UPPSALA UNIVERSITET

ISRN UTH-INGUTB-EX-M-2025/009-SE

Examensarbete 15 hp

Maj 2025

Automatiserad provhantering för kemikalieresistenstest

Utformning och utvärdering av en robotslösning

Albin Larsson

Högskoleingenjörsprogrammet i maskinteknik

UPPSALA UNIVERSITET

Robotic Sample Handling for Chemical Resistance Testing

Albin Larsson

Abstract

Laboratory automation can contribute to higher repeatability for experiments and lower the amount of repetitive manual tasks often associated with laboratory work. This bachelor's thesis, carried out at Cytiva in Uppsala, investigated how a collaborative robot could be used to automate a chemical resistance test. A test was designed to determine the chemical exposure threshold at which the test subject's functionality begins to degrade. This test requires handling many individual samples and is time-consuming.

The project explored how the test could be effectively carried out with a robot, and what supporting equipment was needed for the robot. This was investigated through observations, interviews and document studies. An extensive initial effort was dedicated to mapping out the test process, the test subject and the available equipment, as well as collecting customer needs which was then translated to specification for the robot cell. This initial work provided the project with clear boundaries and objectives, which facilitated the subsequent work.

A large part of the work was devoted to generating, testing and further developing concepts for various sub-solutions in the project – ranging from physical fixtures to robot code. The physical concepts were designed using CAD software and 3D printed to facilitate hands-on evaluation. Pugh matrices were employed to compare and select concepts.

A final verification run of the developed robot cell prototype was conducted, demonstrating capability to automatically performing a test with a total of six samples in three different chemicals containers, with average deviations from the specified exposure and rinse times with one second.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Magnus Emerius Ämnesgranskare: Erik Hultman

Examinator: Lars Degerman

Sammanfattning

Automatisering i laboratorier kan bidra till ökad repeterbarhet och minskat manuellt arbete för de tester och experiment som utförs. I detta examensarbete, som utfördes på forskning- och utvecklingsavdelningen på Cytiva i Uppsala, undersöktes hur en kollaborativ robot kunde användas för att automatisera ett kemikalieresistenstest. Ett test som undersöker en komponents förmåga att exponeras för olika kemikalier med bibehållen funktion, och är ett test som i praktiken innebär många enskilda prover och en betydande tidsåtgång.

Frågor om hur testet lämpligtvis kunde genomföras med en robot och vilken kringutrustning den krävde undersöktes genom observationer, intervjuer och dokumentstudier. Ett stort initialt fokus lades på en kartläggning av testprocessen, testobjektet och tillgänglig utrustning, samt inhämtning av kundbehov vilka sedan översattes till produktkrav för robotcellen. Kartläggningen och produktkraven gav projektet tydliga ramar och mål, vilket banade väg för det fortsatta arbetet.

En stor del av arbetet upptogs av att generera, testa och förfina koncept till de olika dellösningarna arbetet kom att innefatta – från fysiska fixturer till robotkod. Efter design i CAD-mjukvara tillverkades de fysiska koncepten med 3D-utskrift för att möjliggöra praktiska utvärderingar. Som metod för koncepturval användes Pughmatriser för att kvantifiera olika koncepts prestanda utifrån valda bedömningsfaktorer.

En slutlig verifieringskörning av den utvecklade robotcellen genomfördes och visade att prototypen hade förmåga att, med små genomsnittliga tidsavvikelser, kunde genomföra testet automatiskt efter avslutade initieringssteg.

Nyckelord: kollaborativ robot, laboratorieautomation, provhantering, robotautomation

Förord

Jag vill här uttrycka min stora tacksamhet till de personer som möjliggjort detta projekt, samt väglett och stöttat mig genom arbetets gång. Tack till min eminenta ämnesgranskare Erik Hultman, för dina pedagogiska färdigheter, din frikostiga generositet av kunskap och ditt smittande intresse för robotik. Tack till min handledare Magnus Emerius för att du gav mig chansen att arbeta på Cytiva med detta spännande projekt, och för det stöd i form av samtal, kontaktförmedling och allt annat som behövde ordnas för att det här projektet skulle bli möjligt. Tack till Emanuel för att du tänkte ut den perfekta exjobbsuppgiften, och för all hjälp och tid du bistått mig med längs vägen. Tack till Daniel för agerande som bollplank och vägledare under arbetet med projektets programmeringsproblem. Tack Cecilia för allt lotsande till, från och runt på avdelningen. Tack Martin för all exemplarisk hjälp med 3D-utskrifter. Tack även till alla tillfälliga kollegor på avdelningen för fysikalisk verifiering för er öppenhet och att ni banat mig väg till en återfunnen förtjusning för korsord.

Sist men inte minst, tack även till Li – utan dig, ditt stöd och dina kloka ord hade inte den här utbildningen, än mindre examensarbetet, genomförts med samma motivation och driv. ♥

Uppsala, maj 2025

Albin Larsson

Innehållsförteckning

1 Introduktion 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Problembeskrivning 2
1.3 Syfte 2
1.4 Frågeställningar 2
1.5 Avgränsningar 3
2 Teori 4
2.1 Kollaborativa robotar 4
2.2 Programmering av kollaborativa robotar 5
2.2.1 Kommunikation och filöverföring 6
2.2.2 Koordinatsystem 6
2.3 Gripdon 7
2.4 Kringutrustning och miljö 8
2.5 USA-principen 9
2.6 Tidigare forskning 9
2.6.1 Tidigare examensarbeten 9
3 Metod 11
3.1 Design av studien 11
3.2 Datainsamlingsmetod 12
3.2.1 Observationer 12
3.2.2 Intervjuer 12
3.2.3 Dokumentstudie 12
3.2.4 Konceptgenerering 13
3.3 Dataanalys 13
3.4 Validitet och reliabilitet 13
3.5 Etiska ställningstaganden 13
3.5.1 Informerat samtycke och anonymitet 13
3.5.2 Sekretess och hantering av känslig information 14
3.5.3 Säkerhetsaspekter vid robotautomation 14
3.5.4 Konsekvenser av arbetet 14
4 Empiri 15
4.1 Kartläggning 15
4.1.1 pH-markör 15
4.1.2 Steg i testprocessen 16
4.1.3 Produktkrav 17
4.1.4 Förenkling av process 17
4.2 Konceptgenerering och konceptval 18
4.2.1 Delproblem 18
4.2.2 Sammanställning av koncept 18

4.2.3 Val av gripdon ... 19
4.2.4 Val av objektglashållare ... 20
4.2.5 Val av kemikaliebehållare ... 20
4.2.6 Val av teknik för justering av icke-centrerat grepp ... 20
4.2.7 Val av mjukvarustruktur ... 21
4.2.8 Konceptval ... 21
4.3 Prototypframtagning ... 22
4.4 Programmering av robot & annan nödvändig kod ... 22
4.4.1 Robotkod ... 22
4.4.2 Pythonscript ... 22
4.4.3 Dokumentstudie ... 23
4.5 Utvärdering av gripdon ... 23
4.5.1 Utrustning ... 23
4.5.2 Testförfarande ... 24
4.5.3 Observationer som svarar mot bedömningsfaktorer ... 25
4.5.4 Övriga observationer ... 25
4.5.5 Analys av gripdonstest ... 25
4.6 Toleranser vid mätning ... 25
4.6.1 Testförfarande ... 26
4.6.2 Analys av mättoleranstest ... 26
5 Robotlösningens funktion och prestanda ... 27
5.1 Fysisk prototyp ... 27
5.1.1 Övrig kringutrustning ... 28
5.2 Kodstruktur: Planeringsscript & robotkod ... 28
5.2.1 Planeringsscript ... 29
5.2.2 Robotkod ... 30
5.3 Verifiering av robotlösningen ... 31
6 Analys ... 34
6.1 Frågeställning 1: Utformning av lösning ... 34
6.2 Frågeställning 2: Krav på kringutrustning ... 34
6.2.1 Analys av robotkod och pythonscript ... 35
7 Diskussion ... 36
7.1 Diskussion om resultatet ... 36
7.2 Förbättringsmöjligheter ... 37
7.3 Metoddiskussion ... 38
7.4 Generaliserbarhet av resultat ... 38
8 Slutsatser ... 40
8.1 Slutsatser av arbetet ... 40
8.2 Förslag på fortsatt arbete ... 40
9 Referenser ... 41

Tabellförteckning

Tabell 1: Kundbehov från bilaga 1 omformulerade som produktkrav 17
Tabell 2: Konceptsammanställning för olika delproblem 18
Tabell 3: Pugh-matris för val av gripdon 19
Tabell 4: Pugh-matris för utvärdering av olika koncept av objektglashållaren 20
Tabell 5: Pugh-matris för utvärdering av koncept för kemikaliebehållare 20
Tabell 6: Pugh-matris för utvärdering av koncept för justering av förskjutet grepp 21
Tabell 7: Pugh-matris för utvärdering av koncept för mjukvarustruktur 21
Tabell 8: Valda koncept 21
Tabell 9: Utrustning/uppställning för experiment 23
Tabell 10: Exponeringstider från verifieringskörningen 33
Tabell 11: Sköljtider från verifieringskörningen 33
Tabell 12: Tider för kombinerade rörelser under verifieringskörning 33

Figurförteckning

Figur 1: Kollaborativ, UR3e, från Universal Robots (Universal Robots, u.å.) 4
Figur 2: Exempel på programmeringsgränsnitt i Universal Robots handterminal (Universal Robots, 2025a) 5
Figur 3: Exempel på programmeringsgränsnitt i ABBs handterminal (ABB, u.å.)..... 6
Figur 4: Olika typer av koordinatsystem som nyttjas vid robotprogrammering 7
Figur 5: Gripdon med utbytbara fingrar från Robotiq (Robotiq, u.å.) 8
Figur 6: Vakuumgripdon från Robotiq med inbyggd vakuumpump (Robotiq, u.å.) 8
Figur 7: Flödesschema som beskriver arbetets steg 11
Figur 8: Områden för parametervärde som ska undersökas av test 16
Figur 9: Steg i genomförandet av kemikalieresistenstest 16
Figur 10: Exempel på sugkopp i bälgmodell ”B8”, lik den som användes i testet (RS Components AB, u.å.)..... 24
Figur 11: Rendering av de 3D-utskrivna gripfingrarna som användes i testet tillsammans med det mekaniska gripdonet 24
Figur 12: Testets steg. Vakuumgripdon till vänster och mekaniskt gripdon till höger. De gröna cirklarna markerar de robotmål mellan vilka den angivna förflyttningen ägde rum. 24
Figur 13: Uppställning för test av mätdiodens aktiva område..... 26
Figur 14: Bilder från testets genomförande, f.v. markör centrerad över mätdiod, markör förflyttad 1 mm i positiv x-riktning. 26
Figur 15: Rendering av det slutgiltigt koncept för robotcellen. 27
Figur 16: Bild på den robotcellen med alla fixturer monterade 28
Figur 17: Den slutgiltiga kodstrukturen och hur den relaterar till användaren 29
Figur 18: Planeringsscriptets struktur med inputs och outputs..... 30
Figur 19: Illustration av robotkodens struktur 30
Figur 20: Hur roboten nyttjar "verktygskontakt" för att positionera markör i samma z-nivå som mätdiod 31
Figur 21: Parametrar för testfallet vid verifiering 32
Figur 22: Bildrutor från verifiering av robotlösningen, f.v. placering av hållare, plock av prov, mätning, placering i sköljstation 32
Figur 23: Kombinerade rörelser för vilka rörelsetider är tabellerade i tabell 12..... 33

1 Introduktion

I följande avsnitt presenteras bakgrunden till arbetet, beskrivning på det problem som arbetet ämnar lösa samt de frågeställningar arbetet utgår ifrån.

1.1 Bakgrund

Läkemedelsbranschen är en basnäring i Sverige och den exporterar varor för 153 miljarder kronor årligen, det innebär att branschen inte bara gör befolkningen friskare utan även rikare menar branschorganisation Lif (2022).

Läkemedlen med en aktiv substans sprungen ur organiska ämnen kallas för biologiska läkemedel och kan användas för att behandla tidigare svårbehandlade sjukdomar, till följd av deras molekylära struktur och hur den interagerar med människokroppen. Inom kategorin biologiska läkemedel återfinns allt från vaccin, cancermediciner och behandlingar mot eksem (Läkemedelsverket, 2020).

Tillverkning av läkemedel är noga kontrollerad och företag behöver uppfylla högt ställda krav samt följa god tillverkningssed för att erhålla ett tillverkningstillstånd (Läkemedelsverket, 2019). Utöver dessa externa krav på tillverkningen kräver biologiska läkemedel att stor noggrannhet vidtas längs hela produktionskedjan - från råmaterial till användning. Det innebär att tillverkningsprocessens parametrar endast får röra sig inom snäva toleranser och att utrustningen i systemet måste vara pålitliga och av säkerställd kvalitet. Även med rätt tillverkningsparametrar genom hela processen förekommer variationer, vilka beror på de organiska materialets natur, och en noggrann analys måste utföras på varje tillverkad sats (Kesik-Brodacka, 2018).

Cytiva är verksamt inom läkemedelsindustrin som leverantör till läkemedelstillverkare och forskare. De har lång erfarenhet och gedigen kompetens av metoden kolonnkromatografi, som används för att skilja olika molekyler i en vätska från varandra, och är vanligt förekommande vid framställning av biologiska läkemedel (De Luca m.fl., 2020). Cytiva erbjuder sina kunder skräddarsydda laboratorie- och produktionslösningar som bygger på den tekniken.

Vid ny- och vidareutveckling av teknik, av både hårdvara och biokemiska substanser, utförs en stor mängd tester och kontroller av produkten för att säkerställa funktion och kvalitet. På senare år har automation inom tagit större plats i läkemedelsindustrin och laboratorier, där en stor del av arbetsuppgifterna är enformiga, enligt Lena Nyman på Karolinska Institutet (ABB, 2020), och är därmed lämpliga att automatisera.

Att använda en robot möjliggör en flexibel automationslösning, där roboten efter en omprogrammering kan hantera flera olika uppgifter. Kollaborativa robotar, som är utformade för att arbeta i samma miljö som människor, är särskilt lämpade för att ge mindre enheter och

företag kompakt automationskapacitet med låga krav på programmeringsfärdigheter (Universal Robots, 2021).

1.2 Problembeskrivning

Avdelningen för forskning och utveckling på Cytiva arbetar dagligen med att ta fram nya och förbättrade lösningar att erbjuda företagets kunder. Produkterna som företaget tar fram är ett komplett paket av mjukvara, hårdvara och biokemiska komponenter för läkemedelsframställning, från laboratorie- till produktionsskala. Avdelningens uppgift är dels att utforma nya produkter, förbättra tidigare produkter och att säkerställa att alla ingående komponenter har den prestanda företaget anger. Det är av yttersta vikt att kvalitetssäkra funktionen av alla komponenter utifrån en rad parametrar med rigorösa tester. Detta är lika viktigt vid utveckling av produkter som vid exempelvis byte av komponentleverantör.

Kemikalieresistenstest av komponenter är ett sådant test, där målet är att erhålla den maximala exponeringstiden för en given komponent innan funktionen går förlorad. Exponering för ett flertal kemikalier med stigande koncentration undersöks vid dessa tester. För att nå pålitliga statistiska slutsatser krävs en viss mängd data för varje kombination av tid, kemikalier och koncentration vilket ofta innebär att ett stort antal enskilda exponeringsprov måste genomföras. Idag sker denna typ av test manuellt, vilket inte bara är tidsödande utan även för med sig ett flertal felkällor kopplade till den mänskliga hanteringen, exempelvis avvikande tider och avvikande teknik vid mätning. För att råda bot på dessa problem har utvecklingsavdelningen undersökt lösningar för att automatisera delar av kemikalieresistenstesterna och låta en kollaborativ robot sköta processen. Det skulle möjliggöra att utvalda tester går att utföra utanför ordinarie arbetstid vilket skulle resultera i snabbare utvecklingstider, samtidigt som testerna kommer att utföras likadant varje gång vilket ger mer pålitlig data.

För att effektivisera testprocessen kommer en lösning tas fram som automatiserar provhanteringen med en kollaborativ robot av länkarmstyp. En sådan lösning innebär flera tekniska utmaningar: hur ska roboten interagera med kringutrustningen och närmiljön, vilka krav ställs på systemets precision vid matning av nya prov att testa?

1.3 Syfte

Examensarbetet syftar till att undersöka hur en kollaborativ robot kan användas för att automatisera provhanteringen vid ett kemikalieresistenstest, med målet att minska mängden manuellt arbete för testet och säkerställa ett reproducerbart testförfarande.

