen inte är helt felfri då den gjordes manuellt. Verktygens TCP kan också ha små fel i inmätningarna och robotarna har väldigt små precisionsfel. När alla dessa fel läggs på varandra så är det ganska uppenbart att det kommer bli små fel. Dessa små fel spelar stor roll för vårt projekt då bilen som monteras är i så liten skala, vilket gör att felen blir proportionellt stora i förhållande till modellens storlek. En fullskalig bil hade medfört mycket större fel. Felen spelade dock inte lika stor roll för alla sekvenser av monteringen.

Ett av momenten som visat sig vara kritiskt är när roboten skulle plocka upp niten från nitmagasinet. Då krävdes väldigt bra precision på vilken vinkel som roboten kom in med samt att den träffade rätt då själva hålet i nitpistolen bara är 4 millimeter i diameter. Dessa kritiska moment kan korrigeras genom att manuellt korrigera roboten till rätt upplökningsposition, att göra en så kallad *touchup*. Felen kan också delvis undvikas med exempelvis instyrningar, som gör att det inte spelar så stor roll ifall roboten kör någon millimeter snett. Exempel på detta är de fasade piggar och hål som skapades på verktygsställ och verktyg, se bilaga A och bilaga B.

### 6.2.2 Produktion av flera bilar

Grupperna hann inte möjliggöra att flera bilar gick att montera i en sekvens. En anledning till är på grund av att det krävs mer komplexa ställ för bildelarna samt att både ställen och nitmagasinen kräver högre kapacitet än vad de behövde för att bara montera en bil. Detta visade sig vara en utmaning som grupperna inte hann lösa under projektets gång. Delvis var detta för att gruppens primära mål var att klara av en bil och när detta var löst skulle denna lösning justeras så att flera bilar kunde skapas i en sekvens. Grupperna hade hela tiden i åtanke att en sekvens av flera bilar hade varit det bästa resultatet, vilket präglade många av lösningarna som grupperna skapade. Men på grund av att den offline-programmerade monteringen av bara en bil inte var färdigställd när denna kandidatrapport skrevs fanns det ingen chans att försöka utveckla en sekvensmontering.

## 6.3 Omvänd ingengörsmetodik (reverse engineering)

Eftersom arbetet skett parallellt mellan grupperna så har inte alla moment gjorts digitalt före det sedan implementerats i monteringscellen. Exempelvis så hade en verklig lösning varit att konstruera hela cellen i den digitala tvillingen först och sedan bygga upp den. På grund av tidsbristen som uppstod efter den långa utbildningen och inväntan på de andra grupperna byggdes delar av monteringscellen upp utan att konstrueras digitalt innan. Hade allt skapats digitalt innan själva monteringsstationen börjat byggas så hade gruppen inte haft något att göra i första delen av projektet.

### 6.3.1 Samarbete

Samarbetet mellan grupperna var en viktig aspekt av projektet då alla var beroende av varandra. Kommunikation, frekventa designgranskningar av de andra grupperna och även att alla grupperna var på samma plats när arbetet pågick underlättade en hel del. Att grupperna är beroende av varandra kan också vara en nackdel och en viktig lärdom med ett projekt som detta. Just i bilfabrik-projektet så var arbetet uppdelat på ett sätt som gjorde att karossverkstaden behövde få ut bildelar för att digitala-tvillinggruppen och monteringsstationsgruppen skulle kunna komma vidare med många av delarna i sina arbeten. Detta då en stor del av gruppens arbete bestod av att utforma monteringsstationen efter hur bildelarna är konstruerade, samt vilka sensorer och aktuatorer som krävdes för att genomföra PLC kontrollen.

En annan lärdom är att det är viktigt att det måste vara fler än en person som har kompetens inom de olika områdena i ett projekt. I ett grupparbete händer det ofta att ett område hamnar efter på grund av att alla har olika arbetstempo eller har olika svåra uppgifter, därför är det viktigt att man kan få understöd av någon mer person som är insatt i det ämnet som har behov av mer arbete.

### 6.3.2 Infästningsmetod

Ett konstaterande är att det finns stora nackdelar förknippat med att inte ha svetsning som infästningsmetod. Mycket av projektets tid gick åt att ta fram en metod som var stark, snabb och smidig. Slutligen användes pop-nitar som är relativt starka för plast, men snabb- och smidigheten är bristande eftersom nitpistolen behöver byggas om till ett robotverktyg, den måste ha nitar i ett magasin samt att pistolen som egentligen är handhållen är väldigt stor och otymplig. Att göra en annan design av nitmagasin där nitarna sitter ännu mer precist hade varit bra då precisionen vid nitupplöckningen var problematisk. Detta kan ha varit på grund av att det nitmagasin som användes gjorde att varje nit slog i magasinet då magasinet föll ner efter varje hämtning. Detta tror gruppen är en av huvudledningarna till varför hämtningen var svår. Att göra exempelvis ett roterande magasin i metall skulle möjligtvis kunna förbättra precisionen och underlätta hämtningen.

## 6.4 Inmätningstoleranser

En av uppgifterna för detta kandidatarbete har varit att få ut så bra data som möjligt i form av koordinater för robotarna. Dessa koordinater har legat till grund för den digitala tvillinggruppen så att de kunnat simulera den digitala tvillingmodellen och skapa robotprogram med så hög precision som möjligt.

### 6.4.1 Spetsinmätning mot romerinmätning

Det två metoder som används för att mäta in, som beskrivs i 3.3, har visat sig ha skillnad i precision. Inmätningen med robotarnas mätspets var den metod som slutligen användes för att ta fram koordinater till den digitala tvillingen. Metoden är mer känslig i det manuella utförandet av inmätningen. Detta är på grund av när TCP mäts in genom att spetsen på verktyget skall placeras på samma punkt, så är handhavandet avgörande att placera spetsen så precis som möjligt på samma ställe. Precisionen för inmätningen avgörs även av robotens feltoleranser. Metoden i sig gav överlag tillräckligt bra data på de koordinater som den digitala-tvillinggruppen använde för att offline-programmera monteringssekvenserna.

