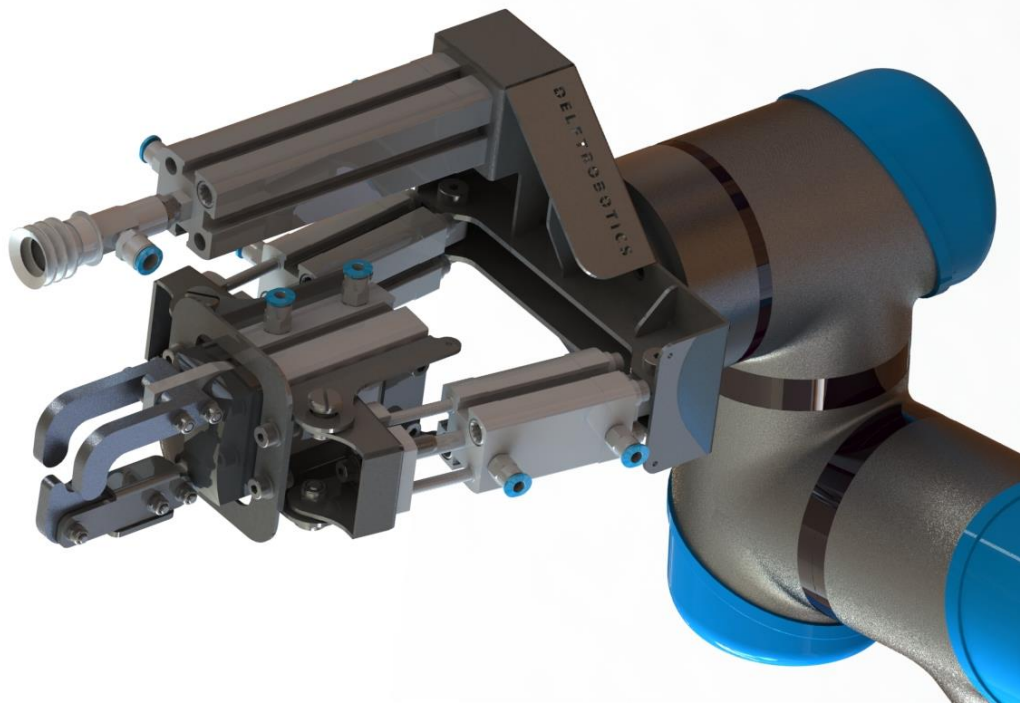


End-effector voor het automatiseren van zetbewerkingen

Afstudeerscriptie



Afstudeerstage

Sander G. Saers (11116633)

Delft Robotics
Delft, Mijnbouwstraat 120
Begeleiding: B.J. van Mil
K. van Deurzen

De Haagse Hogeschool
Delft, Rotterdamseweg 137
Begeleider: F.M. de Wit

Maart 2015



DELFTROBOTICS

intelligence at work

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Voorwoord

Dit rapport is het eindproduct van de afstudeerstage werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool van Sander G. Saers. De afstudeerstage heeft zich plaatsgevonden bij het bedrijf Delft Robotics in de periode tussen 17 november 2014 en 20 maart 2015.

Ik wil de mensen van Delft Robotics bedanken voor het aanbieden van de stageopdracht en de mogelijkheid tot het verwezenlijken van het gemaakte ontwerp. In het bijzonder wil ik Dhr. K. van Deurzen en Dhr. B. van Mil bedanken voor hun begeleiding binnen het bedrijf tijdens het verloop van de stage. Ik wil ook Dhr. F. de Wit bedanken voor zijn begeleiding vanuit de Haagse Hogeschool.

Verklarende woordenlijst

End-effector	Een werktuig of gereedschap bevestigd aan het uiteinde van een robotarm om een of meerdere functies uit te voeren.
Zetten	Het vouwen van plaatmateriaal op een zetbank. De plaat wordt onder een bepaalde hoek rond geperst
Vision	Het gebruik van camerazicht bij automatiseringstoepassingen
Handling	
Articulated robot	Lenige robotarm met zes rotatieassen
Dexterous workspace	Het werkgebied waarin het uiteinde van de robotarm onder alle oriëntaties een punt kan bereiken
Pneumatische cilinder	Uitschuifbaar onderdeel aangedreven door perslucht
Exploded view	Aanzicht van een assemblage waarbij alle onderdelen overzichtelijk los en zwevend zijn afgebeeld.
UR5	Universal robot 5, een (kleine) articulated robot
Teach pendant	Interface gekoppeld aan de UR5 waarmee een mens kan communiceren met het de robot
I/O	Input/output. Communicatie tussen elektronische deelsystemen.
Force mode	Toestand van de UR5 waarbij de kracht van de robotarm in een ingestelde translatie- of rotatierichting wordt gelimiteerd.

Samenvatting

De metaalbewerkingindustrie is op zoek naar een automatiseringsoplossing die het mogelijk maakt om op grote schaal en op flexibele wijze zetsbewerkingen uit te voeren op klein en middelgroot plaatmateriaal zonder dat daar een zeer grote investering bij komt kijken. Een dergelijke automatiseringsoplossing kan worden verwezenlijkt door middel van een articulated robot in combinatie met een gespecialiseerde end-effector. Verwacht wordt dat er in Nederland tenminste tien bedrijven geïnteresseerd zullen zijn in een dergelijk automatiseringssysteem.