1.4 Frågeställningar

Följande frågeställningar kommer att användas:

- Hur kan en kollaborativ robot användas för att utforma en automatiseringslösning för provhanteringen vid ett kemikalieresistenstest?
- Hur kan kringutrustningen utformas för att stödja lösningen?

1.5 Avgränsningar

Arbete fokuserar på att utforma en fungerande prototyp för en robotcell som är kapabel att genomföra ett kemikalieresistenstest. Det innebär således att målet inte är att nå en färdig produkt som är mogen för implementering. Därför förbises robottillverkarens krav på riskanalys och efterföljande riskminskande åtgärder innan implementering eftersom någon implementation inte kommer att ske inom ramen för projektet.

Arbetets syfte är inte att automatisera det beskrivna testet för kontinuerlig drift, och därför innefattas inte de testförberedande stegen, med applicering av pH-markörer på objektglasen och matning av prover. Dessa moment anses i dagsläget vara för komplexa att automatisera med en robotteknik för att rymmas i detta arbete. Vilket innebär att viss manuell hantering fortfarande krävs för att använda robotcellen för testet.

2 Teori

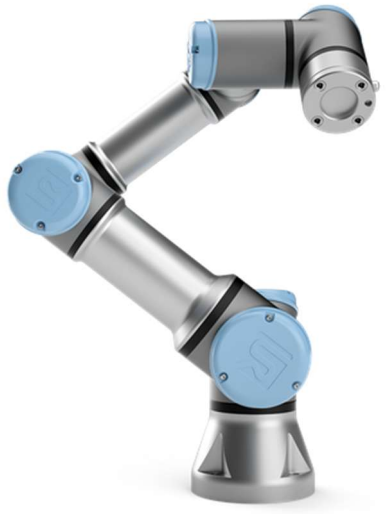
I följande kapitel avkunnas det nuvarande kunskapsläget inom området för robotautomation där relevant teknik och grundläggande begrepp beskrivs i korthet. En bred syn på robotautomation avses och innefattar information om kollaborativa länkarmsrobotars uppbyggnad, utformning och funktion av gripverktyg samt teknik för att programmera kollaborativa robotar och integrera dem i ett system. Därefter avhandlas en generell metod för att angripa och utföra automatiseringsprojekt. Slutligen presenteras relaterade tidigare arbeten som bidrar med kontext till detta arbete.

2.1 Kollaborativa robotar

En länkarmsrobot, eller industrirobot, avser en automatiskt kontrollerad, omprogrammerbar, allsidig manipulator som har tre eller fler axlar (Bolmsjö, 2006). Länkarmsrobotar är utformade för att efterlikna människans armrörelser och har en rad böj- och rotationsleder för att åstadkomma detta. Robotarmens uppgift är i korthet är att förflytta och positionera det påkopplade verktyget som utför själva arbetsuppgiften.

Kollaborativa robotar är en klass av industrirobotar som kan dela arbetsutrymme med människor och är därför utformade med ett stort säkerhetsfokus, för ett exempel se figur 1. Egenskaper som är viktiga för att undvika kollisioner eller minimera konsekvenserna av dessa vilket ökar säkerheten hos kollaborativa robotar är följande (Østergaard, 2017):

- Kollisionssensorer i grundutförandet
- Mindre i storlek och ett mer begränsat arbetsområde
- Lägre vikt
- Långsammare rörelser



Figur 1: Kollaborativ, UR3e, från Universal Robots (Universal Robots, u.å.)

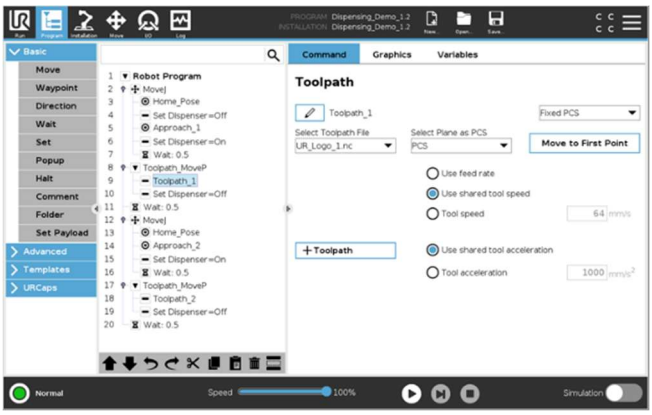
Kollaborativa robotar kännetecknas med att vara mer användarvänliga jämfört med andra klasser av industrirobotar, och flertalet tillverkare av kollaborativa robotar har tagit fram intuitiva programmeringsspråk. Under programmeringen går även robotarmens position att ställa in genom att operatören positionerar robotens leder manuellt (ABB, u.å.; FANUC, u.å.; Universal Robots, u.å.), så kallad *free drive*. Detta ska jämföras med konventionella industrirobotar vars programmering och manövrering sker genom att jogga robotarmen med knappar eller joystick på handterminalen (Bolmsjö, 2006).

En avgränsad arbetsstation där en robot nyttjas för att automatiskt utföra specifika uppgifter, vanligtvis i industriella miljöer, omnämns i litteraturen som en robotcell, vilken innefattar roboten, styrsystem, verktyg, kringutrustning och fixturer och kommer i det här arbetet benämnas som *robotcell* eller *robotlösning*.

2.2 Programmering av kollaborativa robotar

Att programmera en kollaborativ robot ska vara enkelt enligt ABB och Universal Robots (ABB, u.å.; Universal Robots, u.å.) och kunna utföras av personer utan spetskompetens inom robotik eller programmering. Programmeringen sker med fördel direkt på robotens handterminal, ett förfarande som benämns online-programmering.

Flertalet tillverkare tillhandahåller ett förenklat och mer intuitivt användargränssnitt för programmering av kollaborativa robotar jämfört med deras konventionella industrirobotar. Programmeringens gränssnitt kan vara nod-baserat för att ge en tydliga hierarki (Universal Robots, u.å.) eller ”drag and drop” av kodblock (ABB, u.å.), se figur 2 och 3. Vid körning av det skapade robotprogrammet kompileras noderna och kodblocken till robotens underliggande kodspråk, *URScript* i Universal Robots system (Universal Robots, u.å.).



Figur 2: Exempel på programmeringsgränsnitt i Universal Robots handterminal (Universal Robots, 2025a)

Figur 3: Exempel på programmeringsgränsnitt i ABBs handterminal (ABB, u.å.)

Möjligheten finns att komplettera ovan nämnda förenklade programmering med egna kodblock skrivna direkt i robotens underliggande språk i en utvecklingsmiljö på en dator. Detta möjliggör nyttjandet av flera funktioner och kommandon som inte är tillgängliga i handterminalen (Universal Robots, 2025b).

2.2.1 Kommunikation och filöverföring

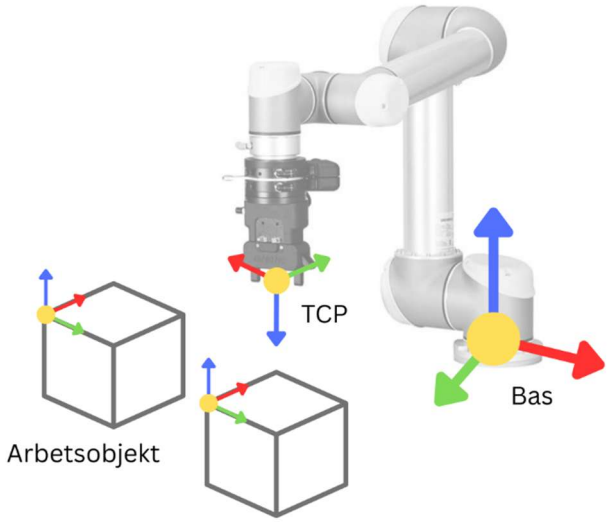
En direktkontakt mellan en dator och roboten är möjlig och används för att ge en mer avancerad och integrerad robotcell, där alternativen är en- eller tvåvägskommunikation och löpande eller vid angivna tidpunkter (vanligtvis vid start och slut, eller vid en viss punkt i robotprogrammet). Möjligheter finns bland annat att skicka hela program, delar av program, specifika kommandon eller input- och outputdata.

Överföring av program eller data kan ske på flera sätt, exempelvis genom att flytta koden på ett USB-minne eller att ansluta enheterna via ett kommunikationsgränssnitt, som exempelvis *Modbus TCP/IP* och *EtherNet/IP* (Universal Robots, u.å.). Det sistnämnda alternativet kräver flera steg i installationsprocessen men låser upp möjligheten att kontinuerligt skicka data mellan datorn och roboten.

2.2.2 Koordinatsystem

I sin grundkonfiguration har roboten två koordinatsystem, ett baskoordinatsystem med origo i robotens bas och ett verktygskoordinatsystem med origo i verktygets aktiva punkt (hädanefter omnämnt som TCP efter engelskans Tool Center Point), se figur 4. Dessa koordinatsystem används varje gång ett robotmål ska formuleras, där TCP:s position och rotation relativt robotens bas anges på följande vis: *p(X, Y, Z, RX, RY, RZ).*

Ytterligare koordinatsystem kan adderas för arbetsobjekt, vilket är passande om samma operationer ska utföras på flera olika arbetsobjekt. Detta gör programmeringen mer tidseffektiv eftersom kod kan återanvändas. Arbetsobjektkoordinatsystem anges relativt baskoordinatsystemet, och vid nyttjandet av dessa anges robotmålen för TCP:n relativt arbetsobjektet i stället för relativt basen.



Figur 4: Olika typer av koordinatsystem som nyttjas vid robotprogrammering

2.3 Gripdon

Längst ut på robotarmen fästs det verktyg som är i kontakt med arbetsobjektet och utför själva uppgiften som roboten är satt till att utföra. Gripdon används för att greppa tag och förflytta arbetsobjekt och tillämpas vanligtvis vid uppgifter som materialhantering och montering (Bolmsjö, 2006). Gripdonet är vanligtvis specialanpassat för aktuell uppgift eftersom dess utformning är central för både precision och säkerhet vid aktuell uppgift. Viktiga parametrar vid val av gripdonets utformning är:

- **Vikt** – Gripdonets vikt sänker robotens lastkapacitet. Att hålla låg verktygsvikt är prioriterat, särskilt för kollaborativa robotar som ursprungsvis har en låg lastkapacitet.
- **Geometri** – I många hänseenden är god åtkomlighet eftersträvat. En väl genomtänkt utsträckning och volym av gripdonet säkerställer funktion och sänker kollisionsrisken.
- **Gripkraft och gripytor** – För att bestämma tillräcklig gripkraft tas flera saker i beaktande hos gripdonet och arbetsobjekt, så som: grepytor, geometri, friktion och vikt.
- **Noggrannhet** – Vid höga krav på precist handhavande av arbetsobjekt måste gripdonet konstrueras och tillverkas med små toleranser i styva material. Samtidigt som arbetsobjektet kan fixeras i gripdonets grepp.
- **Miljöanpassning** – Gripdonet ska ha erforderlig inkapsling och vara byggd i motståndskraftiga material för att inte påverkas negativt av sin omgivning vilket kan leda till försämrad funktion och förkortad livslängd (Bolmsjö, 2006).

Två vanliga typer av gripdon kommer här att beskrivas; mekaniska gripdon och vakuumgripdon. Ett gripdon som har två eller flera fingrar som sluts genom en roterande eller parallellförflyttande rörelse benämns som mekaniska gripdon. Griprörelsen kan bygga på ett flertal olika mekaniska principer, och drivningen av rörelsen sker med hydraulik, pneumatik eller elmotorer. För kollaborativa robotar är eldrift vanlig ty låg vikt och hög precision i mellanlägen (Bolmsjö, 2006). I figur 5 ses ett exempel på ett mekaniskt gripdon med två fingrar som

parallellförflyttas och drivs av en precis elmotor, med den stora fördelen att fingrarna enkelt kan bytas ut för att skräddarsy gripdonet till en låg kostnad (Robotiq, u.å. A).

Figur 5: Gripdon med utbytbara fingrar från Robotiq (Robotiq, u.å.)

Vakuumgripdon greppar tag i arbetsobjekt med en eller flera sugkoppar som med hjälp av tryckluftsdriven ejektor eller en eldriven vakuumpump som skapar ett undertryck vilket ger den dess greppstyrka. Sugkopparnas antal, relativa positionering och utformning kan anpassas för att ge erforderligt grepp för uppgiften. I figur 6 återfinns ett exempel på ett vakuumgripdon med en inbyggd ejektorpump för vakuumgenerering och en universell typ av sugkopp, avsedd för flata ytor (Robotiq, u.å. B).

Figur 6: Vakuumgripdon från Robotiq med inbyggd vakuumpump (Robotiq, u.å.)

2.4 Kringutrustning och miljö

För att en robotiserad lösning ska fungera optimalt för sin avsatta uppgift krävs ett noggrant utformat arbetsområde och uppställning av kringutrustning som exempelvis ska förse roboten med arbetsobjekt för bearbetning eller komponenter för montering att hantera. För matning av komponenter och arbetsobjekt kan vibrationsmatare, magasin, paletter eller transportband användas. Viktiga faktorer att ta hänsyn till vid val och konstruktion av matningsmetod är komponentens storlek, geometri, tillverkningstoleranser och hur en exakt matningsposition erhålls (Bolmsjö, 2006).

2.5 USA-principen

USA-principen är ett vanligt sätt att ta sig an ett projekt som har för avsikt att automatisera en process. USA är en akronym för stegen i processen: *Understand, Simplify och Automate*. Där utgångspunkten är att i grunden förstå processen och beskriva dess inputs och outputs samt alla mellanliggande operationer. I efterföljande steg är syftet att omarbeta processen till sin enklaste form. Möjligheten att ta bort individuella steg eller att kombinera flera steg till ett undersöks och genomförs. Därefter kan arbetet med att automatisera processen vidtas, vilken nu har bättre förutsättningar att ge ett fullgott resultat. Det är även möjligt att hoppa över automatiseringen om den förenklade utformningen av processen uppfyller de övergripande strategiska målen för produktionen (Groover, 2014).

2.6 Tidigare forskning

Forskningsområdet laboratorieautomation, med smart och självgående utrustning som autonomt utför experiment i högt takt, är ett levande fält. Utveckling och innovationer från detta område anses ha stor potential för framtiden och spås bidra till en allt snabbare utveckling i andra forskningsområden som är beroende av att utföra experiment i labbmiljö, exempelvis inom Life science som är ett samlingsbegrepp för studier av biologiskt liv där studieämnet medicin ingår. Holland och Davies (2020) framhåller dock att länkarmsrobotar inte är det främsta alternativet vid utformning av automatiserade laboratorier bland annat på grund av den höga investeringskostnaden och behovet av komplexa styrsystem.

I sitt arbete sammanfogar Tabour et al. (2018) de senaste rönen inom automation, robotik och datavetenskap för att bygga ett system som assisterar dem vid framtagning av nya material. De beskriver hur denna typ av smarta system ökar forskningshastigheten markant, inte bara genom att möjliggöra att flera experiment kan utföras på kortare tid utan tack vare att systemlagret av artificiell intelligens säkerställer att även rätt experiment genomförs. Samtidigt som robotmanipulatorn utför experimentet på angivet vis med hög repeternoggrannhet.

2.6.1 Tidigare examensarbeten

Examensarbeten från tidigare studenter vid Uppsala universitet med liknande problembeskrivning och frågeställningar har studerats. I Mathias Persson arbete (2024) *”Robotiserad stackning av statorplåtar för elbilsmotor”* behandlas ett problem av liknande karaktär som nyttjar en industriell industrirobot i sin lösning. Strukturen och processen i Mathias arbete har använts som inspiration till detta arbete, då arbetenas syfte och utgångspunkt liknar varandra, samt delar innehållsområden som exempelvis prototypframtagning av fixturer och robotprogrammering.