## 6.5 Styrkor och svagheter med arbetet

Här diskuteras några av de styrkor och svagheter med projektet som upptäckts under arbetets gång.

### 6.5.1 Styrkor

En av de största styrkorna med arbetet har varit att det funnits bra förutsättningar att realisera sina idéer, vilket också har gjorts i stor utsträckning. Framförallt har kompletterande delar till arbetsstationen kunnat 3D-skrivas ut snabbt och prototyper till verktyg kunnat testats på mycket kort varsel. Även engagemanget hos gruppmedlemmarna i monteringsstationen har varit en stor styrka och har bidragit till ett positivt arbetsklimat och uppmuntrande till ett innovativt tankesätt. Slutligen har en stor styrka varit den breda uppsättningen kunskaper som erhållits av gruppmedlemmarna. Flera moment som gruppen tror kan återkomma i arbetslivet har används under projektets gång exempelvis offline- och online-programmering av industrirobotar, CAD, PLC och sensorer.

### 6.5.2 Svagheter

Projektets struktur gör att monteringsstations-gruppen och digitala-tvillinggruppen var beroende av kaross-verkstadens framsteg för att kunna till exempel bygga verktygen och veta hur monteringsstationen skulle utformas. Detta då själva bilen behövde vara relativt långt in i konstruktionsprocessen innan exempelvis verktyg och monteringsplattans utformning kunde konstrueras. Det tog lång tid innan bilkarossen var klar med bilen vilket gjorde att det tog tid innan det gick att börja bygga fixturer och verktyg till dem. Arbetet var svårt att genomföra parallellt för grupperna och flera flaskhalsar uppstod när vissa moment behövde vara klara av en grupp för att en annan grupp skulle kunna påbörja ett annat moment.

## 7 Slutsats

Resultatet som uppnåddes var av något lägre kvalitet än vad gruppen förväntade sig i början av projektet. Till stor del berodde det på diverse problem som dök upp under projektets gång som exempelvis avgränsningar, påverkan av de andra gruppernas arbete och oklarheterna som uppstod på grund av en helt öppen frågeställning. Nedan presenteras det slutsatser som går att dra.

### 7.1 Återkoppling till syftet

Syftet med projektet var att efterlikna en bilfabrik, vilket delvis har uppnåtts. Flera moment är realistiska som till exempel offline-programmeringen. Gruppen har verkligen fått en insikt i hur kritiskt det är att inmätningen av den verkliga cellen blir noggrann och precis. Det som inte varit så realistiskt med arbetet är infästningsmetoden som i en riktig fabrik troligen hade varit punktsvetsning, men som istället gjordes med plastnitar på grund av den känsliga omgivningen i PSL som gruppen arbetat i.

### 7.2 Montering

Ihopmonteringen skedde i fler steg än väntat från början då problem uppstod med både åtkomst för robotarna samt att robotarna skulle få plats att arbeta sida vid sida. Bilen monterades i princip från botten och upp. Hjulhus sattes först på, sedan bottenplatta, framdel, bakdel, höger dörr, vänster dörr och tak. Denna ordningen uppfattades som den bästa för de delar som gruppen arbetade med. Monteringsplattan som bilen monterades på hade kunnat positioneras mer optimalt för att öka robotarnas åtkomst och minska antal monteringsmoment. De monteringsmoment som förmodligen kunnat undvikas vid bättre placering är då bilen roteras 180 grader för att nitpistolen skall komma åt.

### 7.3 Fixturer, verktygsställ och ställ för bildelar

För att kunna montera flera bilar i sekvens hade ställen för bildelarna behövt ha större kapacitet eller konstrueras på ett sätt som möjliggör att delar exempelvis kan matas fram till plockningsposition. Verktygsstäl- len fungerade bra men för att optimera monteringstiden ytterligare hade exempelvis verktygsställen kunnat positioneras närmare monteringsytan vilket hade minskat tiden för verktygsbyten.

### 7.4 Infästningsmetod

Det kan konstateras att det finns stora nackdelar förknippat med att inte ha svetsning som infästningsmetod för ett projekt som detta. Mycket av projektets tid gick åt att ta fram en metod som var stark, snabb och smidig för infästningen. Slutligen användes pop-nitar som är relativt starka för montering av plast, men snabbheten och smidigheten är bristande eftersom nitpistolen behövde byggas om till ett verktyg som passade på roboten. Den måste även ha nitar i ett magasin och pistolen som egentligen är handhållen är väldigt stor och otymplig vilket gjorde det komplicerat att komma åt där det skulle nitas. Det uppstod stora problem ända in mot slutet av projektet då verktyget skulle suga tag i en nit men istället krossade niten som inte var helt rak och kom in snett mot verktyget. Detta löstes hastigt mot slutet med hjälp av en 3D-printade tratt som konstruerades, men gruppen känner att det förmodligen skulle kunna konstrueras en bättre lösning på detta problem.

## 7.5 PLC och kommunikation

PLC programmeringen var komplex och tog lång tid att sätta sig in i. Grundtanken var att använda PLC:n så lite som möjligt, men istället tog det upp relativt mycket tid och blev inte färdigställt innan rapporten färdigställdes. Trots det har mycket bra kommit ur det, som till exempel ökad förståelse för kommunikation mellan robotar och datorer. För framtida arbeten finns också en simpel mall i Tia portalen för liknande projekt. Detta var något som gjordes från ett gammalt överorganiserat projekt och förenklades ner så mycket det var möjligt. Framtida projekt kan nu enklare se hur laboratoriet samverkar genom PLC, slipper se gammal avstängd utrustning och det finns dessutom en tydlig struktur och ett huvudprogram att utgå ifrån.