Er is een end-effector ontwikkeld voor dit doeleinde. Het is ontworpen voor de Universal Robot 5 en maakt gebruik van zowel een vacuümgrepper als een mechanische grepper. Er is ook de mogelijkheid om een magneetgrepper toe te passen in plaats van de vacuümgrepper. Een belangrijke eigenschap van de end-effector is dat hij zo ontworpen is dat de mechanische grepper in de gewenste richtingen een mate van speling bevatten. Dit maakt het systeem eenvoudig te programmeren en komt de insteltijd ervan ten goede. Een overzicht van de technische eigenschappen van de ontwikkelde end-effector:

Kosten	€900,-	Werkstukafmetingen	25-150x60-200x0,5-2,5 [mm]
Afmetingen	210 x 126 x 103 [mm]	Werkstukgewicht	3500 [g] max
Gewicht	1400 [g]	Seriegrootte	100-5000 stuks
Grijpkracht (wrijving)	80 [N]		
Speling	20 [mm] voorwaarts, 15 [mm] zijwaarts 10° vrij rotatiebereik, 30° totaal rotatiebereik		

Naast de end-effector is er ook een overpakplatform ontwikkeld. De end-effector, het overpakplatform en de Universal Robot vormen samen het automatiseringssysteem. Het is gelukt om hiermee bij een zetbank eenvoudige werkstukken automatisch te zetten. De betrouwbaarheid en de grenzen aan complexiteit van de bewerkingen zijn nog onbekend.

Verwacht wordt dat het geautomatiseerde systeem ongeveer de helft van de snelheid van een mens haalt. De robot kan echter wel langer en constanter produceren, waardoor een vergelijkbare productiecapaciteit per dag kan worden bereikt. De fysieke werklast van een operator wordt hiermee ook verminderd: De operator de robot eenmalig in te stellen, en een klein deel van de tijd materiaal aan- en af te voeren. In de tussentijd kan de operator zich met andere taken bezig houden.

Een bedrijf geeft zich met dit geautomatiseerde systeem de mogelijkheid om grotere orders aan te kunnen nemen. Het systeem vervangt voor een groot deel de operator van de zetbank. De financiële winst van het systeem wordt vooral uitgedrukt in besparing op kosten van operators. De terugverdientijd van de investeringskosten van een dergelijk systeem is sterk afhankelijk van de gebruiksintensiteit ervan. Wanneer er meer dan 40 uur per week gebruik van wordt een terugverdientijd voor de investeringskosten tussen 4 en 8 jaar verwacht, afhankelijk van de gemiddelde seriegroottes.

Overige apparatuur	UR5, overpakplatform, overpakgrepper, automatische zetbank
Investeringskosten	€50.000,- (totaal)
Terugverdientijd	4-8 jaar

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Verklarende woordenlijst	3
Samenvatting	4
Inleiding.....	7
1 Vooronderzoek	8
2 Conceptfase	9
2.1 Pakket van eisen en wensen	9
2.2 functieanalyse	11
2.3 morfologische kaart	12
2.4 concepten	13
2.5 Conceptkeuze.....	17
3 Uitwerkingsfase.....	18
3.1 Basisplaat	18
3.2 Uitschuifbare vacuümgreijper en elektromagneet.....	19
3.3 Armen.....	20
3.4 Mechanische griijper.....	21
3.5 Oriëntatieplatform.....	22
3.6 Overzicht	23
3.7 Berekeningen	24
3.8 Pneumatische en elektronische aansluiting	30
4 Testen.....	31
4.1 Opstelling	31
4.2 Programmastructuur	32
4.3 Resultaten	32
5 Verbeteringen	34
5.1 Vinger ontwerp	34
5.2 Overpakgriijper	35
5.3 Frame	35
6 Verwachtingen	36
6.2 Kostenoverzicht	38
Conclusie	40
Reflectie	41
Literatuur	42

Bijlage A: Vooronderzoek.....	43
Concurrentieanalyse	43
Toepassingsmogelijkheden	45
Technologische mogelijkheden.....	47
Uitkomst van het vooronderzoek	49
Bijlage B: Beoordeling werkstukcomplexiteit	50
Bijlage C: Technische tekeningen.....	52
Bijlage D: Onderdelenlijst	67
Bijlage E: Pneumatisch schema.....	69
Bijlage F: Programmastructuur van de UR5 tijdens de locatietest	70

Inleiding

De laatste jaren wordt flexibele productieautomatisering steeds vaker toegepast bij middelgrote en kleine productiebedrijven. Dit komt door groeiende toegankelijkheid van automatiseringstechnologieën. Productieautomatisering behoeft doorgaans een initiële investering met als resultaat een lagere stuksprijs van de geproduceerde producten. Door toepassing hiervan kunnen deze bedrijven concurreren met producenten in lageloonlanden.

Een bewerking die vaak wordt toegepast bij metaalbewerkings- en productiebedrijven is het zetten, of kanten, van metaal plaatmateriaal. Dit is fysiek en repetitief werk dat vaak met de hand wordt uitgevoerd. Om deze reden zou het automatiseren van deze bewerking erg voordelig zijn. Het oppakken en verplaatsen van het plaatmateriaal is echter een complexe handeling om te automatiseren, omdat het werkstuk tussen bewerkingen door van vorm c.q. van oriëntatie verandert.

Delft Robotics is een jong bedrijf dat gekoppeld is aan de TU Delft en er naar streeft om automatiseringsoplossingen te faciliteren door het toepassen van vision technologie in combinatie met robotarmen. Zij verwachten dat deze aanpak ook kan worden toegepast bij het automatiseren van zetbewerkingen.