Paralleller har dragits till arbetet *”Design, konstruktion och validering av robothantering för omflyttning mellan fixturer”* som Mattias Thisner (2022) utförde i hos LightLabs. Mattias arbetet tar avstamp i ett tidigare skede av automatiseringsprocessen, där Mattias genomför en förstudie inför ett robotinköp och ställer upp en kravspecifikation och undersöker marknaden för lämpliga robotar att använda i LightLabs produktionsprocess av

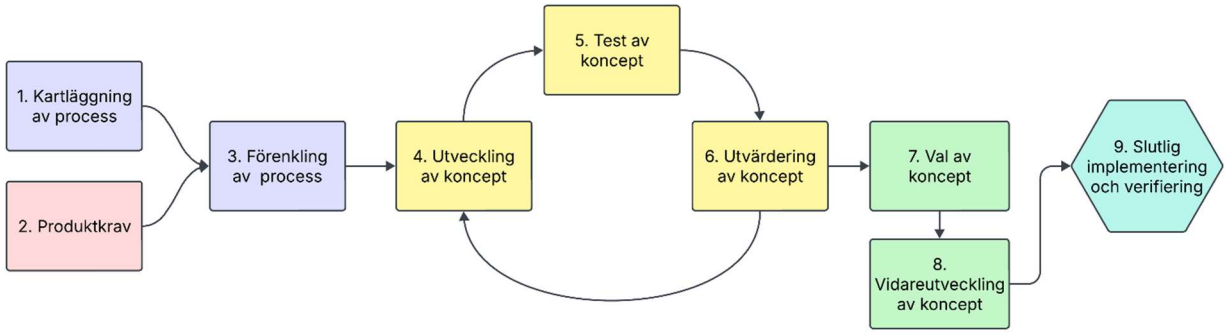
glaschipp. Objekten som ska hanteras är små, tunna och sköra – stor vikt läggs på att finna en icke-destruktiv gripdonslösning.

3 Metod

I detta avsnitt presenteras studiens utformning samt tillämpade metoder för att samla in och analysera data. Arbetet har antagit en iterativ form inom strukturerade ramar.

3.1 Design av studien

Genomförandet av studien har haft fokus kring observationer och iterativt konceptarbete där koncept har utvecklats och testats löpande. Där observationer och produktkrav från uppdragsgivaren legat som grund för utvecklingsarbetet. Strukturen på arbetet presenteras i figur 7.



Figur 7: Flödesschema som beskriver arbetets steg

1. **Kartläggning av process**: Genom observationer och samtal med uppdragsgivaren skapades en tydlig förståelse för uppgiften som skulle automatiseras. Enligt USA-metoden ska första steget i ett automatiseringsprojekt utgå från en grundlig förståelse av processen (Groover, 2014).
2. **Produktkrav**: Genom dialog med uppdragsgivaren inhämtades produktkrav på robotcellen.
3. **Förenkling av process**: Processen delades upp i steg vars utformning sedan ifrågasattes: är detta steg nödvändigt? Går detta steg att kombinera med ett annat?
4. **Utveckling av koncept**: Utifrån krav och process togs koncept fram enligt femstegsmodellen som Ulrich och Eppinger (2012) beskriver:
    i. *Förtydliga problem*, för att bygga förståelse för problemet samt bryta ner det till delproblem och rangordna dessa för att finna de av högsta dignitet.
    ii. *Extern informationssökning*, där konsultation av experter och litteratur nyttjades för att finna lösningar.
    iii. *Intern informationssökning*, egna kunskaper låg till grund för att generera ett större antal idéer och där handledaren fick agera bollplank.
    iv. *Systematisk utforskning*, där en konceptkombinationstabell användes för att ta fram flera kompletta lösningsförslag genom att kombinera lösningar för delproblemen. Lösningarna förmåga att möta produktkraven jämfördes sedan i en Pugh-matris för att identifiera det mest lovande alternativet.
    v. *Reflektion kring lösningarna och processen*
5. **Test av koncept**: Test genomfördes med det utvecklade konceptet, fysiskt eller digitalt.

6. **Utvärdering av koncept**: Hur väl konceptet mötte ställda krav granskades, och jämfördes med tidigare koncept när det var applicerbart. När alla krav möttes gick processen till näst steg, i alla andra fall återgick processen till steg 4.
7. **Val av koncept**: En Pughmatris användes för att välja det mest lovande konceptet, genom att objektivt jämföra koncept med ett valt referensalternativ utifrån definierade bedömningsfaktorer. Dessa faktorer representerade de viktigaste aspekterna av produkten ur kundens eller tillverkarens perspektiv. Varje koncept tilldelades ett betyg baserat på hur de presterade i varje faktor jämfört med referensalternativet, enligt skalan: --, -, 0, +, ++. Betygsskalans motsvarar grad av försämring, likvärdighet respektive grad av förbättring. Resultaten summerades för att identifiera det mest fördelaktiga alternativet, vilket valdes ut för vidareutveckling (Ulrich och Eppinger, 2012).
8. **Vidareutveckling av koncept**: Det utvalda konceptet förfinades.
9. **Slutlig implementering och verifiering**

3.2 Datainsamlingsmetod

3.2.1 Observationer

Huvuddelen av data har samlats in med direkt och ostrukturerad observation, där eftersökta data och relevanta företeelser formulerats innan observationen genomförts för att ge tydligare ramar för observationen. Med direkt och ostrukturerad observation avses att processen studerades i realtid med observatören närvarande men utan ett observationsprotokoll med förutbestämbara företeelser (Säfsten och Gustavsson, 2023). Fältanteckningar togs löpande under det att observationerna genomfördes och innehöll sådant som observatören fann relevant och intressant för studien, dessa anteckningar märktes med datum och tema samt fördes in i ett dokument för att ge struktur och möjliggöra enkel översyn.

3.2.2 Intervjuer

Data samlades in genom intervjuliknande samtal med uppdragsgivaren och andra relevanta personer på företaget som arbetade nära den studerade processen eller som besatt erfarenheter och information av betydelse för arbetet. Dialogerna tog form som semistrukturerade intervjuer där nyckelfrågor och intresseområden formulerades inför intervjuerna för att ge dem en utgångspunkt och riktning. Därefter formulerades uppföljningsfrågor löpande under intervjun för ökad flexibilitet för att säkra att mer relevant och intressant information kunde inhämtas. Frågor och svar antecknades löpande under samtalen av forskaren själv eller spelades in när respondenten gav sitt samtycke till det.

3.2.3 Dokumentstudie

För att klargöra utrustningens kapacitet och besvara frågeställningarna kring robotlösningens utformning har tekniska dokument från utrustningens tillverkare studerats. Dessa dokument har använts som vägledning i arbetet för att säkerställa en korrekt förståelse av utrustningens funktion och begränsningar.

3.2.4 Konceptgenerering

En explorativ och iterativ ansats användes för att besvara frågeställning 1, där stegen i konceptgenereringsprocessen beskrivs i avsnitt 3.1. Denna process var central för att utveckla lösningar utifrån de utmaningar som identifierats i den produktkravsspecifikation som utarbetats tillsammans med uppdragsgivaren.

3.3 Dataanalys

Analys av insamlade data har genomförts genom en tematisk ansats där informationen har kategoriserats och tolkats utifrån arbetets frågeställningar. Fokus har varit att identifiera återkommande mönster och utmaningar relaterade till utvecklingen av robotcellen. Den data som samlades in under arbetet har i första hand varit kvalitativ (från intervjuer, observationer och konceptgenerering) för vilken en tematisk analys lämpar sig väl (Säfsten och Gustavsson, 2023).

Vid val av koncept för dellösningar användes en Pughmatris för att först utvärdera alla koncept och välja ut det med högst potential för vidareutveckling. Jämförelsen skede endast mellan genererade koncept och som referens i matriserna användes det första genererade konceptet.

3.4 Validitet och reliabilitet

För att säkerställa att arbetets validitet och reliabilitet har flera metoder använts vid insamling och analys av data. Vid datainsamling har all information dokumenterats systematiskt genom att föra in anteckningar sorterade efter datum i tabell och märkts med ett tema. För intervjuer har ljudinspelning genomförts när intervjuobjektet gett sitt informerade samtycke till det, varefter inspelningarna har transkriberats manuellt för att minimera tolkningsfel och förlorade data.

Triangulering har tillämpats där det varit möjligt genom att jämföra data från olika källor (Säfsten och Gustavsson, 2023). Exempelvis har information från intervjuer verifierats genom jämförelse med dokumentstudien och observationer av den studerade processen. På så sätt har uppgifternas tillförlitlighet stärkts.

3.5 Etiska ställningstaganden

I genomförandet av detta arbete har flera etiska aspekter beaktats för att säkerställa att arbetet bedrivits på ett ansvarsfullt sätt.

3.5.1 Informerat samtycke och anonymitet

Personer som deltagit i intervjuer eller på annat sätt bidragit med information har informerats om studiens syfte. Deltagandet har även varit frivilligt och samtycke har getts innan insamling av data påbörjats. För att skydda individers integritet har alla personuppgifter i rapporten anonymiserats.

3.5.2 Sekretess och hantering av känslig information

Då arbetet genomförts i samarbete med ett företag har särskild hänsyn tagits till sekretess. En dialog med uppdragsgivaren har förts för att klargöra vilka uppgifter, i text och bild, som får delas i rapporten för att undvika spridning av känslig information. Vilket i praktiken inneburit att testobjektet, pH-markören, beskrivs övergripande och information om markörens framtida applikation utelämnats i arbetet.

3.5.3 Säkerhetsaspekter vid robotautomation

Kollaborativa robotar är enligt flera tillverkare utformade för att vara säkra nog för en människa att arbeta jämte (ABB, u.å.; Universal Robots, u.å.), trots det finns det alltid risker förknippade med elektriska maskiner generellt och automationsutrustning i synnerhet. I detta arbete har säkerhetsaspekter beaktats genom att följa tillverkarens riktlinjer och relevanta säkerhetsstandarder för robotceller (ABB, u.å.). Vid experimentella tester med en rörelsesatt robot har rekommenderade försiktighetsåtgärder vidtagits för att minimera risken för olyckor.

3.5.4 Konsekvenser av arbetet

Implementeringen av automationsutrustning kan ha både positiva och negativa konsekvenser. Positiva effekter inkluderar ökad tidseffektivitet och minskad risk för mänskliga fel (Holland och Davies, 2020). Eventuella negativa effekter kan vara kostnader för implementation och ökat behov av teknisk kompetens för underhåll och omprogrammering vid framtida justering av robotcellen. Dessa aspekter har beaktats i utformningen av lösningen.

4 Empiri

Detta kapitel beskriver stegen i det genomförda arbetet, där rubriker är strukturerade i samma ordning som figur 4, vilket skiljer sig från arbetets faktiska kronologi som har varit iterativ och där flera steg skett parallellt. Exempelvis utfördes programmering initialt som en del av konceptfasen och kundkraven uppdaterades efter arbetets gång när nya lärdomar inbringats och gett nya perspektiv på situationen.

4.1 Kartläggning

I arbetets startskede togs en ansats att förstå den process som skulle automatiseras, i enlighet med USA-principen. Inhämtandet av data utfördes i form av intervjuer samt observationer av det aktuella testobjektet, testinstrument och tillgänglig utrustning för att ge en komplett bild av nuläget och de möjliga vägarna framåt.

4.1.1 pH-markör

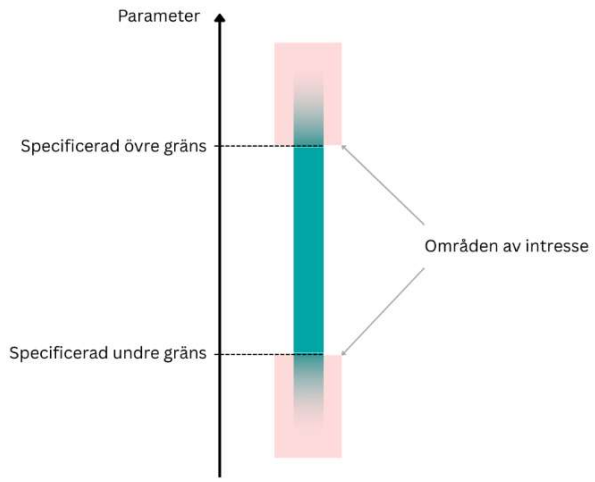
Uppdragsgivaren använder en pH-markör i ett av sina instrument, där tillverkaren av markören har specificerat ett pH-intervall där markören har full funktion vid lång exponeringstid. Uppdragsgivaren vill veta mer exakt vart gränserna går för markören vad gäller extrema pH-nivåer och avser att utföra tester för att hitta markörens faktiska gränsvärden, i figur 8 illustreras de pH-områden som kommer att undersökas. I testet kommer markören exponeras för olika kemikalier under varierande exponeringstid för att se om den efter exponeringen fortfarande har full funktion.

Hur markören fungerar i teorin

Markören används tillsammans med ett mätinstrument som belyser markören med ljus i en viss våglängd och utifrån det ljus som markören reflekterar fastställs pH-värdet markören är utsatt för. Markören anses vara vid full funktion om den efter exponering kan nollställas med vätska med ett känt pH-värde och visa rätt parametervärde.

Hur markören används i praktiken

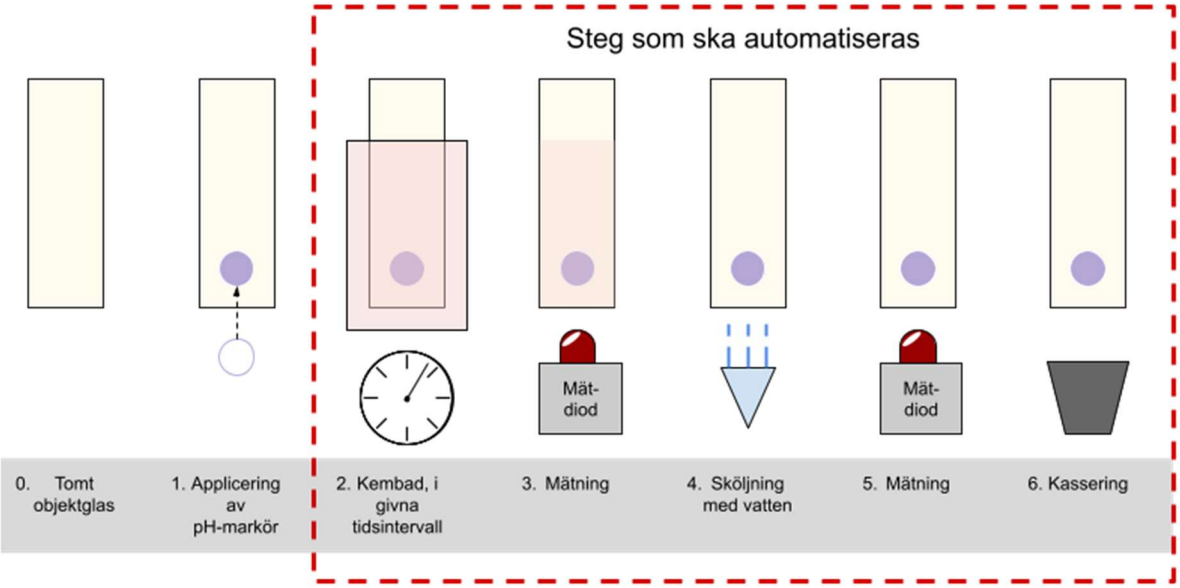
1. Markören placeras i en vätska
2. Markören belyses av mätinstruments ljusdiod
3. Mätinstrumentet registrerar vilket pH-värde vätskan har som markören befinner sig i



Figur 8: Områden för parametervärde som ska undersökas av test

4.1.2 Steg i testprocessen

Intervjuerna som låg till grund för kartläggningen fokuserade initialt på testprocessen i fråga. Kemikalieresistenstestet omfattade totalt sex steg, varav de fem sista valdes ut för att automatiseras, se figur 9.



Figur 9: Steg i genomförandet av kemikalieresistenstest

Där objektet som skulle testas var en självhäftande pH-markör som fästes på ett objektglas. Att fästa objektet på objektglaset bedömdes vara enklare och snabbare att genomföra manuellt och lämnades utanför projektets omfattning.

Förklaring av stegen i figur 9:

0. Ett tomt och rent objektglas (som vanligtvis används för mikroskopering)
1. pH-markören fästs på objektglaset
2. Objektglaset tillbringar en angiven tid nedsänkt i en kemikalie

3. Objektet mäts efter badet i kemikalien med ett instrument som belyser markören, mätningen sker genom objektglaset på objektets självhäftande sida.
4. Objektet sköljs med avjoniserat vatten en given tid
5. Objektet mäts igen, som i punkt 4
6. Objektet kasseras

4.1.3 Produktkrav

Fastställandet av produktkrav inleddes med intervjuer av personer hos uppdragsgivaren som ansvarade för kemikalieresistenstestet, där respondenternas svar antecknades och översattes till kundbehov. Syftet var att hitta kärnan i de önskningar och utsagor respondenterna uppgav. Därefter lästes kundbehoven av respondenten och en viktning av behoven genomfördes tillsammans med denne, se bilaga 1.

Mätbara produktkrav formulerades sedan utifrån kundbehoven, där alla behov blev representerade av ett krav. Produktkraven kunde därefter användas som en grund i det fortsatta arbetet och ge en tydlig riktning och ram för projektet.