## 7.6 Skillnader mellan digital tvilling och verklighet

Det var tydligt att det blev små skillnader mellan den digitala tvillingen och verkligheten. Dessa små skillnader gjorde att monteringen blev svårare än väntat. Dessa små skillnader försökte grupperna korrigera genom att göra så noggranna inmätningar som möjligt och även genom att jobba med toleranser i exempelvis passningar för hål. Även instyrningar gjordes för att försöka korrigera för eventuella fel.

## 7.7 Förslag till fortsättningsarbete

För att fortsätta på detta arbete föreslår gruppen att fokus läggs på konstruktionen av ställen till delarna. Hade dessa förbättrats så hade flera bilar kunna monteras i sekvens. Ett bättre ställ hade varit en anordning som kan transportera fram nya delar till samma hämtningsposition automatiskt, så att roboten kan plocka en likadan del på samma ställe flera gånger i rad. PLC:n hade i så fall behövts utökas genom att lägga till fler sensorer vilket hade möjliggjort ett mer komplext systemet som kan montera flera bilar i rad. Någon stadigare konstruktion för nitmagasinen hade också varit bra då denna var väldigt känslig för små störningar. En variant som diskuterades var att med hjälp av en PLC styrd låscylinde låsa fast niten i en viss position medans popnitspistolen gick in för att plocka upp niten. Därefter släppa niten och därav få en hög repeterbarhet på upphämtningen av niten.

## Referenser

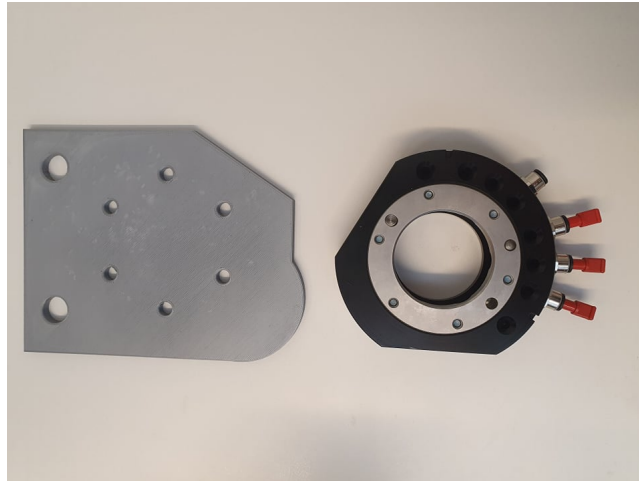
- 3DExperienceReferens. (2022). A Game Changer for Business and Innovation. *3DExperience*. <https://www.3ds.com/3dexperience>
- ABB. (2022a). Collision Detection. *ABB*. Hämtad 11 maj 2022, från [https://library.e.abb.com/public/d4708d0240be2966c125772f00528ca9/Collision%5C%20det%5C%20PR10044EN\\_R2.pdf](https://library.e.abb.com/public/d4708d0240be2966c125772f00528ca9/Collision%5C%20det%5C%20PR10044EN_R2.pdf)
- ABB. (2022b). Product specification IRB 140. *ABB*. Hämtad 3 maj 2022, från <https://library.e.abb.com/public/a7121292272d40a9992a50745fdaa3b2/3HAC041346%5C%20PS%5C%20IRB%5C%20140-en.pdf>
- ABB. (2022c). Product specification IRB 1600/1660. *ABB*. Hämtad 3 maj 2022, från <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC023604-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB. (2022d). Product specification IRB 4600. *ABB*. Hämtad 3 maj 2022, från <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC032885-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Andersson, A., Lindahl, H. & Sandström, J. (2014). Utveckling av flexibel fixtur. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/203208>
- Ben-Ari, M. & Mondada, F. (2017). Kinematics of a Robotic Manipulator. *Elements of Robotics*, 267–291. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1_16)
- Birkelid, A. H., Eikevåg, S. W., Elverum, C. W. & Steinert, M. (2022). High-performance polymer 3D printing – Open-source liquid cooled scalable printer design. *HardwareX*, 11, e00265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00265>
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers*. Elsevier Science.
- Emhart Technologies. (2008). ProSet® 1600 Rivet Tool [Datablad]. Hämtad 3 maj 2022, från <https://poprivettooling.com/wp-content/uploads/pop-rivet-tooling-pop-proset-1600-brochure.pdf>
- Flexlink. (2016). *Enclosures And Safety Guards*. [https://www.flexlink.com/zcms/zpublish/45/uploads/45/tech\\_lib/14909570928508157041\\_TC40\\_20170331\\_web.pdf](https://www.flexlink.com/zcms/zpublish/45/uploads/45/tech_lib/14909570928508157041_TC40_20170331_web.pdf)
- Hexagon. (2022a). Portabla mätarmar. *Hexagon Manufacturing Intelligence*. Hämtad 12 maj 2022, från <https://www.hexagonmi.com/sv-SE/products/portable-measuring-arms>
- Hexagon. (2022b). Probes for Portable Measuring Arms. *Hexagon Manufacturing Intelligence*. Hämtad 4 mars 2022, från <https://www.hexagonmi.com/products/portable-measuring-arms/accessories-for-portable-measuring-arms/probes-for-portable-measuring-arms>
- Higherprecision. (2007). The Advantages of Using a Ruby Ball Probe. *Higher Precision*. Hämtad 4 mars 2022, från <https://www.higherprecision.com/blog/the-advantages-of-using-a-ruby-ball-probe#:~:text=The>
- IFR. (2020). IFR presents World Robotics Report 2020. *IFR International Federation of Robotics*. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>
- Kihlman, H. & Engstrom, M. (2010). Flexapods - Flexible Tooling at SAAB for Building the NEURON Aircraft. *SAE international*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/2010-01-1871>
- Kivelä, L. (2021). PETG vs PLA Filament: The Differences. *All3dp*. Hämtad 3 maj 2022, från <https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>
- Korus, S. (2019). Industrial Robot Cost Declines Should Trigger Tipping Points in Demand. *ARK Invest*. <https://ark-invest.com/analyst-research/industrial-robot-cost-declines/>
- Manufacturer, T. (2022). How automation will shape the future. *The Manufacturer*. Hämtad 4 mars 2022, från <https://www.themanufacturer.com/articles/how-automation-will-shape-the-future/>