Om het plaatmateriaal op te pakken en te begeleiden zal een end-effector moeten worden ontwikkeld. Dit is een tool, bevestigd aan het uiteinde van een robotarm, om een of meerdere functies uit te voeren. In dit geval zal het een type grijper zijn. Het ontwikkelen van een dergelijke end-effector is het onderwerp van de afstudeeropdracht bij Delft Robotics.

De ontwikkeling van de end-effector is via een aantal stappen verlopen: Er is een vooronderzoek (hoofdstuk 1) uitgevoerd waarin de mogelijkheden en kansen voor de end-effector zijn verkent. Hieruit is een pakket van eisen en wensen voor het product ontstaan. Aan de hand van het pakket van eisen is er een aantal concepten worden ontwikkeld. Na een afweging is er een concept gekozen om verder uit te werken. Deze conceptfase wordt beschreven in hoofdstuk 2. Het gekozen concept is verder ontwikkeld en hieruit is een prototype ontstaan. Een beschrijving hiervan is te vinden in hoofdstuk 3. Met het prototype zijn tests uitgevoerd om de functionaliteit van het ontwerp te testen (hoofdstuk 4). In hoofdstuk 5 worden verbeteringen aan het ontwerp behandeld. In hoofdstuk 6 worden de verwachtingen van de prestaties van het automatiseringssysteem en de financiële gevolgen hiervan besproken.

1 Vooronderzoek

Het vooronderzoek wordt uitgevoerd om vast te stellen waar de kansen en mogelijkheden liggen voor de te ontwerpen end-effector. Hierbij is de huidige situatie van drie kanten bekeken. a) Er is er onderzocht wat de huidige stand van zaken is op het gebied van automatisering bij zetsbewerkingen. Dit kan gezien worden als een soort concurrentieonderzoek waarbij de krachten en zwaktes van de huidige automatiseringsoplossingen bij zetsbewerkingen zijn ontleed. b) Er is onderzocht wat de doelgroep is voor het toepassen van automatisering bij zetsbewerkingen. Hierbij is er gekeken naar het aantal bedrijven dat de middelen en de behoefte zou kunnen hebben voor het toepassen van automatisering bij het zetproces. c) Er is onderzocht welke technieken er beschikbaar zijn om een dergelijke automatisering te verwezenlijken. Hierbij is een uiteenzetting gemaakt van toepasbare technieken en de voor- en nadelen hiervan.

Het onderzoek is uitgevoerd door relevante informatie op het internet te verkennen, door het lezen van papers en boeken over automatisering (zie literatuurlijst), en door middel van contact met mensen binnen de metaalbewerkings- en automatiseringsindustrie.

Uit dit onderzoek kon worden opgemaakt waar de kansen liggen voor een nieuw type end-effector. Het zorgde voor een inkadering vanuit drie verschillende invalshoeken voor het product. Hieruit is het pakket van eisen ontstaan dat wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

Het hele vooronderzoek is te vinden in Bijlage A. De conclusie van het vooronderzoek is als volgt:

Momenteel worden er nog geen automatiseringsoplossing toegepast waarbij kleine zetproducten in grote getalen flexibel kunnen worden geproduceerd, zonder dat daar een zeer grote investering mee gepaard gaat. Dit is het segment waar het nieuwe product kans maakt om te slagen.

Met flexibele productie wordt bedoeld dat er in korte tijd van product gewisseld kan worden.

De markt is op zoek naar een automatiseringsoplossing die het mogelijk maakt om op grote schaal en op flexibele wijze zetsbewerkingen uit te voeren zonder dat daar een grote investering bij komt kijken.

Verwacht wordt dat een dergelijke automatiseringsoplossing kan worden verwezenlijkt door middel van een articulated robot in combinatie met een gespecialiseerde end-effector waarbij een of meerdere nader te bepalen grijptechnieken worden toegepast.

Potentiele afnemers van dit product zijn metaalbewerkingsbedrijven die:

- op grote schaal zetsbewerkingen (willen) uitvoeren met klein en middelgroot plaatmateriaal;
- beschikken over een automatische zetbank, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren;
- beschikken over een articulated robotarm, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren.

Verwacht wordt dat er in Nederland tenminste tien bedrijven voldoen aan dit profiel.

2 Conceptfase

Er is aan de hand van de resultaten van het vooronderzoek een pakket van eisen opgesteld (2.1) waarin de globale behoeften van het grijpersysteem worden vastgelegd. Het pakket van eisen is opgedeeld in vaste en variabele eisen. Er zullen meerdere concepten worden uitgewerkt die aan de vaste eisen voldoen. De mate waarin het concept voldoet aan de variabele eisen zal bepalen welk concept er uiteindelijk zal worden uitgewerkt.

Er is een functieanalyse (2.2) voor het systeem opgesteld. Er zijn verschillende manieren van vervulling van de verschillende functies van het systeem bedacht. Deze zijn weergegeven in de morfologische kaart (2.3). Hieruit zijn verschillende concepten ontstaan (2.4). Aan de hand van het pakket van eisen is het meest geschikte concept uitgekozen om verder te ontwikkelen (2.5).