Tabell 1: Kundbehov från bilaga 1 omformulerade som produktkrav

Nr.	Korresponderar med kundbehovnr.	Produktkrav	Enhet
1	1	Ingen omprogrammering av robot vid nytt test	Binärt
2	2	Inputvariabler hanteras av extern dator	Binärt
3	3	Kemikalievolym per prov är mindre än 15 ml	ml
4	4	Maximalt 100 ml vatten används för att skölja varje enskilt prov	ml
5	5	Sköljning sker med rinnande vatten	Binärt
6	6, 7, 8	Automatiskt testförfarande utan krav på operatör	Binärt
7	9	Tidsstämplar sparas för mätningstidpunkter i separat dokument innan varje test som kan jämföras med mätinstrumentets tidsstämplar	Binärt
8	10	Robotcellen (styrskåp exkluderat) ryms inom ett område på 600*600 mm	mm

4.1.4 Förenkling av process

Processen som ska automatiseras har tidigare endast delvis utförts manuellt i syfte att undersöka mätutrustningen och pH-markörens funktion. Detta har gett utformandet av robotcellen färre inarbetade rutiner att förhålla sig till. Som utgångspunkt till processförenklingen har stegen i figur 9 använts, vilka redan är relativt simplifierade.

Avgränsningar som gjorts för att nå en viss grad av förenkling, relevant för både den färdiga processen och utvecklingen av den:

- Objektglas hanteras ett i taget

- Prover kasseras efter sista mätningen
- Proven ges ingen ID-märkning. Prov och mätvärde paras ihop manuellt med stöd av tidstämplar från mätinstrumentets loggfil och en genererad lista över mättidpunkter
- Sköljtiden är samma för alla prov, 60 sekunder

4.2 Konceptgenerering och konceptval

I följande avsnitt beskrivs stegen som utgjorde konceptfasen samt de val som gjorts under processens gång. Bedömningsfaktorer vid konceptval och de överväganden som legat till grund för dessa redovisas fortlöpande.

4.2.1 Delproblem

Arbetets frågeställningar är övergripande och generella, genom att tolka dem från en processpecifik synvinkel har dessa brutits ner till hanterbara delproblem. Kartläggningen i avsnitt 4.1.2 presenterade processen som delsteg vilka fungerade som utgångspunkt vid formulering av delproblem:

1. Hur ska roboten gripa tag i objektglasen och eventuell annan utrustning?
2. Hur och i vad ska objektglasen exponeras för kemikalier?
3. Hur erhålls en exakt position för testobjektet i kritiska punkter under testets gång, och vilka är dessa kritiska punkter?
4. Hur säkerställs att önskade exponeringstider efterföljs?
5. Hur ska robotcellen ställa om för ett nytt testfall på ett användarvänligt vis?
6. Hur ska inmatning av testdata göras och vart?

4.2.2 Sammanställning av koncept

Koncept togs fram för att lösa de olika delproblemen, genom att först nå en klar förståelse för problemet i fråga, sen söka lösningar internt och externt för att slutligen utforma konceptet. Någon konceptkombinationsmetod användes ej.

Lösningarna på delproblemen kategoriserades i fem olika problemområden, se tabell 2. Där delproblem 2 delades upp i två områden, och delproblem 4-6 fördes samman i ett och samma område. Område 4 rör ett problem där objektglaset vid grepp inte hamnar centrerat i sidled i gripfingrarnas grepp, vilket är relevant vid mätning och placering av objektglas i robotcellens fixturer. Detta problem beror på att objektglashållaren har en glappassning för objektglasen som möjliggör en enkel i- och ur lyftning av dem, samt att objektglashållaren också förflyttas under körning och har inexakta positioner. Att finna ett sätt att kontrollera och justera denna förskjutning av objektglasen i sidled under körning gör robotlösningen mer robust.

Tabell 2: Konceptsammanställning för olika delproblem

1. Gripdon	2. Utformning av objektglashållare	3. Behållare för kemikalier	4. Justera förskjutet grepp	5. Mjukvara
Vakuum	4 platser, vinkelrätt placerade	100 ml glas	Externa sensorer	Endast i robotprogram

Mekaniskt	5 platser, roterade 108°	250 ml glas	Fixtur	Endast kod i python
	5 platser, på en rad, asymmetrisk placerad lyfttapp	100 ml plast	Via inbyggd funktion, 'verktygs-kontakt'	Olika delar i robotprogram och python, sammankopplat
		250 ml plast		Olika delar i robotprogram och python, separerat

Får att sålla ut koncept med störst potential att leva upp till satta produktkrav utvärderades koncepten i Pugh-matriser, se tabell 3 till tabell 7. Koncepten i de olika problemområdena hölls separat då de inte bedömdes vara fruktbart att göra en uppsättning av olika kombinationer. Lägg där till att utöver val av gripdon bedömdes de resterande konceptområdena inte påverkade ett val i ett annat område. Bedömningen skedde enligt utvalda bedömningsfaktorer som berör olika mått på lämplighet, genomförbarhet och även tillgänglig utrustning.

4.2.3 Val av gripdon

Val av gripdon är det beslut som har störst påverkan på robotcellens utformning och programmering. För att fastställa konceptens prestanda för bedömningsfaktorerna genomfördes ett utforskande fältförsök. Förutsättningar, genomförande och utfall av detta fältförsök avhandlas i 4.5. För parametern miljöanpassning studerades gripdonens användarmanualer (Robotiq, 2021, 2024) och respektive IP-klassningen låg till grund för betyg, samt tillverkarens avrådan från att använda vakuumgripdonet till att hantera kemikalier. För att utröna vilken av de två tillgängliga gripdonen som var bäst lämpad i projektets applikation jämfördes alternativen enligt följande parametrar:

1. **Greppstyrka** – Fullgod greppstyrka avser att gripdonet klarar av att greppa tag, förflytta och placera avsedda objekt utan att tappa dem.
2. **Greppets stabilitet** – God stabilitet avser att objekt i gripdonets grepp inte pendlar eller på andra sätt förskjuts när robotarmen utför en förflyttning.
3. **Gripprecision** – God precision avser att det greppade objektet inte gör en förflyttning i gripögonblicket som beror på gripdonets rörelser i samma ögonblick.
4. **Volym/geometri** – Avser volymen och geometrin i närheten av TCP, där låg volym och liten geometri anses vara fördelaktigt.
5. **Miljöanpassning** – Avser hur väl gripdonet är inkapslat för att inte påverkas negativt av omgivningen.

Tabell 3: Pugh-matris för val av gripdon

Bedömningsfaktor	**Mekaniskt (referens)**	**Vakuum**
Greppstyrka	0	0
Greppets stabilitet	0	-
Gripprecision	0	-
Volym/geometri	0	0
Miljöanpassning	0	--
Summa	**0**	**-4**

4.2.4 Val av objektglashållare

Koncepten för objektglashållaren som återfinns i bilaga 2 bedömdes enligt följande två faktorer, se tabell 4:

1. **Antal platser** – Fler platser ansågs mer fördelaktigt, då fler prover per behållare är mer platseffektivt i robotcellen och mer tidseffektivt under körning.
2. **Programmeringsvänlighet** – Avser hur enkelt det är att hitta exakta robotmål för respektive provplats i hållaren, och om koden för att hitta ett robotmål går att återanvända för ett annan hållare. Förflyttning längs färre axlar är lättare att programmera än flera axlar.

Tabell 4: Pugh-matris för utvärdering av olika koncept av objektglashållaren

Bedömningsfaktor	**4 platser, vinkelrätt placerade (referens)**	**5 platser, roterade 108° relativt varandra**	**5 platser, på en rad, asymmetrisk placerad lyfttapp**
Antal platser	0	+	+
Programmeringsvänlighet	0	-	+
Summa	**0**	**0**	**2**

4.2.5 Val av kemikaliebehållare

För att finna en fullgod behållare för att rymma kemikalier och objektglashållaren vid testets genomförande bedömdes alternativen enligt fyra parametrar, se tabell 5:

1. **Tillverkningstolerans** - Låg tillverkningstolerans är av vikt för att upprepade gånger ha en noggrann position på de objekt som ska placeras i och hämtas från behållaren, då roboten inte har någon funktion för att hitta objekt på nya positioner.
2. **Slaghållfasthet** – För att undvika splitter eller spillda kemikalier värderas en hög slaghållfasthet.
3. **Volym/prov** – Ställer sig mot produktkrav 3 som avser låg kemikalieanvändning. En större behållare kan hålla fler prover, men där geometrin (diameter och höjd) är avgörande för den mängd total volym som krävs för att täcka pH-markören på objektglasen.

Tabell 5: Pugh-matris för utvärdering av koncept för kemikaliebehållare

Bedömningsfaktor	**250 ml glas (referens)**	**250 ml plast**	**100 ml glas**	**100 ml plast**
Tillverkningstolerans	0	+	0	+
Slaghållfasthet	0	+	0	+
Volym/prov	0	0	+	+
Summa	**0**	**2**	**1**	**3**

4.2.6 Val av teknik för justering av icke-centrerat grepp

Vid placering av objektglas är hög precisionen viktig då glaset är fysiskt litet, och vid mätning är exakt position avgörande för mätresultatet, vilket avhandlas i ett fältförsök som beskrivs i 4.6. För att erhålla en mer robust lösning togs koncept fram för att centrera pH-markören framför mätdioden under mätsekvensen. Koncepten bedömdes enligt följande tre parametrar, se tabell 6:

1. **Precision** – avser hur exakt lösningen kan centrera pH-markören framför mätdioden.

2. **Flexibilitet** – avser hur enkelt det att göra mindre justeringar vad gäller exempelvis placering av markör på objektglas utan att större utrustningsändringar krävs.
3. **Tidsåtgång vid körning** – kortare tid för inmätning och justering är önskvärt.

Tabell 6: Pugh-matris för utvärdering av koncept för justering av förskjutet grepp

Bedömningsfaktor	**Fixtur (referens)**	**Inbyggd funktion: Verktygskontakt**
Precision	0	+
Flexibilitet	0	+
Tidsåtgång vid körning	0	+
Summa	**0**	**3**

4.2.7 Val av mjukvarustruktur

Denna kategori bedömdes efter utförda dokumentstudier, diskussioner med mjukvarukunniga personer på avdelningen samt praktiskt kunskapsinhämtning gällande robotprogrammering. Besluten baserades på uppskattningar och tar författarens förkunskaper i programmering i beaktande. Koncepten bedömdes utifrån följande fyra faktorer, se tabell 7:

1. **Utvecklingsvänlighet** – avser det krav på förkunskaper koncepten ställer på genomföraren, samt den uppskattade tidsåtgången för utvecklingen av programmet eller programmen med sagda genomförares förkunskaper.
2. **Kontroll** – avser till vilken detaljnivå konceptet ger möjlighet att styra programmet eller programmen.
3. **Flexibilitet** – avser graden av hårdkodade parametrar och möjligheten att enkelt utföra ändringar i koden.
4. **Krav på utrustning** – avser behovet av utrustning som krävs för att genomföra konceptet, exempelvis kommunikationsutrustning och externa nödstopp.

Tabell 7: Pugh-matris för utvärdering av koncept för mjukvarustruktur

Bedömningsfaktor	**Bara robotkod (referens)**	**Bara python**	**Robotkod + python**
Utvecklingsvänlighet	0	--	0
Kontroll	0	+	+
Flexibilitet	0	+	+
Krav på utrustning	0	-	0
Summa	**0**	**-1**	**2**

4.2.8 Konceptval

Utvärderingen av delkoncept gav en konceptkombination, se tabell 8, som vidareutvecklades och sammanfogades till en fungerande helhet.

Tabell 8: Valda koncept

Mjukvara	Gripdon	Behållare för kemikalier	Utformning av objektglas-hållare	Justera förskjutet grepp
Olika delar i robotprogram och python, separerat	Mekaniskt	100 ml plast	5 platser, på en rad, asymmetrisk placerad lyfttapp	Via inbyggd funktion, 'verktygs-kontakt'

4.3 Prototypframtagning

Under hela konceptarbetet har fysiska prototyper för fixturer i de olika arbetsstationerna tagits fram löpande. Prototyper har modellerats i SolidWorks och tillverkats med 3D-skrivare, av personal på avdelningens mekaniska verkstad. Koncept kunde sedan verifieras med fysiska prototyper i dess avsedda användningsområde, vilket möjliggjort mer relevanta utvärderingsresultat och möjlighet att göra rätt justering i nästa iteration.

Tillgången till prototyper har även fungerat stödjande för programmeringen av roboten och planeringsscriptet. Programmeringen kunde påbörjas långt innan alla de fysiska koncepten nått sin slutgiltiga version. Detta har även möjliggjort att kod och fysiska koncepten utvecklats i symbios och påverkat varandra i takt med att författarens färdigheter i robotprogrammering ökade.

Under vidareutvecklingen av varje valt delkoncept har olika parametrar finjusterats för att fungera bättre tillsammans med roboten än sin föregångare. Ändringar har innefattat geometri, måttoleranser, samt arbetsstationernas placering i robotcellen.

4.4 Programmering av robot & annan nödvändig kod

Efter genomfört konceptval av mjukvarustrukturen togs ett beslut att låta ett pythonscript genomföra planering av varje nytt test, och innehålla nödvändig logik för att utföra uppgiften på ett eftersträvat sätt. Utformning av robotkoden fokuserades på att läsa av planeringen och utföra nödvändiga rörelser, samtidigt som robotkoden hölls kortare och mer modulär. Denna struktur innebar att robotprogrammet blev en statisk enhet vilken inte behövde ändras vid nya test. Det gav en bättre användarvänlighet för operatören, som inte behöver ändra några parametrar i robotkoden, utan kan hålla sig till att ändra testfallsparametrar i Excel för att sedan överlåta planeringen åt ett pythonscript.

4.4.1 Robotkod

Tillräckliga förkunskaper i programmering av det aktuella robotsystemet saknades initialt och en omfattande kunskapsinhämtning var nödvändig. Detta utfördes genom en dokumentstudie av tillverkarens manualer och praktiska tester där enklare robotprogram skrevs för att undersöka robotkodens syntax, funktioner och andra kommandon.

Därefter skrevs mindre robotprogram, direkt kopplade till de processteg som illustreras i figur 9, som utförde en specifik uppgift av testprocessen. Där målet var en korrekt utförd uppgift med en så enkel och flexibel kod som möjligt. Detta arbete genomfördes i ett flertalet iterationer för varje delsteg. Delprogrammet sammanfogades sedan till ett samlat robotprogram som utförde hela arbetsflödet, vilket vidareutvecklades och finjusterades när grundstrukturen var bestämd.

4.4.2 Pythonscript

Arbetet med att ta fram planeringsscriptet i python har skett stegvis och metodiskt, men även det iterativt. Informationsinhämtning har skett genom dokumentstudier, internetsökningar för

att finna externa lösningar på specifika problem samt diskussioner med kompetent personal på avdelningen.
Arbetets första steg avsåg en ordentlig problemförståelse och att i klartext skriva ner vad scriptet var tänkt att utföra. Därefter tecknades en grov struktur upp med tänkta input, outputs och övriga variabler.

Efter detta grundarbete skrevs stegvis en modul i taget och verifierades, för att sedan sammanfoga alla delar och moduler till en helhet. Där ytterligare verifiering, felsökning och justeringar genomfördes. Det slutliga steget innebar praktiska tester med roboten för att verifiera att pythonscriptet genererade ett schema med rätt värden och att robotprogrammet hade förmåga att tolka schemat rätt. Justeringar av båda typerna av kod genomfördes iterativt till en mjukvarulösning erhölls som uppvisade önskade resultat vid robotkörning.

4.4.3 Dokumentstudie

I syfte att utvinna ny kunskap om robotens programmeringsspråk och dess kapacitet lästes manualer från robottillverkaren och gripdonstillverkaren. Vid specifika frågor eftersöktes information från robottillverkarens hjälpforum för att övervinna de specifika problem som uppdagades under arbetet.

4.5 Utvärdering av gripdon

Ett praktiskt test genomfördes i syfte att utvärdera de två tillgängliga typerna av gripdon, ett mekaniskt gripdon och ett vakuumgripdon. Testet utgjorde underlag för Pugh-matrisen i tabell 3 vilket var verktyget för att identifiera det gripdon som var mest lämpat för det fortsatta konceptarbetet.

Testet var av kvalitativ karaktär och inga mätvärden registrerades. Resultat och slutsatser baseras enkom på strukturerade observationer som gjordes under testets gång. Trots denna vetenskapliga begränsning gav testet insikter kring respektive gripdons potential för den tänkta applikationen.