- Pollack, H. (1988). *Tool Design*. Prentice-Hall. <https://books.google.se/books?id=ih5SPgAACAAJ>
- Prescient Technologies. (2022). Design principles of Jigs and Fixtures. *Prescient Technologies*. <https://prescient.com/resources/knowledge-center/jigs-and-fixtures/design-principles-of-jigs-and-fixtures.html#:~:text=The%5C%203%5C%2D2%5C%2D1%5C%20method,the%5C%201st%5C%20and%5C%20nd%5C%20planes>.
- Prodtex. (2022). BoxJoint. *Prodtex*. <https://www.prodtex.com/boxjoint/>
- Profibus & Profinet International. (2022). Profibus Overview. *PROFIBUS & PROFINET International (PI)*. <https://www.profibus.com/technology/profibus/overview>
- PRUSA research. (2022). *Original Prusa i3 MK3S+ kit*. [https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit-3/?gclid=Cj0KCQjw4PKTBhD8ARIsAHChzRIYv-nHV6vR\\_R1Zf6R4JN0Y3WXw1uQyK- kkl\\_X7XcxbfdGuP\\_rGr40aAsepEALw\\_wcB](https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit-3/?gclid=Cj0KCQjw4PKTBhD8ARIsAHChzRIYv-nHV6vR_R1Zf6R4JN0Y3WXw1uQyK- kkl_X7XcxbfdGuP_rGr40aAsepEALw_wcB)
- Salih, H., Abdelwahab, H. & Abdallah, A. (2017). Automation design for a syrup production line using Siemens PLC S7-1200 and TIA Portal software. *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCCCEE.2017.7866702>

## 8 Bilagor

### A Verktyg

Figur 16: Första iterering verktygsfäste.