2.1 Pakket van eisen en wensen

Uit het vooronderzoek is gebleken dat het grijpersysteem zich vooral moest richten op plaatwerk met kleine en middelgrote afmetingen. Er is een bereik aan afmetingen van plaatmateriaal opgesteld waar het systeem mee zal kunnen werken. Uiteraard is het gewenst dat dit bereik verder zo groot mogelijk is. Het systeem moet het materiaal nauwkeurig kunnen oppakken en begeleiden, ook bij vervorming en heroriëntatie van het product.

De end-effector werd ontwikkeld voor de UR5 articulated robot arm. Dit is een competente robotarm die Delft Robotics ter beschikking heeft. Het armbereik en de maximale last van het grijpersysteem worden hierdoor bepaald.

Vaste eisen

- Kan op het uiteinde van een UR5 worden aangesloten
- Kan plaatmateriaal, liggend aangeleverd met willekeurige oriëntatie, oppakken (initial pick-up)
- Platen binnen het onderstaande bereik moeten kunnen worden behandeld:
 - Breedte 25-150 [mm]
 - Dikte 0.5-2 [mm]
 - Lengte 60-200 [mm]
- Werkstuk en gripper wegen samen maximaal 5 [kg]. Dit is de maximale last van de UR5. Een plaat van 200 x 150 x 2 [mm] RVS weegt ongeveer 500 [g]. Dit betekent dat de end-effector maximaal 4,5 [kg] mag wegen.
- Het werkstuk moet vlak tegen een aanzet van de zetbank geplaatst kunnen worden

Variabele eisen

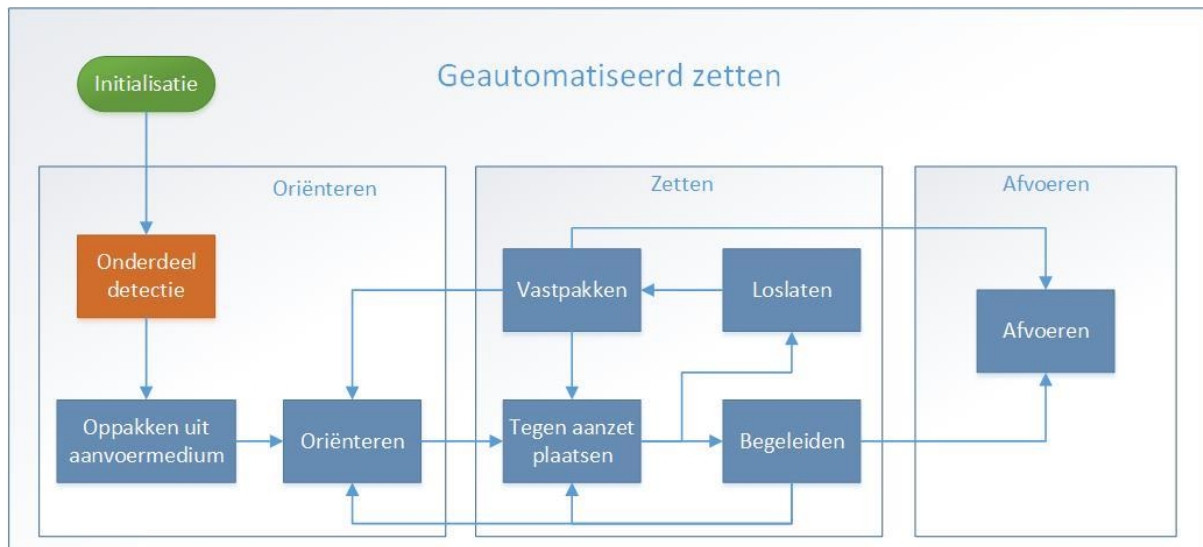
- Werkstukcomplexiteit
Het ontwerp moet lenig genoeg zijn om de meeste soorten zets bewerkingen uit te kunnen voeren (zie werkstukcomplexiteit in bijlage B)
- Compactheid
De end-effector moet zo compact mogelijk zijn om met het bewegingsbereik van de UR5 zo soepel mogelijk te kunnen manoeuvreren tijdens het verplaatsen en begeleiden van het materiaal.
- Gebruiksgemak
Het mechanische ontwerp moet de programmeurs die de end-effector gebruiken zo veel mogelijk ontlasten van programmeertaken.
- Nauwkeurigheid
De end-effector moet zo nauwkeurig mogelijk zets bewerkingen uitvoeren.
- Snelheid
De end-effector moet zo snel mogelijk zets bewerkingen uitvoeren.
- Werkstukgroottebereik
De end-effector toepasbaar zijn op een zo groot mogelijk werkstukbereik.
- Veiligheid
De end-effector moet veilig zijn voor de gebruiker.
- Duurzaamheid/robuustheid
De end-effector moet een grote levensduur hebben en dus bestand zijn tegen slijtage, corrosie en verkeerd gebruik.
- Kostprijs
De kostprijs van het product moet zo laag mogelijk zijn.
- Gewicht
De end-effector moet zo licht mogelijk zijn.

Wensen

- Modulair
De end-effector is opgebouwd uit verwisselbare componenten voor extra veelzijdigheid.
- Uitlijning
De handling gripper is uitgelijnd met het draaipunt op het uiteinde van de UR5.
- De mechanische gripper moet meegeven wanneer het tegen de vaste aanzet wordt geplaatst.