4.5.1 Utrustning

Utrustningen som användes i testet finns presenterad i tabell 9 och då fotografering ej var tillåten vid testets genomförande illustreras testförloppet i figur 12.

Tabell 9: Utrustning/uppställning för experiment

Vakuumgripdon	Mekaniskt gripdon
1. Robotiq EPick	1. Robotiq Hand-E
2. 1 bälgsugkopp ”B8”, se figur 10	2. 2 3D-printade gripfingrar, se figur 11
3. Fästanordning för sugkopp	3. Objektglas
4. Objektglas	4. Ställ för objektglas
5. Ställ för objektglas	

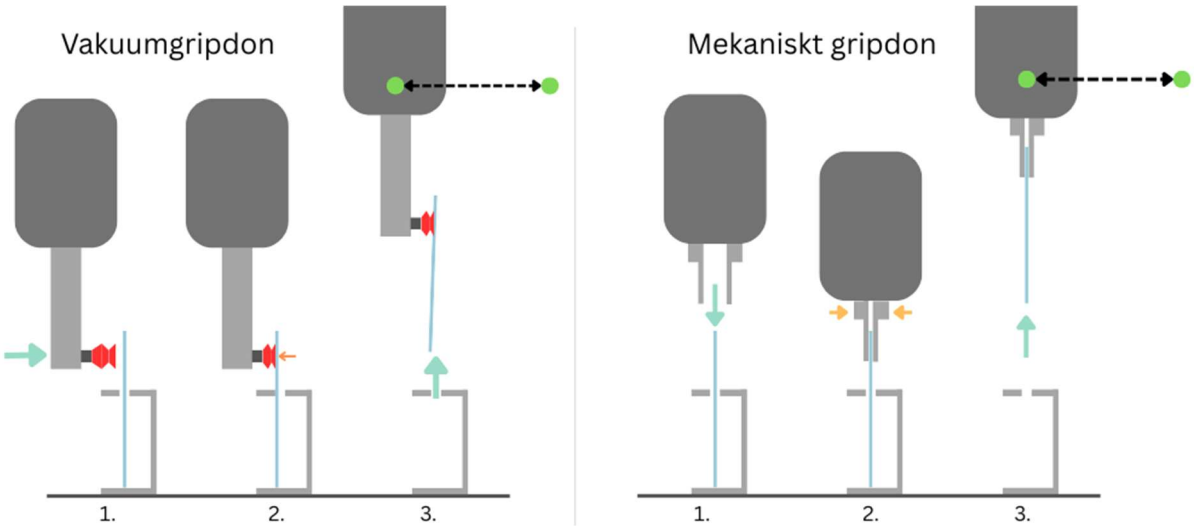
Figur 10: Exempel på sugkopp i bälgmodell "B8", lik den som användes i testet (RS Components AB, u.å.)

Figur 11: Rendering av de 3D-utskrivna gripfingrarna som användes i testet tillsammans med det mekaniska gripdonet

4.5.2 Testförfarande

Testförfarande gick enligt följande:

1. Robotarmen förde gripdonet till objektglaset, vertikalt placerad i en fixtur, varvid objektglaset greppades.
2. Robotarmen förflyttade gripdon och objektglas vertikalt uppåt.
3. Robotarmen genomförde upprepade förflyttningar i sidled i hastigheterna 30 och 100 mm/s.
4. Robotarmen stannade med objektglaset fast i gripdonets grepp, varvid objektglaset utsattes för ett manuell drag nedåt av testledaren för att subjektivt bedöma greppets stabilitet.



Figur 12: Testets steg. Vakuumgripdon till vänster och mekaniskt gripdon till höger. De gröna cirklarna markerar de robotmål mellan vilka den angivna förflyttningen ägde rum.

4.5.3 Observationer som svarar mot bedömningsfaktorer

- Båda gripdonen kunde lyfta objektglaset utan att det tappades
- Det mekaniska gripdonet uppvisade ett fast och stabilt grepp under hela rörelsesekvensen
- Vid användning av vakuumgripdonet uppstod ett märkbart gungande av objektglaset vid förflyttning
- Det mekaniska gripdonet uppnådde hög precision och symmetriska rörelser vid gripögonblicket
- Vakuumgripdonet orsakade en snabb sidledsförflyttning av objektglaset i samband med gripögonblicket
- Båda gripdonen var jämförbara i total volym
- Vakuumgripdonets massa var koncentrerad på ena sidan om gripobjektet, medan det mekaniska gripdonet hade en mer symmetrisk fördelning kring objektet

4.5.4 Övriga observationer

- Vakuumgripdonet gav upphov till höga ljud
- Gripdonets 3D-printade fingrar böjer sig vid stängt läge

4.5.5 Analys av gripdonstest

Utifrån observationerna framstår det mekaniska gripdonet som det mer lämpade alternativet. Det har ett stabilt och precist grepp med erforderlig greppstyrka och dess design möjliggör enkel anpassning genom 3D-utskrivna fingrar.

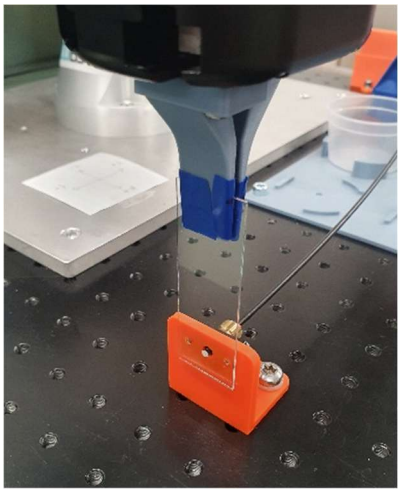
Det är värt att notera att vakuumgripdonet inte testades under optimala förutsättningar. Sugkoppen som användes var inte idealisk för applikationen, och endast en sugkopp användes. Baserat på testets utfall bör framtida tester överväga att använda 2–3 flata sugkoppar för att förbättra stabiliteten och eventuellt minska den snabba sidledsrörelsen som observerades vid gripögonblicket som berodde på att sugkoppens bälg sögs ihop. Sådan utrustning fanns dessvärre inte tillgänglig vid testtillfället, och kunde endast erhållas med en leveranstid som inte var förenligt med projektets tidsram, varför testet endast genomfördes med befintlig konfiguration.

4.6 Toleranser vid mätning

Mätningsmomentet ansågs vara ett kritiskt steg i robotlösningen och ett utforskande test genomfördes för att inhämta information om den accepterade förskjutningen mellan pH-markör och mätdiod respektive centrum som gav godkända mätning. En godkänd mätning var enligt uppdragsgivaren ett ΔpH på 0,1 relativt referensvärdet. Under testet nyttjades roboten för att säkerställa exakta positioner och förflyttningar. Mätvärden för det aktuella testet återfinns i bilaga 3.

4.6.1 Testförfarande

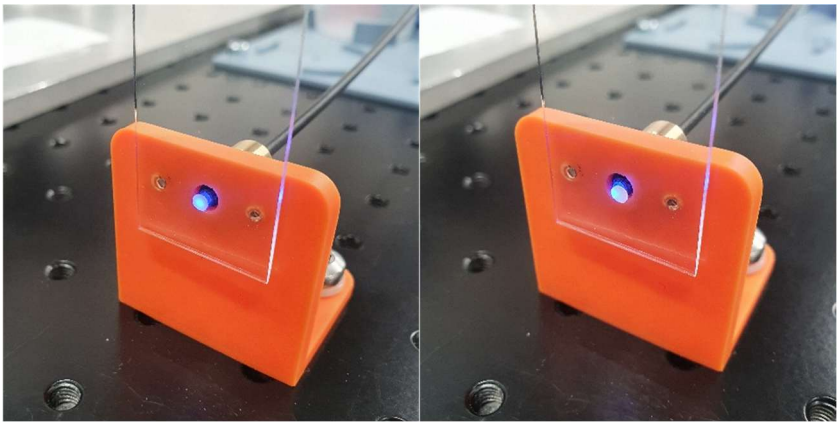
1. En torr pH-markör fäst på ett objektglas centrerades över mätdioden, se figur 13, varvid ett referensvärde noterades.
2. Därefter förflyttade robotarmen objektglaset och markören med inkrement på 1 mm, se figur 14, där tre pH-värden noterades med 5 sekunders mellanrum för varje steg. Förflyttningar genomfördes i:
    a. Positiv och negativ x-riktning (±3 mm)
    b. Positiv och negativ y-riktning (±3 mm)
    c. Diagonal förflyttning i positiv x- och y-riktning (+2 mm)



Figur 13: Uppställning för test av mätdiodens aktiva område.

4.6.2 Analys av mättoleranstest

För varje förflyttningsinkrement räknades medelvärdet ut från de tre mätvärdena och jämfördes med medelvärdet för referensmätningen. Positioner där mätvärdena avvek med mindre än ±0,1 från referensvärdet betraktades som godkända. Detta gällde förflyttningar på ±1 mm i x- och z-led samt den kombinerad förflyttning på 1 mm i både x- och z-led. Den största som förflyttningen som fortfarande gav ett godkänt mätvärde var den diagonala förflyttningen, med ett avstånd på 1,4 mm från centrum.



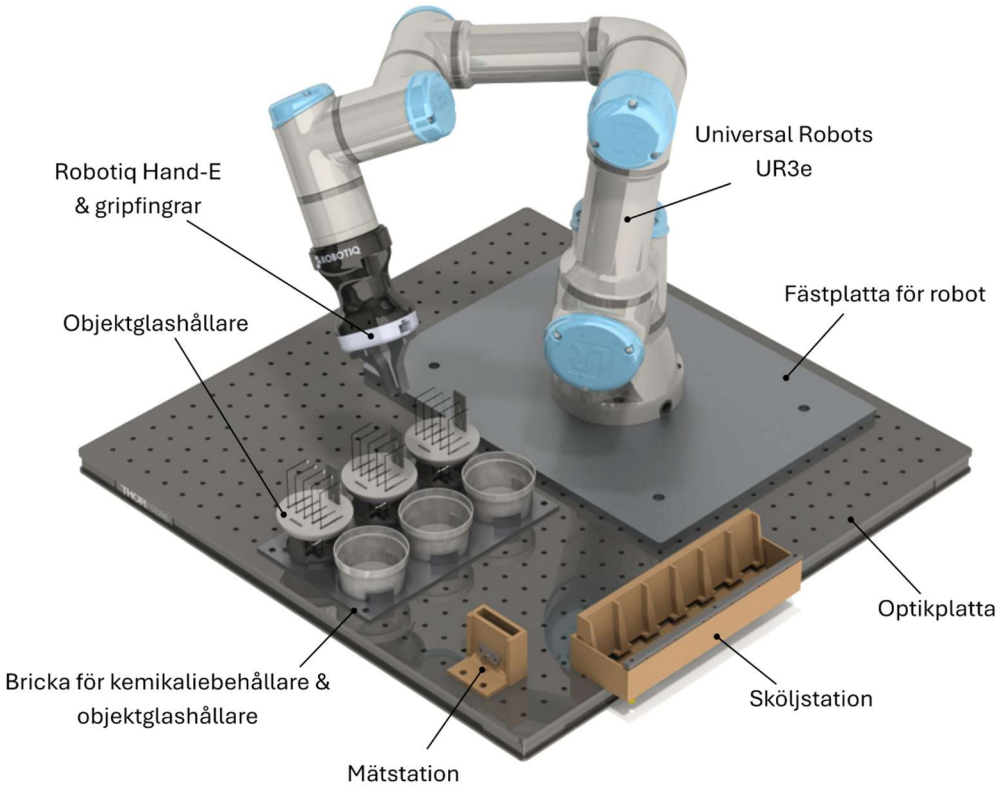
Figur 14: Bilder från testets genomförande, f.v. markör centrerad över mätdiod, markör förflyttad 1 mm i positiv x-riktning.

5 Robotlösningens funktion och prestanda

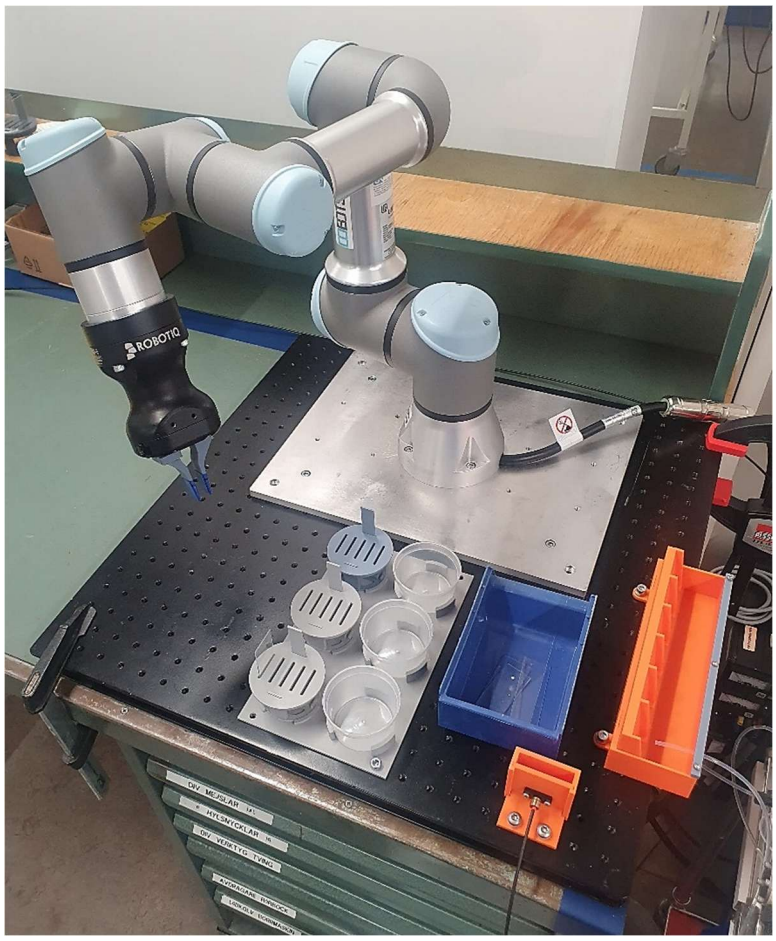
I följande avsnitt presenteras projektets resultat i form av det fysiska utformningsförslaget på robotcellen och dess komponenter, samt en kortare beskrivning av kodstrukturen, hur robotcellen är tänkt att användas och utfallet av robotlösningens verifiering.

5.1 Fysisk prototyp

Som bas för robotcellen användes en optikplatta (600x600 mm), försedd med M6-hål i ett rutnätsmönster, i vilken roboten och alla fixturer fästes med skruv. Fixturerna innefattar en bricka för tre objektglashållare och tre kemikaliebehållare, en mätstation och en sköljstation med sex sköljplatser för objektglas. Varje objektglashållare har plats för fem objektglas med en pH-markör. Den kollaborativa roboten, UR3e, är bestyckad med ett mekaniska gripdon, Hand-E från Robotiq, med ett par gripfingrar. En rendering av det kompletta konceptet visas i figur 15, en bild på den verkliga prototypen av robotcellen visas i figur 16 och detaljbilder på enskilda fixturer återfinns i bilaga 4.



Figur 15: Rendering av det slutgiltigt koncept för robotcellen.



Figur 16: Bild på den robotcellen med alla fixturer monterade

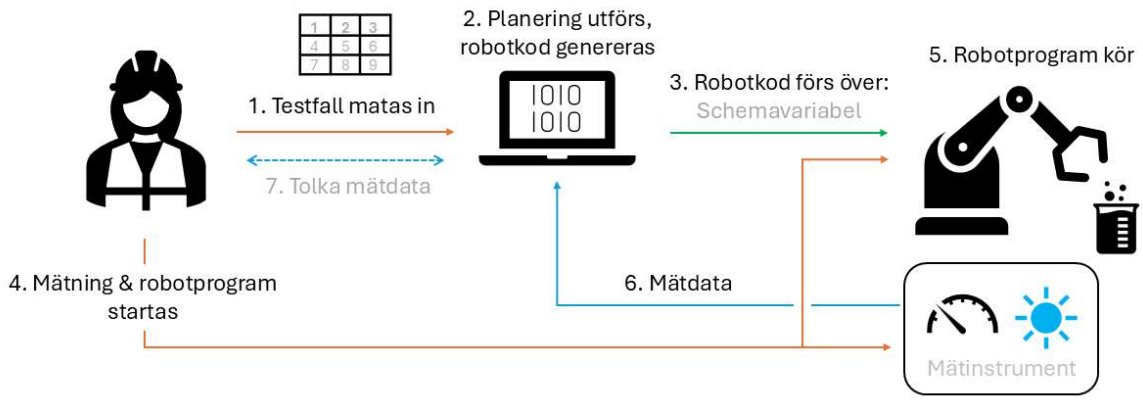
5.1.1 Övrig kringutrustning

Vald kemikaliebehållare har en volym på 100 ml och är tillverkad av polypropen. Behållaren är kemikalietålig och täcker innehållande pH-markörer när den fylls med 50 ml vätska. Kemikalieanvändning per prov blir således 10 ml, då varje kemikaliebehållare innehåller fem prov.