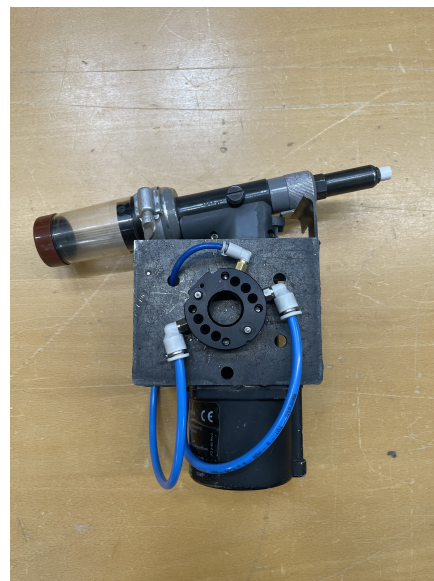


Figur 17: Nitpistolsverktyget

(a) Framsida nitpistol



(b) Baksida nitpistol

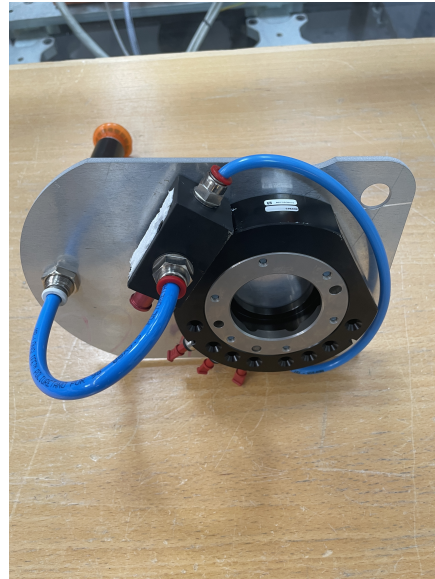


Figur 18: Orange sugverktig

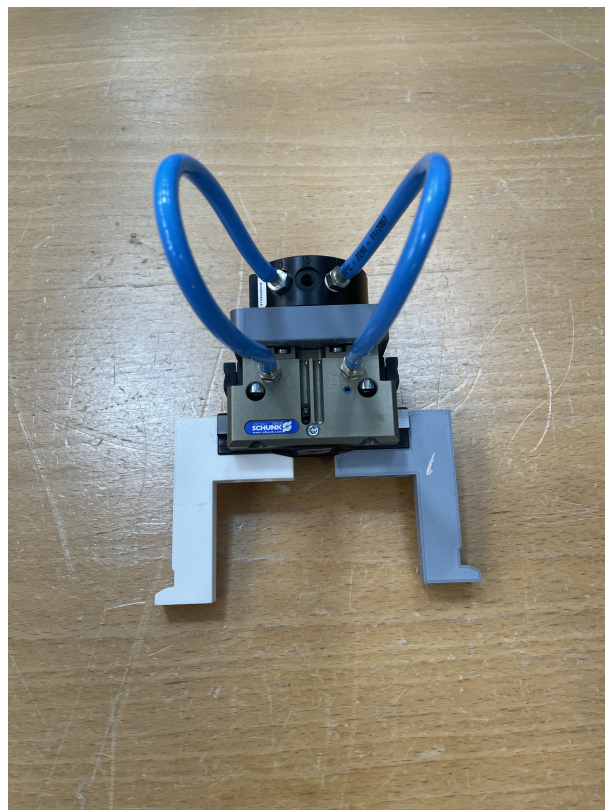
(a) Framsida



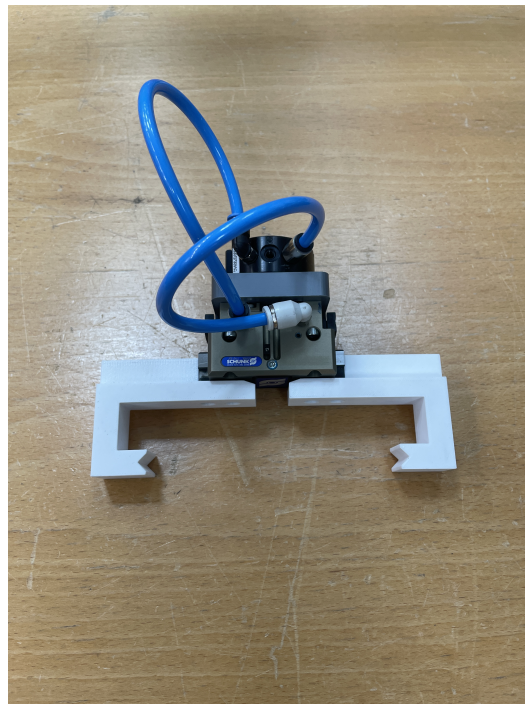
(b) Baksida



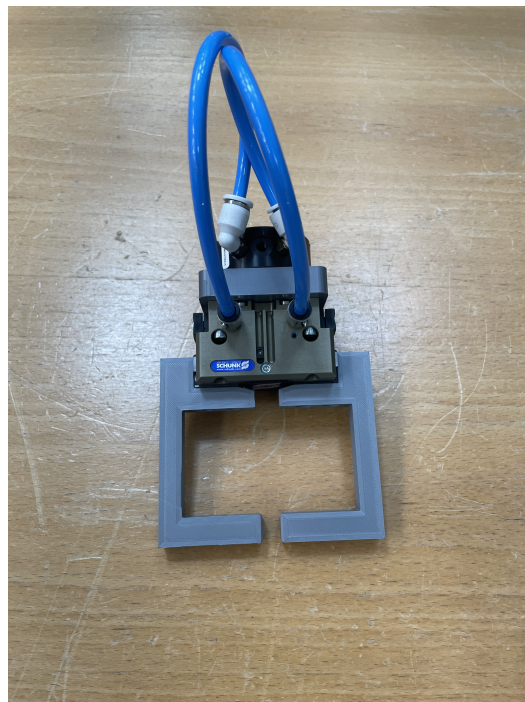
Figur 19: Gripper till att lyfta taket



Figur 20: Gripper till att lyfta bakdel

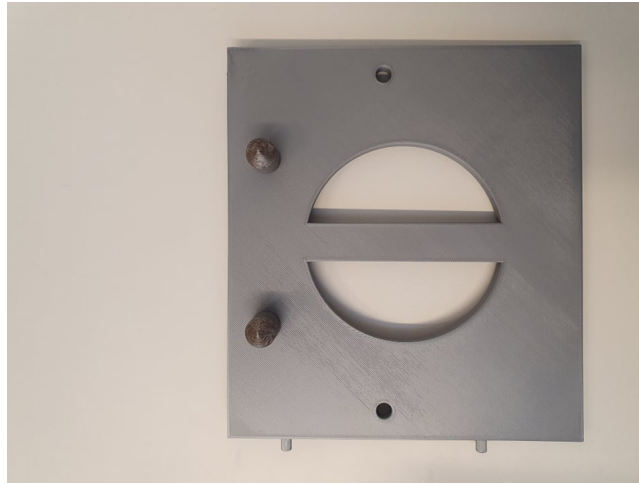


Figur 21: Gripper till att lyfta sidorna



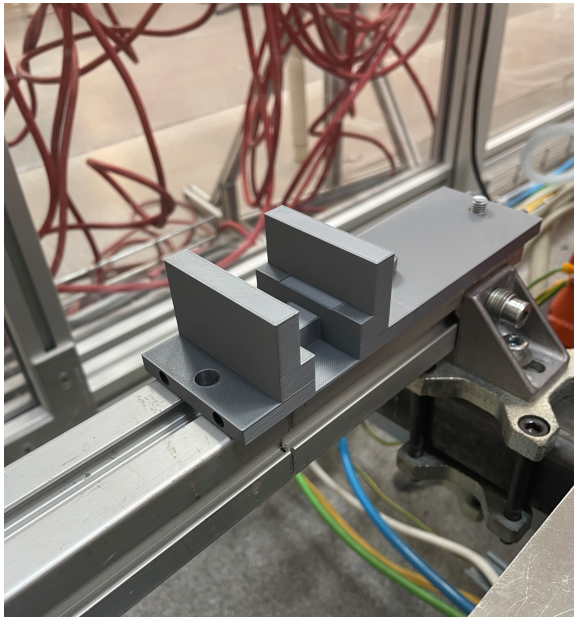
## B Verktygsställ

Figur 22: Första iterering verktygsställ.