2.2 functieanalyse

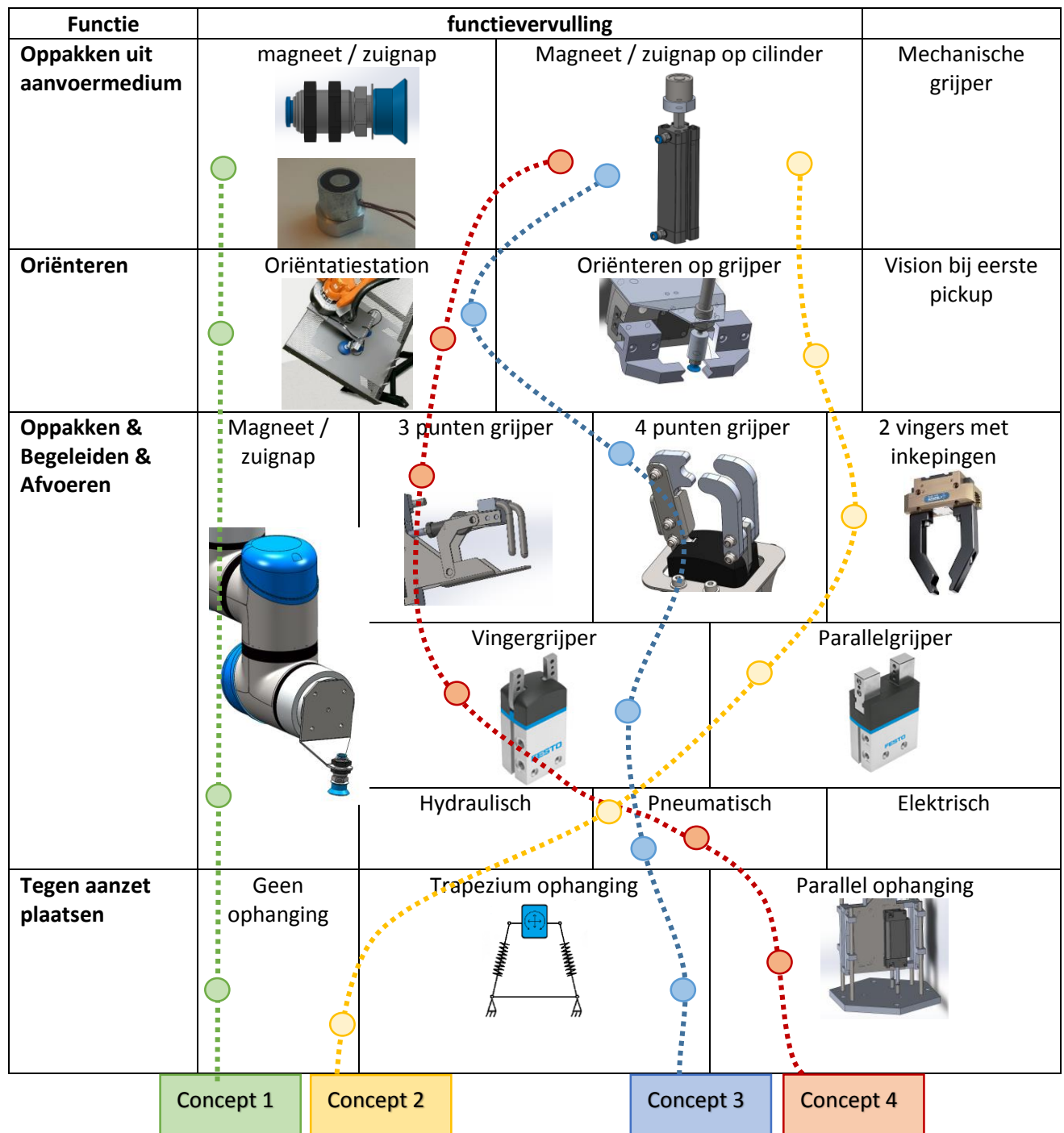
De hoofdfunctie van de end-effector is het geautomatiseerd uitvoeren van zetbewerkingen. Deze hoofdfunctie is opgedeeld in een aantal deelfuncties.



Figuur 1: Functieoverzicht van geautomatiseerd zetten

Een overzicht van de functies is te zien in Figuur 1. De blauwe blokken zijn de functies die worden uitgevoerd door de end-effector in samenwerking met de UR5 robotarm. Het oranje blok, de onderdeeldetectie, is een functie die wordt uitgevoerd door een vision systeem. Dit valt buiten de grenzen van deze opdracht.

2.3 morfologische kaart



2.4 concepten

Er zijn vier concepten uitgewerkt die elk gebruik maken van verschillende componenten om de deelfuncties te vervullen. Elk concept wordt kort uitgelicht, hierna worden de concepten getoetst aan de mate van voldoening aan het vooraf opgestelde pakket van eisen.

2.4.1 Concept 1

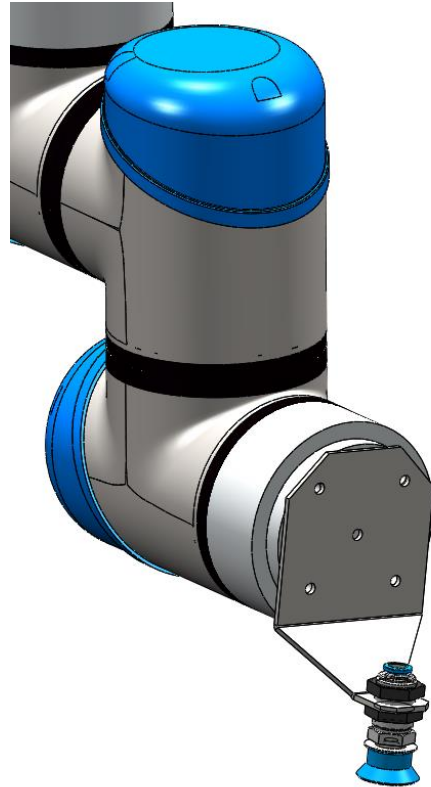
Bij dit concept wordt er een enkele vacuümgreipper toegepast. Dit is een erg simpel ontwerp, maar het is wel degelijk mogelijk om hiermee zetsbewerkingen uit te voeren. De vacuümgreipper kan verwisseld worden met een elektromagneet.