Sköljstationen har sex platser och kan således skölja sex objektglas samtidigt, och är förberedd med slangfäste för lika många slangar. För att demonstrera sköljstationens funktion är en pump implementerad vilken har kapacitet för att förse en sköljplats med erforderligt vattenflöde. Robotsystemet kommunicerade inte med pumpen och styrning av flöde saknas, vilket innebär att pumpen går konstant efter det att den startats manuellt.

5.2 Kodstruktur: Planeringsscript & robotkod

Ett robotprogram i roboten och ett pythonscript för planering på en dator användes för att förbereda testet med testparametrar och styra roboten på önskat vis. I figur 17 illustreras hur de olika systemen är integrerade med varandra och vilka steg operatören följer för att genomföra ett kemikalieresistenstest.

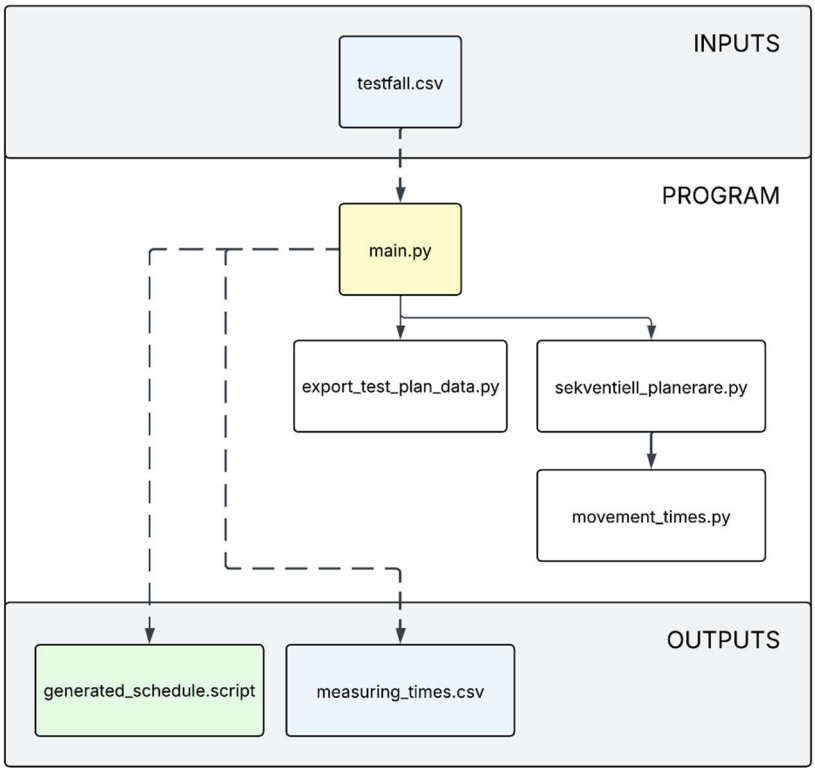


Figur 17: Den slutgiltiga kodstrukturen och hur den relaterar till användaren

5.2.1 Planeringsscript

Planeringsscriptet genererar den fil som berättar för roboten *när* någonting ska utföras. Scriptet förses med en csv-fil innehållandes testfallsdata, enligt strukturen som exemplet i bilaga 5 visar, varefter scriptet kan exekveras. Planeringsscriptet genererar två utdata-filer, en som stödjer analysen av provdata och en som innehåller en schemavariabel som ska överföras till roboten. Schemat består av alla förflyttningar roboten behöver utföra för att fullfölja testet, där förflyttningarna har följande struktur: [Förflyttnings ID, Tid för förflyttning, Från position, Till position, Prov ID].

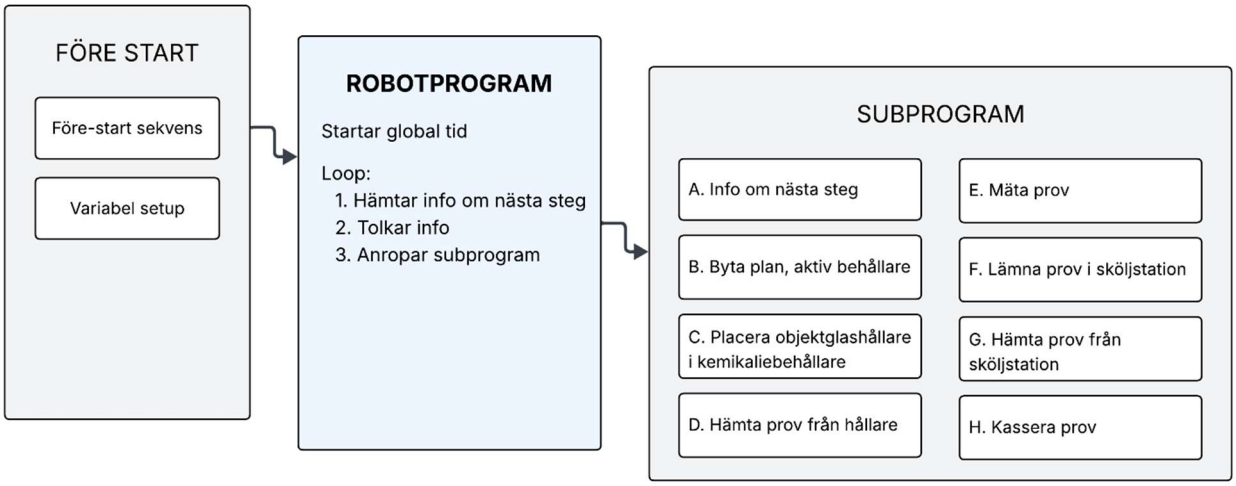
Scriptet är strukturerat i tre nivåer, se figur 18, där main.py läser in argument, för namn på input- och outputfiler, vid körning och anropar *Sekventiell_planerare.py* för planering av testet med data från filen som angavs som input. Planeringen sker för ett objektglas i taget och en objektglashållare i taget, där en funktion bokar roboten för att undvika krockar med andra förflyttningar som gör anspråk på samma tidsfönster. *Movement_times.py* innehåller information om tidsåtgången för robotens förflyttningar mellan arbetsstationerna. *Export_test_plan_data.py* läser av schemavariabeln och sållar ut alla förflyttningar till mätstationen, varefter den plockar ut tidpunkt och prov-ID som förflyttningen rör och lagrar informationen i en ny lista. Listan sorteras sedan efter prov-ID. Därefter skriver *main.py* ut de två tidigare nämnda filerna lokalt, se exempel i bilaga 5.



Figur 18: Planeringsscriptets struktur med inputs och outputs

5.2.2 Robotkod

Robotkoden styr *hur* roboten ska utföra de uppgifter som återfinns i schemavariabeln. Robotkoden utför flera uppgifter: tolkar schemafilen, håller koll på tiden, har information om alla robotmål som behövs under körning av testet, utför testet. Robotprogrammets struktur illustreras i figur 19, och bygger på ett huvudprogram som anropar subprogram beroende på vilken uppgift som ska utföras för aktuellt steg i schemat. Loggning under körning sker ej.

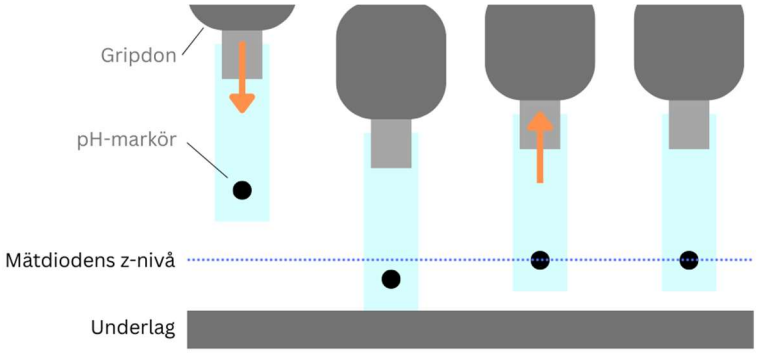


Figur 19: Illustration av robotkodens struktur

Majoriteten av subprogrammen består endast av robotmål och kommandon till gripdonet, vilket relaterar till respektive uppgift som ska utföras på de olika arbetsstationerna. Två subprogram skiljer sig åt från den regeln och beskrivs i korthet här:

B. Byta plan, aktiv behållare - Varje kemikaliebehållare har ett eget koordinatsystem som möjliggör återanvändande av kod och robotmål som används vid placering av objektglashållare i kemikaliebehållare och hämtning av objektglas. Subprogrammets funktion är att växla mellan dessa koordinatsystem efter behov.

E. Mäta prov - Sekvensen vid mätstationen där pH-markören centreras framför mätdioden använder robotens inbyggda funktion ”verktygskontakt”. Funktionen gör att robotarmen förflyttar TCP i angiven riktning till att kollision uppstår, varvid ytterligare kommandon kan utföras utifrån den nya positionen. I mätsekvens använder roboten funktionen för att centrera pH-markören över mätdioden, vilket illustreras i figur 20, där robotarmen förflyttar sig tillbaka ett givet avstånd i z-led efter kollision med underlaget.



Figur 20: Hur roboten nyttjar "verktygskontakt" för att positionera markör i samma z-nivå som mätdiod

5.3 Verifiering av robotlösningen

För att verifiera robotlösningen genomfördes fyra olika testfall med varierande antal objektglas och objektglashållare. Varav ett spelades in med en kamera, med en klocka i bakgrunden, för vidare analys. Där tidpunkter av intresse lästes av från videomaterialet efter testets genomförande. Verifieringens testfall omfattade tre hållare med två provglas i varje och skrevs som en CSV-fil i *Visual Studio Code* varefter planeringsscriptet användes för att planera robotens körschema. För aktuellt testfalls angivna skölj-, mät- och exponeringstider, se figur 21.

```
testfall.csv > data
1   rinse_time;60;;;;;
2   measure_time;5;;;;;
3   holder_id;chem;sample1;sample2;sample3;sample4;sample5
4   1;A;10;60
5   2;B;10;60
6   3;C;10;60
7
```

Figur 21: Parametrar för testfallet vid verifiering

Planeringsscriptet exporterade en robotscript-fil, *generated_schedule*, lokalt som överfördes manuellt till roboten via en FTP-server.

Videoupptagningen startades följt av klockan och robotprogrammet. Klockan i bakgrunden möjliggjorde att tidpunkter för relevanta moment under verifieringen kunde noteras med god tillförlitlighet. Bilder från körningen återfinns i figur 22.

Figur 22: Bildrutor från verifiering av robotlösningen, f.v. placering av hållare, plock av prov, mätning, placering i sköljstation

Körning genomfördes enligt plan och inga problem uppstod. I efterhand sammanställdes en lista med tidpunkter från videomaterialet: när hållaren placerades i kemikaliebehållaren, när provs plockades upp från hållaren, när prov placerades i sköljstation och plockades upp från sköljstation. Exponerings- och sköljtider räknades ut. För att sedan jämföras med de angivna tiderna i CSV-filen med testfallsdata.

Under verifieringen skiljde sig de faktiska exponeringstiderna i genomsnitt med 1 s från de angivna tiderna, medan sköljtiderna skiljde sig 0,7 s från de angivna 60 s. Dessa värden räknades ut med ekvation 1, och uppmätta tider samt beräknade tidsavvikelser återfinns i tabell 10 och 11.

$$\overline{t_{diff.}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|t_{uppmätt} - t_{angiven}\right| \qquad \text{Ekvation 1}$$

Tabell 10: Exponeringstider från verifieringskörningen

Prov ID	Angiven tid [s]	Start [s]	Slut [s]	Uppmätt tid [s]	Avvikelse [s]
2011	10	12	22	10	0
2012	60	12	72	60	0
2021	10	170	178	8	-2
2022	60	170	229	59	-1
2031	10	325	334	9	-1
2032	60	325	383	58	-2

Tabell 11: Sköljtider från verifieringskörningen

Prov ID	Angiven tid [s]	Start [s]	Slut [s]	Uppmätt tid [s]	Avvikelse [s]
2011	60	38	98	60	0
2012	60	88	148	60	0
2021	60	192	254	62	2
2022	60	243	304	61	1
2031	60	348	408	60	0
2032	60	398	459	61	1

Rörelsetider mellan olika arbetsstationer har hämtats från videomaterialet. För rörelser där roboten hanterar samma objekt över flera arbetsstationer i följd har tiderna kombinerats till en sammanhängande sekvens. I de fall där den kombinerade rörelsen inkluderar mätstationen har både mättid, 5 sekunder, och positioneringssekvensen vid mätdioden, 4 sekunder, exkluderats från totaltiden. Samtliga rörelsetider som ingick verifieringscykeln presenteras i tabell 12, och en schematisk bild av de kombinerade rörelserna återfinns i figur 23.

Tabell 12: Tider för kombinerade rörelser under verifieringskörning

Kombinerad rörelse	Arbetsstationer involverade i rörelsen	Tid [s]
1	Parkering för objektglashållare, kemikaliebehållare	7,2
2	Kemikaliebehållare, mätstation, sköljstation	9,5
3	Sköljstation, mätstation, kassation	7,0

Figur 23: Kombinerade rörelser för vilka rörelsetider är tabellerade i tabell 12

6 Analys

I detta kapitel analyseras de uppnådda resultaten i relation till rapportens frågeställningar och formulerade produktkrav. Syftet är att tolka och diskutera vad resultatet innebär i det aktuella sammanhanget.

6.1 Frågeställning 1: Utformning av lösning

Den första frågeställningen, *hur en kollaborativ robot kan användas för att utforma en automatiseringslösning för provhanteringen vid ett kemikalieresistenstest,* har varit utgångspunkten för hela projektet. Som resultatavsnittet påvisar har en fungerande prototyp för en robotlösning tagits fram. Där prototyper för alla fysiska komponenter är 3D-utskrivna och fullt fungerande för sitt syfte, att testa och verifiera utformningsförslagets funktion.

Ett robotprogram för att styra roboten har skrivits samt ett pythonscript som agerar planeringsverktyg vilka tillsammans möjliggör en enkel användning av robotlösningen. Där användaren kan ställa om robotcellen för att genomföra ett nytt test med nya parametrar genom följande steg: skapa testfalldata i Excel, kör planeringsscript, överför filen till roboten, starta roboten och mätinstrumentet. Pythonscriptet genererar även en fil innehållandes förväntade mättidpunkter, vilken används för att para ihop mätdatapunkter från mätinstrumentet med rätt prov. Robotlösningen uppfyller således *produktkraven 1, 2, 6 och 7*, vilka rör användarvänlighet, automationsgrad och tidsdatagenerering.

Vid verifieringen av robotlösningen påvisades goda resultat på funktionalitet tillika god samstämmighet mellan angivna tider inför testet och faktiska tider under testet, avseende kemikalieexponering och sköljsekvens.

En kollaborativ robot kan således användas som automatiseringslösning för provhantering genom att förflytta objektglas med ett applicerat testobjekt, pH-markör, mellan olika arbetsstationer där operationer som kemikalieexponering, mätning, sköljning och kassering utförs.

6.2 Frågeställning 2: Krav på kringutrustning

Robotcellens kringutrustning är av central betydelse då robotarmens huvudsakliga uppgift är att förflytta objekt mellan olika positioner inom sitt arbetsområde. Det är således tillsammans med den utformade och tillverkade kringutrustningen som roboten kan genomföra kemikalieresistenstestet. Vad gäller *produktkrav 3, 5 och 8* som avser kemikalieanvändning, princip för sköljning och robotcellens storlek är det val och utformning av kemikaliebehållare, objektglashållare och sköljstation som möjliggör att dessa uppfylls. Där kemikalieanvändning per prov understiger det satta kravet på tack vare storlek och fyllnadsgrad av kemikaliebehållaren samt antal platser i objektglashållaren.

Sköljstationens vattenförsörjning sker kontinuerligt i den slutgiltiga prototypen, då robotsystem inte kan styra flödet eller kommunicera med pumpen när behov av sköljning uppstår, överstiger vattenkonsumtionen den kravsatta volymen per prov i *produktkrav 4*.