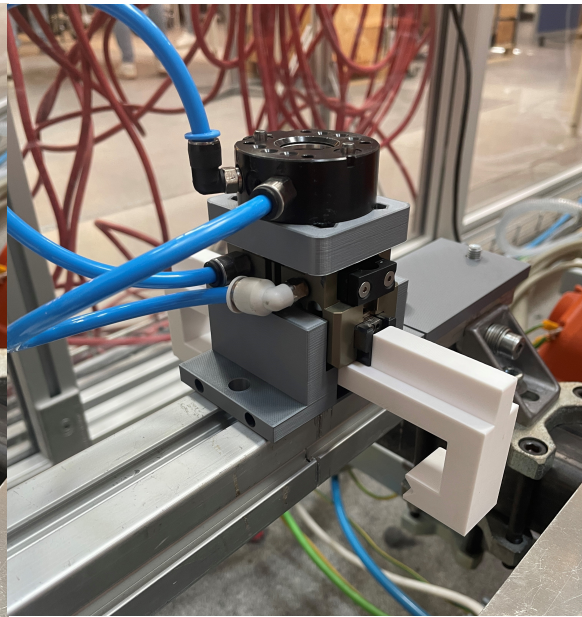


Figur 23: Ställ till gripper som lyfter bakdel

(a) Utan verktyg

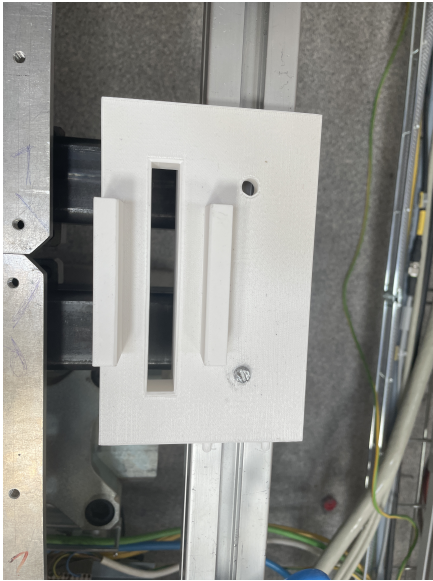


(b) Med verktyg

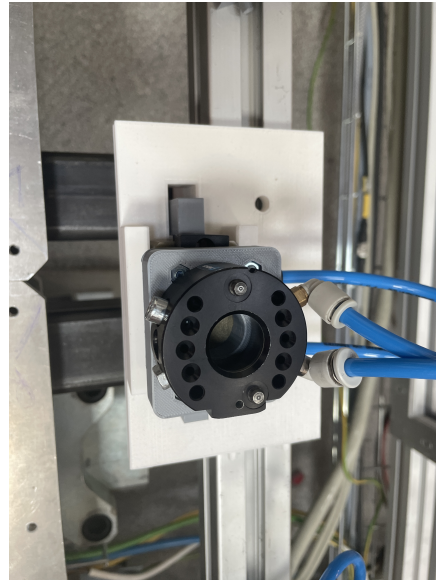


Figur 24: Ställ till gripper som lyfter sidor

(a) Utan verktyg

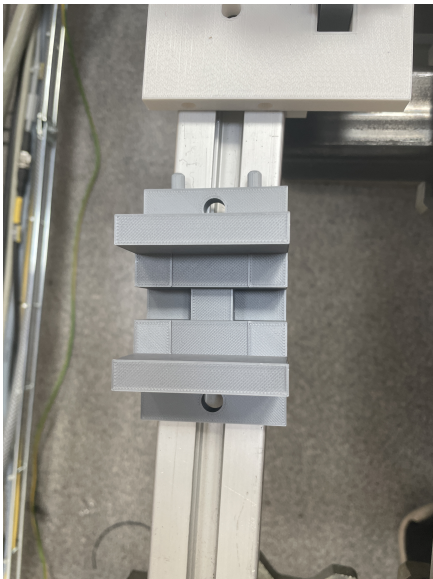


(b) Med verktyg



Figur 25: Ställ till gripper som lyfter tak

(a) Utan verktyg

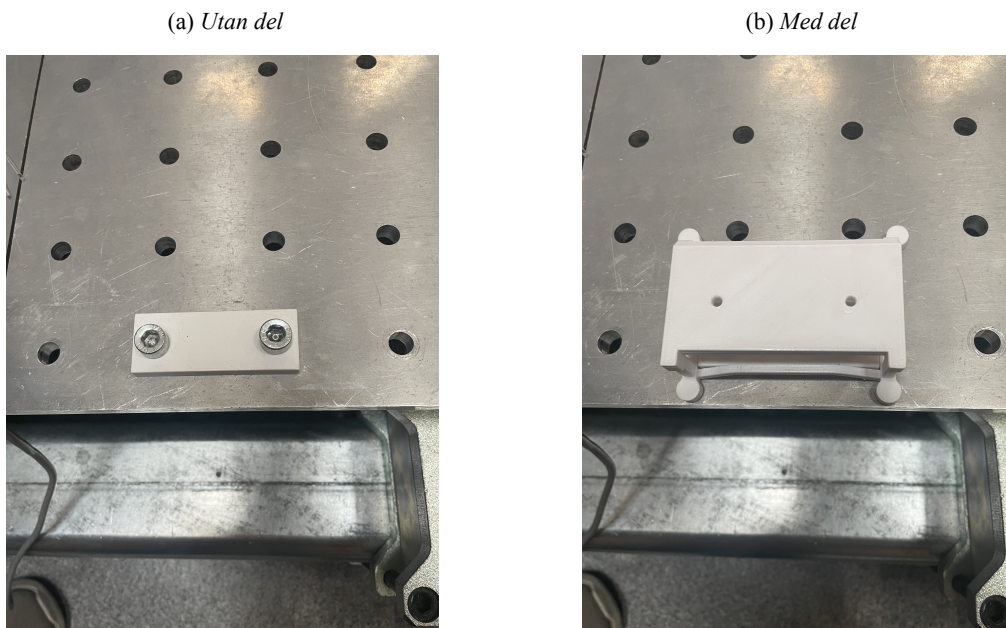


(b) Med verktyg

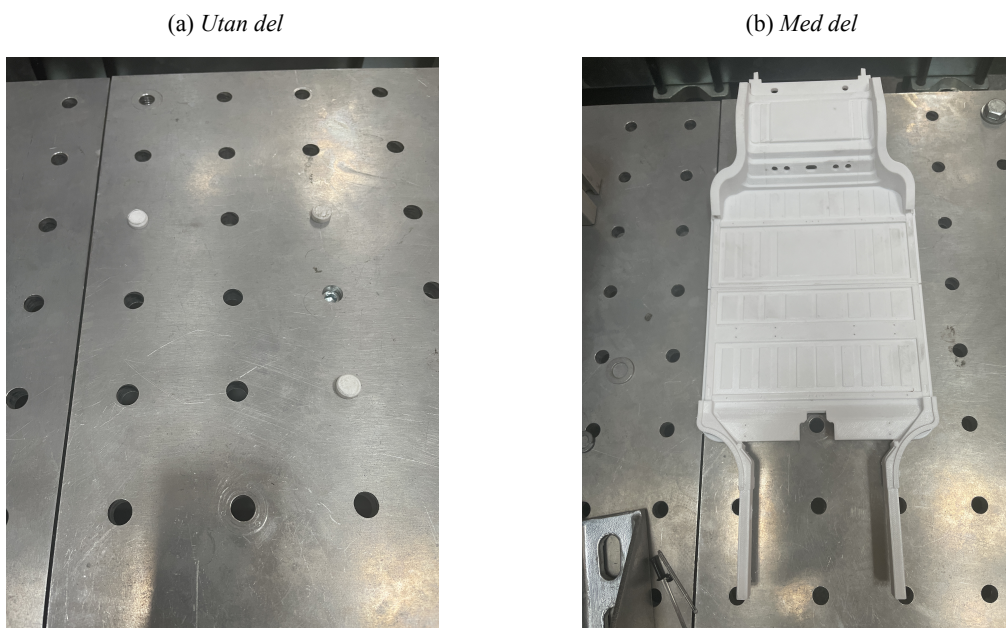


## C Ställ för bildelar samt nitar

Figur 26: Ställ till hjulhuset

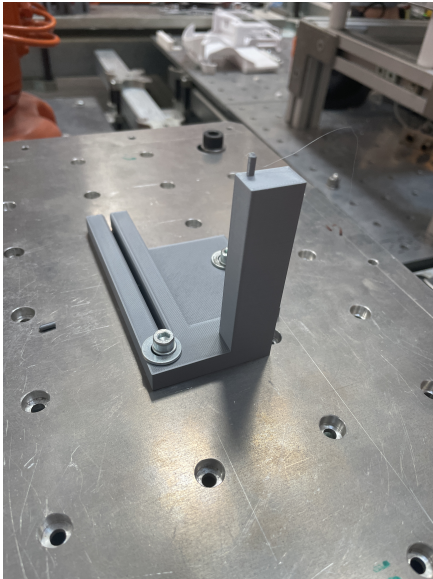