Voordelen

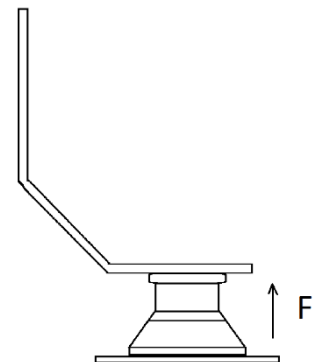
- Eenvoudig ontwerp
- Goedkoop
- Modulair

Nadelen

- Beperkte werkstukcomplexiteit
- Beperkte nauwkeurigheid
- Geen vering -> lastig te programmeren
- Tussenstation vereist voor orientatie



Figuur 2: Concept 1



Figuur 3: vacuümgreipper

2.4.2 Concept 2

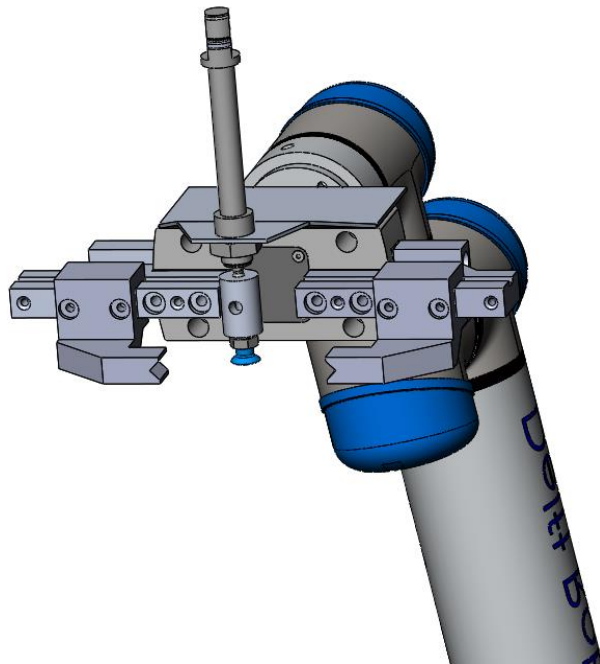
Dit concept maakt gebruik van een uitschijfbare cilinder met een zuignap of elektromagneet aan het uiteinde. Dit wordt gebruikt om het materiaal uit een aanlevermedium te pakken (initial pickup). De mechanische klauwen kunnen het materiaal overpakken vanaf de cilinder. De groeven in de klauwen zorgen ervoor dat het plaatmateriaal gefixeerd wordt. Hierdoor wordt de oriëntatiestap uit het proces verwijderd. Dit betekent echter wel dat er hiermee enkel werkstukken met lage werkstukcomplexiteit geproduceerd kunnen worden omdat de klauwen geen vervormde oppervlakten kunnen beetpakken.

Voordelen

- Oriëntatiestap op de grijper
- Grijper uitgelijnd met draaipunt UR
- Modulair

Nadelen

- Beperkte werkstukcomplexiteit
- Kwetsbaar ontwerp
- Klein werkstukgroottebereik
- Lage werkstukcomplexiteit
- Geen vering -> lastig programmeren



Figuur 4: Concept 2



Figuur 5: Fixatie van het plaatmateriaal in de mechanische grijper

2.4.3 Concept 3

Dit concept maakt gebruik van een trapeziumvormige ophanging van de ophanging van de mechanische grijper. Dit maakt het mogelijk om een zetonderdeel eenvoudig tegen een aanzet aan te plaatsen, om dat de plaatsen, om dat de mechanische grijper in twee translatieassen en een rotatieas meeveert (zie

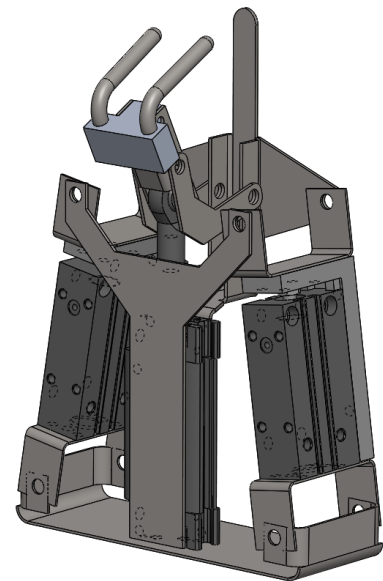
). Dit maakt het programmeren met deze end-effector eenvoudiger omdat er veel speling toegestaan is. De initial pickup wordt verzorgd door een vacuum grijper / elektromagneet bevestigd aan een cilinderuiteinde. Het plaatmateriaal wordt hiermee ter oriëntatie op een tussenstation geplaatst en vervolgens opgepakt met de mechanische grijper.