6.2.1 Analys av robotkod och pythonscript

Robotkoden har utnyttjat subprogram, vilket är ett fristående del av koden som anropas av huvudprogrammet, i sin struktur vilket ger koden en flexibilitet att hantera olika testfall utifrån överförd fil. Subprogrammen innebär också att koden är modulär vilket innebär att det är möjligt att lägga till, ta bort eller justera delar av programmet utan att påverka andra delar.

I robotkoden har olika koordinatsystem använts för att underlätta programmering och omprogrammering. Exempelvis har varje kemikaliebehållare ett eget arbetsobjektskoordinatsystem vilket möjliggjort återanvändande av kod som rör placering av objektglashållare och hämtning av objektglas. Detta ökar kodens flexibilitet och förenklar eventuella framtida ändringar.

Logiken som finns i robotkoden används för att tolka och läsa av schemafilen som pythonscriptet genererar, utöver det finns inga funktioner som övervakar eller hanterar uppkomna fel. Vilket både är en svaghet, men det gör också koden kortare och därmed enklare att förstå och ändra.

Pythonscriptet bygger också på moduler som var för sig utför en specifik uppgift, en som initierar körning och skriver/läser filer, en som planerar, en som tillhandahåller rörelsetider och en sista som presenterar relevant data ur den genererade schemafilen som möjliggör testdataanalys. Detta för att öka överblickbarheten. Exempelvis är det via modulen för rörelsetider enkelt att justera finjustera med de faktiskt tiderna roboten uppvisar under körning.

7 Diskussion

Avsnittet som följer har för avsikt att föra en diskussion om arbetets resultat, samt diskutera den upplevda lämpligheten av valda metoderna och hur dessa metoder påverkat resultatet.

7.1 Diskussion om resultatet

Detta arbete har undersökt hur en kollaborativ robot kan användas för att automatisera steg i ett kemikalieresistenstest, vilket resulterat i en fungerande prototyp. Vid bruk av robotlösningen har den potential att frigöra tid för personalen. Samt att utförandet sker med större exakthet avseende rörelser, positioner och tider och ger därför testet högre reproducerbarhet jämfört med tester genomförda av människor. Precisionen i mätningen bygger dock på att pH-markören placeras på tänkt position av en människa, med en tillåten felmarginal på en millimeter. Detta beror på att robotlösningen inte tar hänsyn till pH-markörens faktiska placering utan endast utgår från objektglasets kanter i mätsekvensen. Detta är en svaghet i systemet och en källa till mätosäkerhet.

Verifieringskörningen av robotcellen visade på en avvikelse på en sekund mellan angivna tider och faktiska exponerings- och sköljtider. Detta beror på att de angivna rörelsetiderna i planeringsscriptet inte är tillräckligt anpassade efter de faktiska tiderna det tar roboten att utföra förflyttningarna mellan arbetsstationerna. Avvikelserna går att reducera genom att justera tiderna i planeringsscriptet, men i jämförelse med tilltänkta exponeringstider i kemikalieresistenstestet på 15-60 minuter är avvikelserna försumbara. För testresultatets validitet är repeternoggrannhet av högre vikt, vilket robotlösningen är ytterst kapabel att leverera.

Prototypens tidseffektivitet är en svaghet, vilket blir tydligt vid långa exponeringstider. I sin nuvarande konfiguration behandlar robotcellen satser på fem prov (motsvarar en kemikaliebehållare/objektglashållare) innan nästa sats initieras. Vid långa exponeringstider medför detta att testet blir utdraget och att roboten står inaktiv långa stunder. En annorlunda utformad planeringskod kan potentiellt genomföra tester för flera kemikaliebehållare parallellt och då korta ner den totala testtiden.

Vad gäller resurstidsvinst så finns ingen manuell föregångare till robotcellen, vilket gör jämförelsen av testutförande mellan robot och människa spekulativ. Skulle en människa genomföra testet på samma sätt och med samma utrustning som roboten blir besparingen i tid nära den tid testet tar. Det är dock möjligt att lägga upp testet på andra sätt om det utförs av en människa, exempelvis kan flera prover testas parallellt och nyttjandet av fixturer vid mätning kan potentiellt öka repeterbarheten.

Roboten saknar flexibilitet och förmåga att upptäcka och lösa problem under pågående körning. En anledning till detta är att nyttjandet av externa sensorer och givare har varit obefintlig i projektet, där syftet varit att hålla komplexitetsnivån låg. En extern sensor hade också

möjliggjort en exakt fastställd position av pH-markören under mätsekvensen som tidigare omnämnts som en av systemets svagheter.

7.2 Förbättringsmöjligheter

Under arbetets gång har flertalet alternativa vägar till lösningar uppenbarats, som potentiellt kunnat medföra en mer robust och användarvänlig robotlösning, vilka inte inkluderats i projektet av tidsbrist. Arbetet har även i tidiga steg avgränsats vilket inneburit att förbättrande delar och steg uteslutits med syfte att göra projektet genomförbart inom den givna tidsramen:

- Exempelvis har nyttjandet av externa sensorer varit obefintlig i projektet, där syftet varit att hålla komplexitetsnivån låg och att undvika fördröjande leveranstider. Avsaknaden av externa sensorer bidrar till robotens bristande flexibilitet och förmåga att upptäcka och lösa problem under pågående körning. En väl utvald sensor kan även potentiellt ingå i mer robust lösning på positioneringsproblematiken under mätsekvensen.

- Användarvänligheten kan ökas genom att implementera en funktion i planeringsscriptet som automatiskt för över genererad fil direkt till roboten, vilket eliminerar behovet att genomföra filförflyttningen manuellt.

- Alla fixturer är utskrivna med en 3D-printer vilket tjänar sitt syfte som prototyper, trots detta är det värt att nämna att vid idrifttagande av robotcellen behöver en del fixturer tillverkas på andra sätt eller i andra material. Exempelvis bör gripfingrarna tillverkas i en aluminiumlegering och objektglashållarna skrivas ut i ABS, en plast som tål kemikalier.

- Vattenkonsumtionen för robotcellen överstiger den kravsatta volymen per prov. Detta kan avhjälpas genom att installera en ventil med ett elektroniskt ställdon för varje plats i sköljstationen, vilket möjliggör att robotsystemet kan sätta på vattenflödet med en utsignal när ett objektglas är placerat på respektive plats. Detta ger ökad kontroll över sköljningen och en minskad vattenkonsumtion.

- Gripdonet har en inbyggd funktion för att detektera objekt i sitt grepp, vilket inte har implementerats då försök till detta har misslyckats. Där den misstänkta felkällan är gripfingrarnas utformning och material (PLA), vilket gör att gripfingrarna böjer sig vid gripdonskalibrering och ger en falsk nollpunkt. Styvare gripfingrar är ett första steg mot lyckad implementering av greppdetektionsfunktionen, vilket kan leda till en mer robust robotlösning.

- Robottillverkaren skriver i sin manual vilka steg som ska genomföras för att nå en säker robotcell i enlighet med rådande lagar och direktiv som avser elektriskt drivna maskiner vilket har förbisetts under detta arbete på grund av arbetets tidsåtgång och komplexitet. Innan en eventuell driftsättning ska tillverkarens rekommenderade steg genomföras för att leva upp till satta krav.

7.3 Metoddiskussion

Projektet har följt en tydlig struktur som började med en grundläggande kartläggning och produktkravsinhämtning genom intervjuer och observationer, för att sedan övergå i en iterativ process som växlade mellan informationsinhämtning i form av dokumentstudier, konceptframtagning och koncepttestning. Därefter genomfördes ett konceptval för dellösningarna och valda koncept förfinades. Slutligen testades, justerades och verifierades robotlösningen. Observationer, intervjuer och konceptgenerering har upplevts som lämpliga datainsamlingsmetoderna för detta projekt.

Trots att kartläggningen genomfördes efter bästa förmåga i arbetets startskede var den ej komplett och heltäckande, vilket medfört att behov och krav uppdaterades löpande under projektets gång. Kartläggningen tillsammans med uppdelningen i delproblem har varit värdefulla metoder för att strukturera arbetet och skapa en tydlig riktning för projektet och ge en överblick av de delar som behövde genomföras.

Olika delkoncept har utvecklats samtidigt och i relation till varandra. Detta har medfört att delkoncepten passade bra tillsammans i applikationen och att integrationsfasen varit kort. I efterhand är det tydligt att det inneburit en svårighet att allokera tid för rätt sak vid rätt tidpunkt, där vissa delkoncept konsumerat mer tid än nödvändigt och som konsekvens lämnat mindre tid kvar till andra.

I efterhand upplevs bredden på de genererade konceptförslagen som relativt liten, och liknar varandra till stor del. Att den tidigt inslagna vägen blev den enda vägen. Detta kan bero på att tillräckligt med tid inte allokerades i projektets startskede för att tänka vitt och brett, och mer noggrant undersöka fler valmöjligheter. En orsak till denna hastiga start kan i sin tur bero på projektets snäva tidsram.

7.4 Generaliserbarhet av resultat

Två tidigare examensarbeten från Tekniska-naturvetenskapliga fakulteten vid Uppsala universitet, som beskrivits i 2.6, visar intressanta paralleller till detta projekt. Thisner (2022) tog fram en teoretisk lösning för robotiserad hantering av glaschip, där miljön kring roboten liknade den för detta projekt. Där övervägdes UR3e som robot att bygga lösningen kring, men en kollaborativ robot från ABB valdes på grund av tidigare erfarenhet med det robotsystemet. Ett visionsystem användes för kvalitetskontroll av glaschippen medan robotlösningen lät fixturer svara för noggrann positionering av arbetsobjekt, vilket även är lösningen i detta projekt.

Perssons (2024) arbete resulterade i en prototyp för robotiserad stackning av statorplåtar som fokuserade på en robotlösning med hög grepprecision och enkel implementering, där det utformade verktyget var bestyckat med tre induktiva sensorer för att erhålla precision vid plockning av statorplåtar. Båda projekten visar att praktiskt tillämpbara lösningar kan nås genom olika angreppsätt, och att krav på repeterbarhet och precision i stor grad styr utformning av verktyg och process.

Holland och Davies (2020) menar i sin metastudie att automation i laboratoriemiljö är ett framtidsområde vilket kan komma att möjliggöra att mer och bättre forskning kan genomföras på kortare tid. Studien fokuserar på lämpliga automation för forskningsinstitutioner, och vad som kan hindra och möjliggöra vidare implementation av sådan. De lyfter behovet av utrustningsflexibilitet för att inte låta utrustningen styra vilka experiment som genomförs och framhåller att billigare lösningar är att föredra för forskningsinstitutioner då forskningsanslag ofta är tidsbegränsade och knutna till specifika projekt. Även om Holland och Davies anser att robotar kan komma väl till pass i vissa situationer tack vare sin flexibilitet, anses de i det generella fallet vara för dyra. För utveckling- och forskningsavdelningar på privata företag kan de ekonomiska möjligheterna vara andra, vilket gör robotar till ett bra alternativ för att automatisera laboratorieuppgifter. Som detta projekt visar kan kollaborativa robotar användas för att erhålla en lösning för automatiserade test, med en kort utvecklingstid och relativt små förkunskaper.

För uppdragsgivaren utgjorde projektet ett koncepttest för robotautomation generellt, som är ett möjligt nästa steg i deras strävan efter att automatisera flera av de verifieringstester som dagligen genomförs. De ser stor potential att nyttja robotar i deras framtida verifieringsarbete av ingående komponenter som används i de maskiner som konstrueras och tillverkas av företaget. Det här projektet har visat möjligheten att robotisera en typ av test, med goda resultat, vilket kan agera exempel och bana väg för ytterligare liknande applikationer. Där även en första pusselbit är lagd för att på sikt utveckla ett mer generaliserat och modulärt robotsystem för testning vilket skulle korta ner utvecklingstiden för varje ny applikation.

8 Slutsatser

Detta avslutande kapitel presenterar de slutsatser som dragits utifrån arbetets resultat. Slutsatserna relateras till syftet och de formulerade frågeställningarna. Avslutningsvis ges förslag på möjliga områden för vidare arbete.

8.1 Slutsatser av arbetet

Arbetets syfte var att *undersöka hur en kollaborativ robot kunde användas för att automatisera provhanteringen vid ett kemikalieresistenstest* [av en pH-markör], *med målet att minska mängden manuellt arbete och säkerställa ett reproducerbart testförfarande*. Resultatet är ett fungerande förslag på robotlösning som automatiserat avsedda steg av testet.

Frågeställning 1: Hur kan en kollaborativ robot användas för att utforma en automatiseringslösning för provhanteringen vid ett kemikalieresistenstest?
Det är påvisat att en kollaborativ robot kan användas för att automatiskt utföra ett kemikalieresistenstest. Där en operatör förbereder prover, iordningsställer all utrustning, genererar och överför en schemafil för att sedan initiera robotprogrammet samt mätinstrumentet. Under testförfarandet utför roboten all nödvändig hantering av prover, vilket innefattar förflyttning av prover mellan olika stationer i robotcellen på angivna tider.

Frågeställning 2: Vilka krav ställs på kringutrustningen för att stödja lösningen?
Robotlösningen kräver ett olika typer av komponenter för att ha möjlighet att genomföra kemikalieresistenttestet på önskat vis och leva upp till framtagna produktkrav. Det krävs fixturer som håller objektglasen i önskat läge vid varje steg av processen, samt två olika typer av program: ett robotprogram som styr hur roboten ska utföra varje deluppgift samt ett pythonscript som avgör och planerar när roboten ska utföra sagda uppgifter utifrån att läsa av inmatade testparametrar.

8.2 Förslag på fortsatt arbete

Robotlösningen som presenterats i detta arbete är en fullt fungerande prototyp. I sin nuvarande form uppfyller den syftet med en prototyp genom att demonstrera konceptets funktionalitet och potential. För att robotlösningen ska bli redo för driftsättning och avlasta personalen i testförfarandet med god repeterbarhet krävs dock ytterligare insatser. Exempelvis komponenttillverkning i tåligare material och fortsatt utveckling av mjukvara. Specifika förbättringsområden diskuteras i 7.2. Där arbetet med robotlösningens säkerhet och innefattande riskutredning är av särskild vikt.

Under projektets gång har det blivit tydligt för uppdragsgivaren att hanteringen av pH-markören är mer komplex än vad som initialt uppskattades, även vid helt manuell hantering. Att automatisera provförberedelsen, särskilt placering av pH-markören på objektglaset, framstår som ett logiskt nästa steg i arbetet att vidareutveckla testets automationsgrad. Denna till synes enkla uppgift, med eller utan automation, har visat sig så pass utmanande att den skulle kunna utgöra grunden för ett separat examensarbete.

9 Referenser

ABB (2020). *ABB's collaborative robot takes the strain out of sampling at Karolinska University Laboratory*. News. https://new.abb.com/news/detail/70465/abbs-collaborative-robot-at-karolinska-university-laboratory [Hämtad: 2025-02-11].

ABB (u.å.). *Wizard Easy Programming | ABB Robotics*. Robotics. https://new.abb.com/products/robotics/software-and-digital/application-software/wizard [Hämtad: 2025a-03-20].

ABB (u.å.). *FAQ | Safety*. ABB Robotics. https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/faqs/safety [Hämtad: 2025b-03-20].

Bolmsjö, Gunnar (2006). *Industriell robotteknik*. 3. uppl. Lund: Studentlitteratur.

De Luca, Chiara, Felletti, Simona, Lievore, Giulio, Chenet, Tatiana, Morbidelli, Massimo, Sponchioni, Mattia, Cavazzini, Alberto och Catani, Martina (2020). Modern trends in downstream processing of biotherapeutics through continuous chromatography: The potential of Multicolumn Countercurrent Solvent Gradient Purification. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 132, s. 116051, doi:10.1016/j.trac.2020.116051.

FANUC (u.å.). *CR Series*. https://www.fanuc.eu/eu-en/cr-series [Hämtad: 2025-03-20].

Groover, Mikell P. (2014). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. 4. uppl. New York: Pearson.

Holland, Ian och Davies, Jamie A. (2020). Automation in the Life Science Research Laboratory. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, s. 571777, doi:10.3389/fbioe.2020.571777.

Kesik-Brodacka, Malgorzata (2018). Progress in biopharmaceutical development. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 65(3), s. 306–322, doi:10.1002/bab.1617.

Lif (2022). *Läkemedelsbranschen – en svensk basnäring*. https://www.lif.se/fokusomraden/en-aktiv-och-hallbar-samhallsaktor/lakemedelsbranschen--en-svensk-basnaring/ [Hämtad: 2025-01-30].