Figur 27: Ställ till bottenplatta



Figur 28: Ställ till sidorna

(a) Utan del

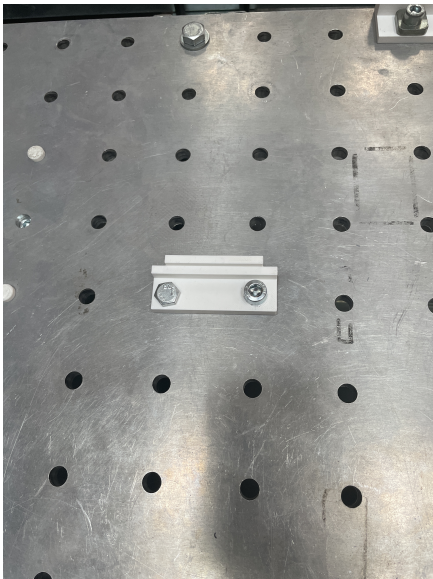


(b) Med del

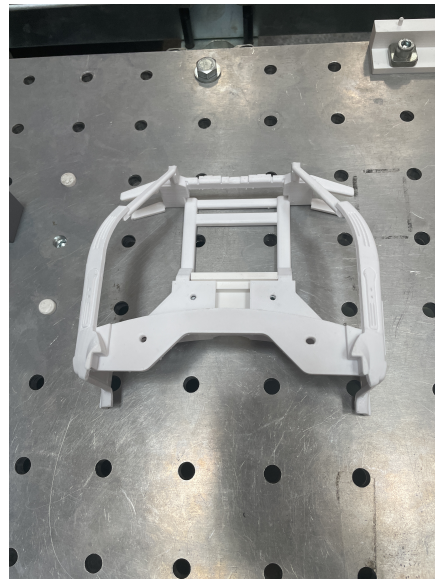


Figur 29: Ställ till framdelen

(a) Utan del

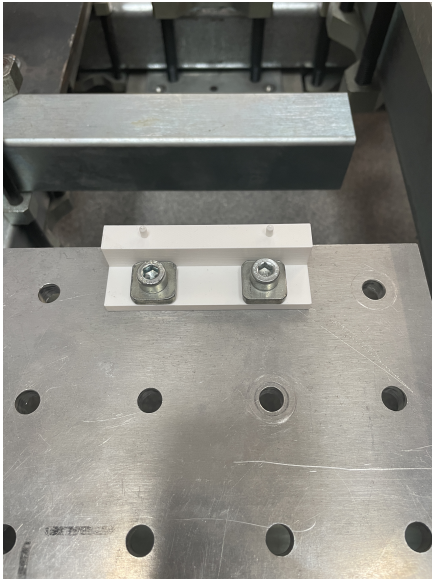


(b) Med del



Figur 30: Ställ till bakdel

(a) Utan del

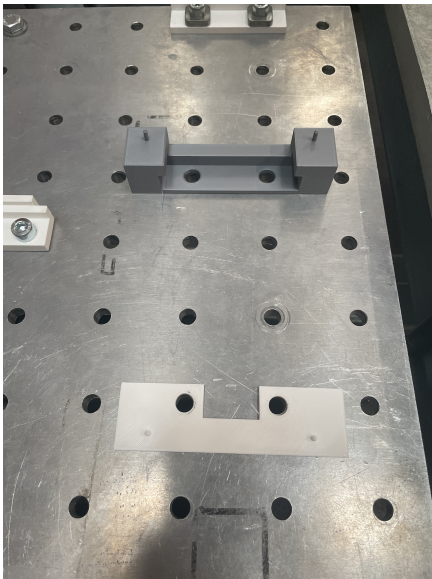


(b) Med del

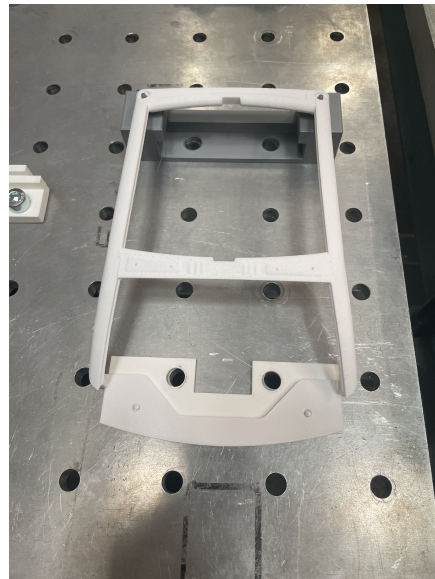


Figur 31: Ställ till tak

(a) Utan del

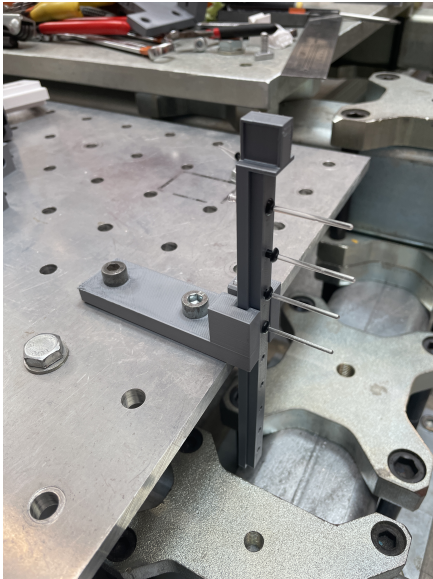


(b) Med del

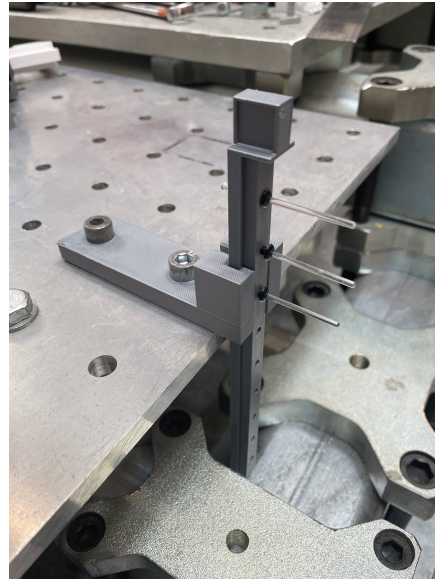