Voordelen

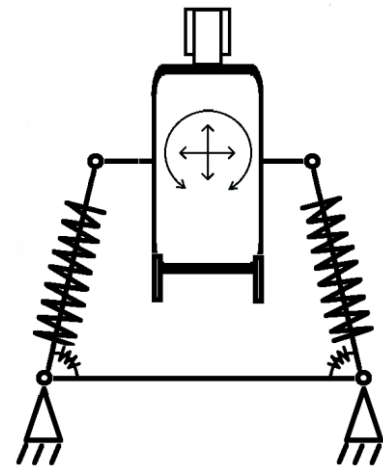
- Hoge werkstukcomplexiteit
- Grijper uitgelijnd met draaipunt UR
- Ophanging zorgt voor vering in alle gewenste assen
- modulair

Nadelen

- Tussenstation vereist voor oriëntatie



Figuur 6: Concept 3



Figuur 7: trapeziumvormige ophanging

2.4.4 Concept 4

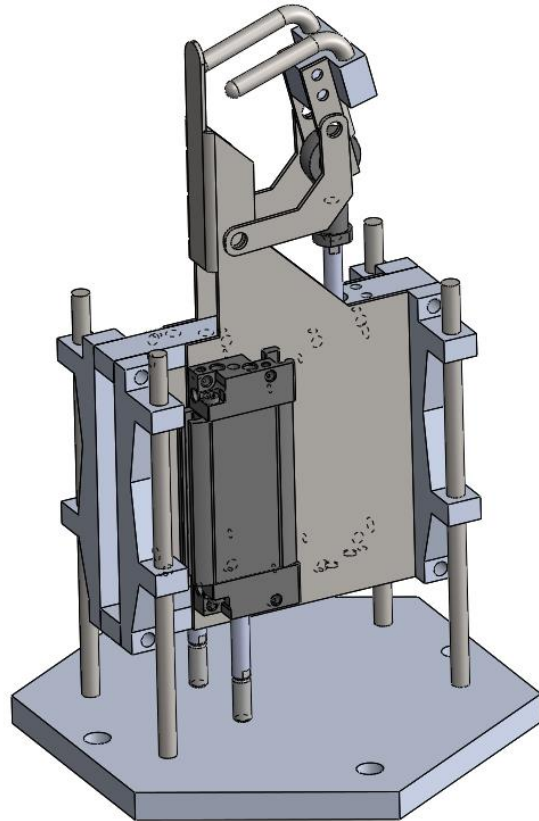
Dit concept is gebaseerd op een translationeel veersysteem. De mechanische grijper kan over de lengteas via een viertal stangen op de hoekpunten heen en weer glijden. Het wordt naar voren gedrukt door twee pneumatische cilinders in het midden. De initial pickup wordt verzorgd door een vacuüm-grijper of elektromagneet bevestigd aan het uiteinde van een uitschuifcilinder.

Voordelen

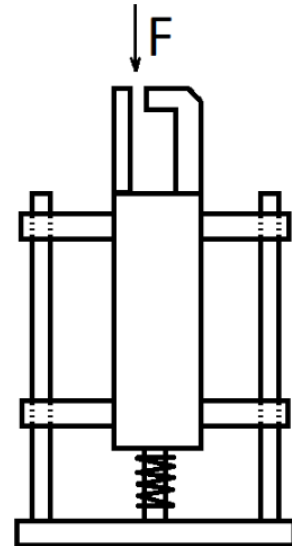
- Grijper uitgelijnd met draaipunt UR
- Vering in lengteas
- Hoge werkstukcomplexiteit
- modulair

Nadelen

- Gevoelig voor defecten/vastlopen
- Tussenstation vereist voor orientatie



Figuur 9: concept 4



Figuur 8: Translationeel veersysteem

2.5 Conceptkeuze

De vier concepten worden getoetst aan het pakket van eisen. Elk concept voldoet aan de vaste eisen. De concepten worden beoordeeld op de mate van voldoening aan de variabele eisen. Elke variabele eis krijgt een weegfactor (1-4) toegewezen. Hiermee wordt de relatieve mate van significantie van de eis aangegeven. Elk concept krijgt een score (1-4) per eis toegewezen. Dit is de mate van voldoening aan de eis, waarbij 1=voldoet niet, 2=voldoet deels, 3=voldoet grotendeels 4=voldoet volledig. De totale score van het concept is de som van de score x weegfactor voor elke eis. Een overzicht van de scores is weergegeven in Tabel 1.

	Weegfactor	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
Werkstukcomplexiteit	4	2	2	4	3
Compactheid	3	4	2	2	2
Gebruiksgemak	4	1	1	4	3
Nauwkeurigheid	4	2	3	4	3
Snelheid	3	3	4	2	2
Werkstukgroottebereik	3	4	2	3	3
Veiligheid	1	4	2	3	2
Duurzaamheid	1	4	1	2	2
Kostprijs	2	4	2	2	3
Gewicht	1	4	2	2	2
Totaal		69	57	80	69
Totaal %		66,3%	54,8%	76,9%	66,3%

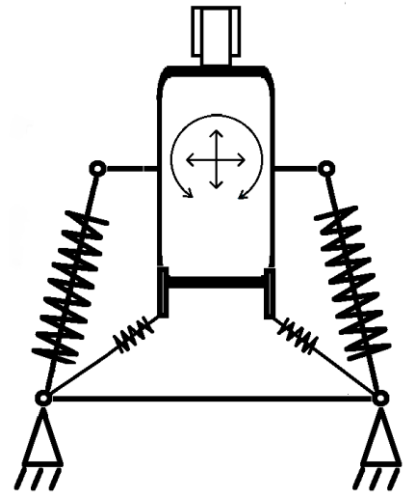
Tabel 1: Mate van voldoening aan de gestelde eisen per concept

Uit de vergelijking volgt dat concept 3 het meeste voldoet aan de gestelde eisen. Dit concept zal verder worden uitgewerkt.