Läkemedelsverket (2019). *Tillstånd för att tillverka läkemedel | Läkemedelsverket*. https://www.lakemedelsverket.se/sv/tillstand-godkannande-och-kontroll/tillverkningstillstand/tillstand-for-att-tillverka-lakemedel [Hämtad: 2025-01-30].

Läkemedelsverket (2020). *Biologiska läkemedel | Läkemedelsverket*. https://www.lakemedelsverket.se/sv/tillstand-godkannande-och-kontroll/tillverkningstillstand/biologiska-lakemedel [Hämtad: 2025-06-05].

Persson, Mathias (2024). *Robotiserad stackning av statorplåtar för elbilsmotor*. Examensarbete. Uppsala universitet, Uppsala.

Robotiq (2021). Instruction Manual - Robotiq EPick Vacuum Gripper for e-Series Universal Robots. https://blog.robotiq.com/hubfs/support-files/EPick_Instruction_Manual_e-Series_PDF_20210709.pdf [Hämtad: 2025-06-04].

Robotiq (2024). Instruction Manual - Robotiq Hand-E for Universal Robots. https://blog.robotiq.com/hubfs/support-files/Hand-E_Manual_UniversalRobots_PDF_20240402.pdf [Hämtad: 2025-06-04].

Robotiq (u.å.). *Adaptive grippers - ROBOTIQ*. Adaptive grippers. https://robotiq.com/products/adaptive-grippers#Hand-E [Hämtad: 2025a-03-19].

Robotiq (u.å.). *Vacuum grippers - ROBOTIQ*. Vacuum grippers. https://robotiq.com/products/vacuum-grippers [Hämtad: 2025b-03-19].

RS Components AB (u.å.). *Festo 8mm NBR Suction Cup VASB-8-M5-NBR | RS*. https://se.rs-online.com/web/p/pneumatic-suction-cups/2022895 [Hämtad: 2025-05-25].

Säfsten, Kristina och Gustavsson, Maria (2023). *Forskningsmetodik 2.0: för ingenjörer och andra problemlösare*. 2. uppl. Lund: Studentlitteratur.

Tabor, Daniel P., Roch, Loïc M., Saikin, Semion K., Kreisbeck, Christoph, Sheberla, Dennis, Montoya, Joseph H., Dwaraknath, Shyam, Aykol, Muratahan, Ortiz, Carlos, Tribukait, Hermann, Amador-Bedolla, Carlos, Brabec, Christoph J., Maruyama, Benji, Persson, Kristin A. och Aspuru-Guzik, Alán (2018). Accelerating the discovery of materials for clean energy in the era of smart automation. *Nature Reviews Materials*, 3(5), s. 5–20, doi:10.1038/s41578-018-0005-z.

Thisner, Mattias (2022). *Design, konstruktion och validering av robothantering för omflyttning mellan fixturer*. Examensarbete. Uppsala universitet, Uppsala.

Ulrich, Karl T. och Eppinger, Steven D. (2012). *Product design and development*. 5. uppl. New York: McGraw-Hill.

Universal Robots (2021). *Funderar du på att automatisera din tillverkning?* https://info.universal-robots.com/hubfs/Always%20On/SE/11_2021_UR_Thinking-About-Manufacturing-Automation_Book-1_RGB_SE.pdf [Hämtad: 2025-02-11].

Universal Robots (2025a). *Controlling End-effector from Polyscope using Toolpath URCap*. https://www.universal-robots.com/articles/ur/programming/controlling-end-effector-from-polyscope-when-using-toolpath-nodes-in-remote-tcp-toolpath-urcap-polyscope-version-5115/ [Hämtad: 2025-05-25].

Universal Robots (2025b). Script Directory PolyScope 5. https://www.universal-robots.com/manuals/EN/PDF/SW5_21/scriptmanualG5/script_directory_Poly5.pdf [Hämtad: 2025-04-14].

Universal Robots (u.å.). *UR3e Ultra-lightweight, compact cobot*. https://www.universal-robots.com/products/ur3e/, https://www.universal-robots.com/products/ur3e/ [Hämtad: 2025a-05-05].

Universal Robots (u.å.). *Precision i stora och små produktioner | Universal Robots*. https://www.universal-robots.com/se/produkter/ur3-robot/ [Hämtad: 2025b-03-20].

Universal Robots (u.å.). *PolyScope 5 - More than just keep up*. https://www.universal-robots.com/products/polyscope-5/ [Hämtad: 2025c-04-22].

Universal Robots (u.å.). *URScript*. https://www.universal-robots.com/developer/urscript/, https://www.universal-robots.com/developer/urscript/ [Hämtad: 2025d-04-23].

Universal Robots (u.å.). *URScript - Communication Protocols*. https://www.universal-robots.com/developer/urscript/ [Hämtad: 2025e-04-25].

Østergaard, Esben H. (2017). THE ROLE OF COBOTS IN INDUSTRY 4.0. *Universal Robotics*, s. 14.

Bilagor

I följande bilagor presenteras data i form av formulerade kundbehov, mätdata från fältförsök, bilder på koncept och exempel på filstruktur som planeringsscriptet använder sig av.

Bilaga 1: Kundbehov

Bilaga 2: Prototyper för objektglashållare

Bilaga 3: Mätdata från test av mätområde

Bilaga 4: Sammanställning av prototyper

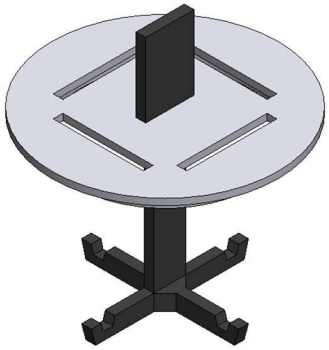
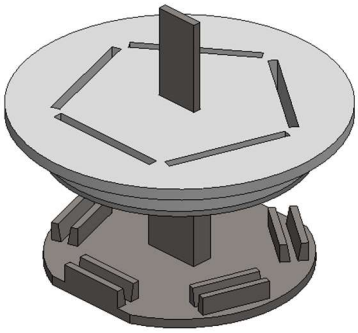
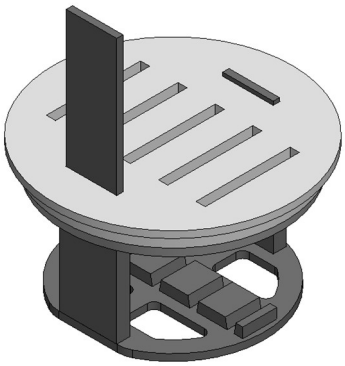
Bilaga 1: Kundbehov

Tabell 1: Inhämtade kundbehov, med viktning

Nr.		Kundbehov
1	Robotcellen	är lätt att använda även för personer utan robotkompetens
2	Robotcellen	har möjligt att hantera nya testfall utan omprogrammering
3	Robotcellen	använder minimal mängd kemikalier
4	Robotcellen	använder minimal mängd vatten
5	Robotcellen	sköljer varje prov med nytt vatten
6	Robotcellen	följer angivna tider för kritiska moment
7	Robotcellen	mäter prover på samma vis varje gång
8	Robotcellen	är självgående efter avslutad startprocedur
9	Robotcellen	möjliggör spårbarhet i testningen
10	Robotcellens	utrustning ryms på ett bord (inom ett område på 600*600 mm)

Bilaga 2: Prototyper för objektglashållare

Tabell 1: Sammanställning av koncept för objektglashållare med beskrivning och rendering

Version	Beskrivning	Rendering
1	• Fyra platser för objektglas • Platser roterade 90° • Smala fötter • Lyfttapp i centrum	
2	• Fem platser för objektglas • Platser relativt roterade 108° • Stor fot • Lyfttapp i centrum	
3	• Fem platser för objektglas • Platser på rad • Stor fot med hål för att släppa igenom vätska • Lyfttapp på sidan	

Bilaga 3: Mätdata från test av mätområde

Tabell 1: Sammanställning av mätdata från test av accepterade toleranser vid mätning

Förskjutning i X-led

Offset (mm)			
x-axel	z-axel	pH	pH, medel
-3	0	NaN	
-3	0	NaN	NaN
-3	0	NaN	
-2	0	6,27	
-2	0	6,26	6,27
-2	0	6,28	
-1	0	5,68	
-1	0	5,68	5,68
-1	0	5,67	
0	0	5,65	
0	0	5,65	5,65
0	0	5,64	
1	0	5,61	
1	0	5,62	5,62
1	0	5,62	
2	0	6,12	
2	0	6,1	6,10
2	0	6,09	
3	0	NaN	
3	0	NaN	NaN
3	0	NaN	

Förskjutning i Z-led

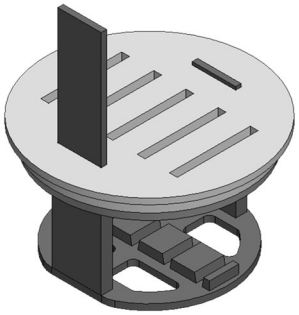
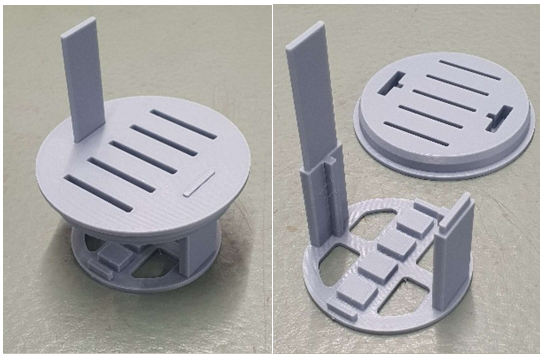
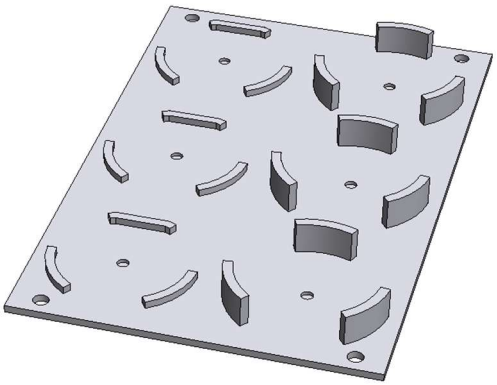
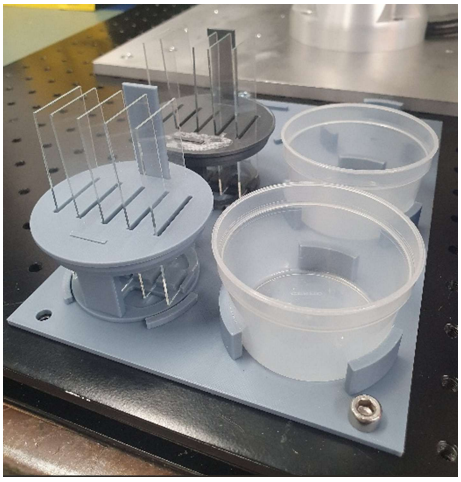
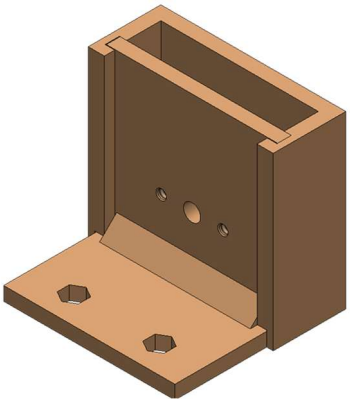
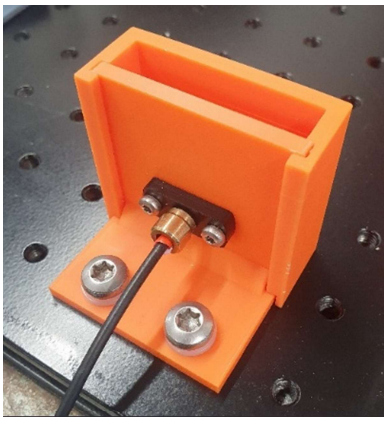
Offset (mm)			
x-axel	z-axel	pH	pH, medel
0	-3	NaN	
0	-3	NaN	NaN
0	-3	NaN	
0	-2	6,15	
0	-2	6,1	6,27
0	-2	6,12	
0	-1	5,68	
0	-1	5,68	5,68
0	-1	5,67	
0	0	5,64	
0	0	5,65	5,65
0	0	5,65	
0	1	5,64	
0	1	5,65	5,64
0	1	5,64	
0	2	5,43	
0	2	5,41	5,42
0	2	5,43	
0	3	NaN	
0	3	NaN	NaN
0	3	NaN	

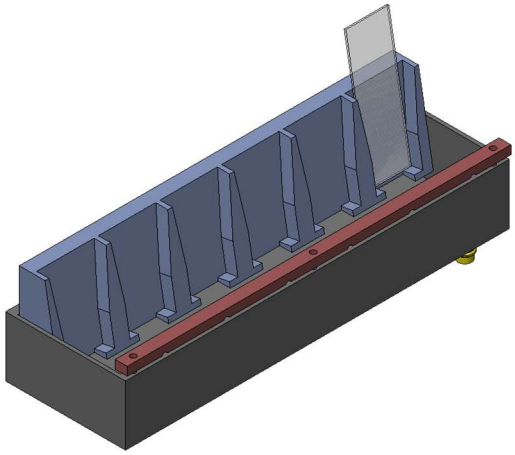
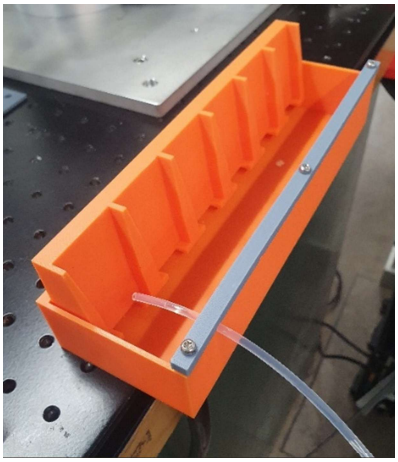
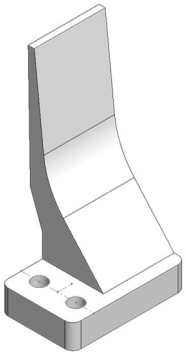
Förskjutning i X- och Z-led

Offset (mm)			
x-axel	z-axel	pH	pH, medel
0	0	5,65	
0	0	5,64	5,64
0	0	5,64	
1	1	5,73	
1	1	5,73	5,73
1	1	5,73	
2	2	NaN	
2	2	NaN	NaN
2	2	NaN	

Bilaga 4: Sammanställning av prototyper

Tabell 1: Sammanställning av renderingar och bilder på de framtagna prototyperna

Objekt	CAD-modell	Bild på prototyp
Objektglashållare		
Bricka för objektglashållare & kemikaliebehållare		
Mätstation		

Sköljstation		
Gripfingrar till gripdon		

Bilaga 5 – Exempel på input- och output-filer

testfall.csv > data

```csv
rinse_time;60;;;;;
measure_time;5;;;;;
holder_id;chem;sample1;sample2;sample3;sample4;sample5
1;A;60;120;180;240;300
2;B;60;120;180;240;300
```

Figur 1: Exempel på ett testfall som planeringsscriptet kan läsa in

generated_schedule.script

```
# Schedule generated: 2025-05-25 15:42

# --- PARAMETERS ---
# Rinse time: 60s, Measure time: 5s

global schedule = [
    [1, 5, 101, 201, 2010],
    [2, 72, 2011, 300, 2011],
    [3, 82, 300, 401, 2011],
    [4, 132, 2012, 300, 2012],
    [5, 142, 300, 402, 2012],
    [6, 147, 401, 300, 2011],
    [7, 152, 300, 500, 2011],
    [8, 192, 2013, 300, 2013],
    [9, 202, 300, 401, 2013],
    [10, 207, 402, 300, 2012],
    [11, 212, 300, 500, 2012],
    [12, 252, 2014, 300, 2014],
```

Figur 2: Exempel på ett URScript som planeringsscriptet genererar som går att läsa för roboten

test plan data > measuring_times_20250525_1542.csv > data

```csv
Sample ID,Chemical container,Sample pos,Measure time
2011,1,1,00:01:22
2011,1,1,00:02:32
2012,1,2,00:02:22
2012,1,2,00:03:32
2013,1,3,00:03:22
2013,1,3,00:04:32
2014,1,4,00:04:22
2014,1,4,00:05:32
2015,1,5,00:05:22
2015,1,5,00:06:32
2021,2,1,00:08:02
2021,2,1,00:09:12
2022,2,2,00:09:02
2022,2,2,00:10:12
```

Figur 3: Exempel på data exporterad av planeringsscriptet som innehåller planerade mättidpunkter, sorterade efter prov-ID