Figur 32: *Nitmagasin*

(a) *Nitmagasin 4 nitar*

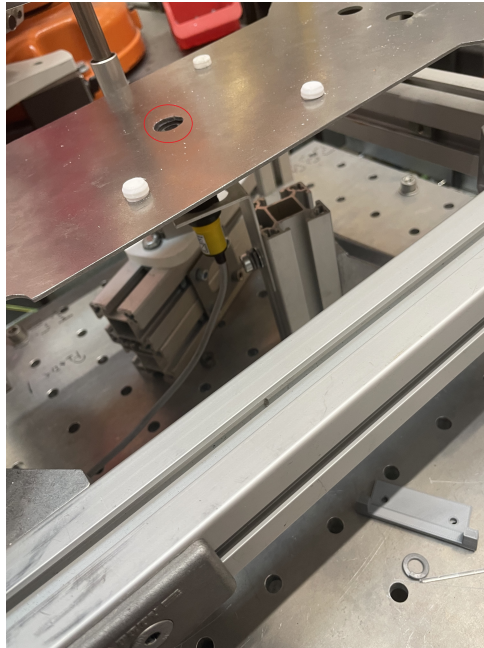


(b) *Nitmagasin efter nit är uttagen*



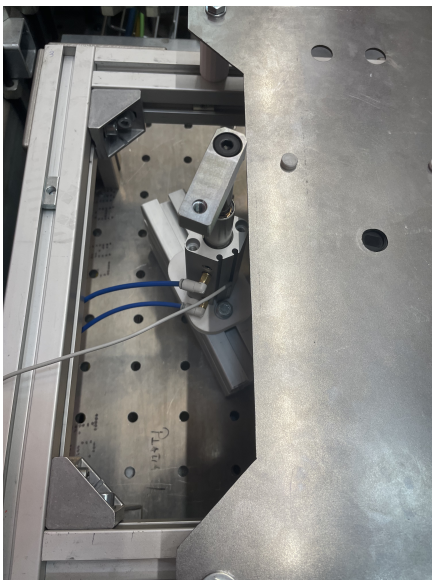
## D Sensorer och låsningar

Figur 33: Fotoelektrisk sensor, känner av om bilens bottenplatta är på plats.

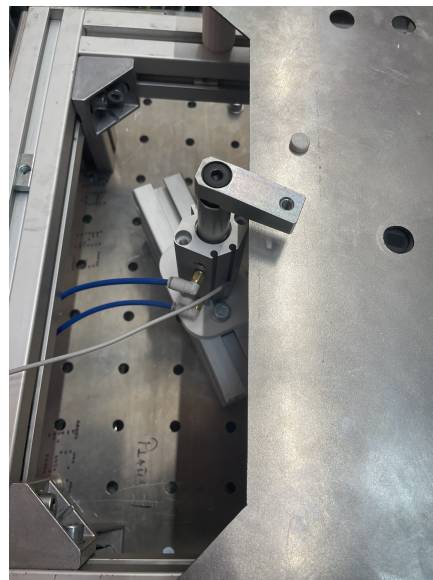


Figur 34: Pneumatisk låsning i z-led av bottenplattan

(a) z-låsning öppen



(b) z-låsning stängd



**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP**  
**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2022  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**