3 Uitwerkingsfase

De armen en draaipunten van het gekozen concept vormen een trapeziumvorm (zie Figuur 10). De twee armen aan de zijkant zijn verend. Dit ontwerp zorgt ervoor dat de grijper aan de bovenste arm meegeeft over twee translatieassen en een rotatieas. Op deze manier kan de mechanische grijper op het uiteinde van de end-effector tegen een aanzet worden geplaatst en meeveren zonder dat deze kapot gaat. Dit maakt het programmeren van de robot vele malen eenvoudiger.

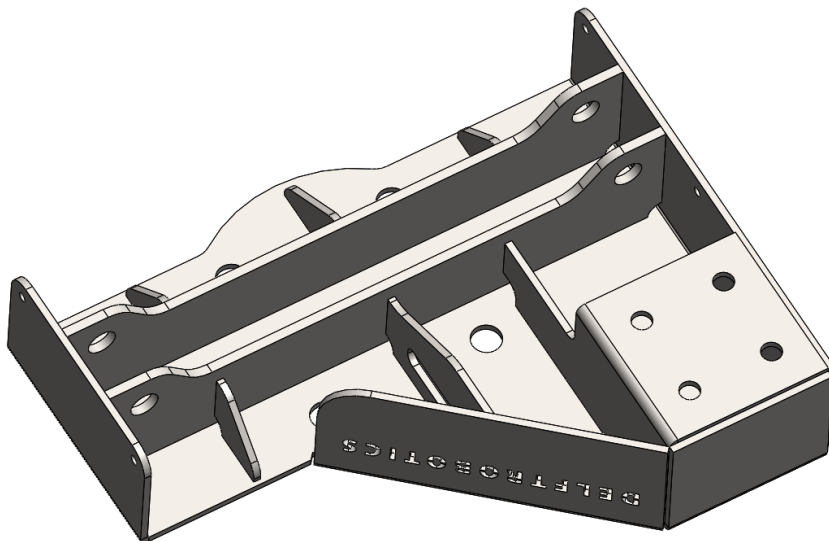
Om ervoor te zorgen dat het systeem zonder uitwendige kracht terugkeert naar zijn ruststand worden er veren toegepast. De mechanische grijper staat in ruststand in lijn is met het draaipunt op het uiteinde van de UR5.



Figuur 10: Schematische weergave van het ontwerp concept

3.1 Basisplaat

De end-effector is aan het uiteinde van de UR5 bevestigd met een basisplaat gemaakt van gelast en gezet roestvast staalplaat. De plaatonderdelen zijn vervaardigd door middel van lasersnijden. Dit gaf de mogelijkheid om ook het logo van Delft Robotics in de zijkant van de basisplaat te snijden.



Figuur 11: Basisplaat

Op de basisplaat wordt de pneumatische cilinder met vacuüm-grijper / elektromagneet gefixeerd. Aan beide uiteinden worden ook twee cilinders scharnieren bevestigd, die fungeren als twee verende armen.

De plaatdikte is 1,5 [mm] voor de meeste onderdelen van de basisplaat. De twee parallelle platen waar de armen tussen worden bevestigd zijn 2 [mm] dik voor extra stijfheid.

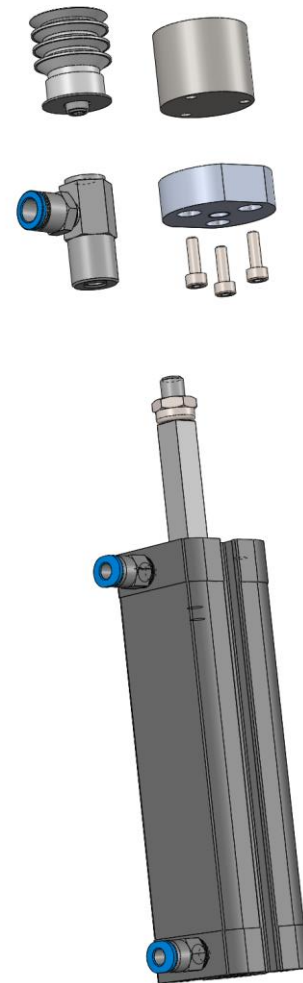
3.2 Uitschuifbare vacuümgreijper en elektromagneet

Er is een 16 x 75 cilinder toegepast om de vacuümgreijper of elektromagneet op te bevestigen. Dit betekent dat de zuiger in de cilinder een diameter heeft van 16 [mm] en een slag van 75 [mm]. Er is gekozen voor een vierkante stang om rotatie te voorkomen. Het uiteinde van de cilinder bevat M6 schroefdraad. Hier kan zowel de vacuümgreijper als de elektromagneet op worden geschroefd.

Bij Delft Robotics was er een ronde Elektromagneet beschikbaar voor het ontwerp. Er is een verbindingstuk ontworpen om de magneet op de cilinder te kunnen bevestigen.

Er was eveneens een bruikbare zuignap beschikbaar voor de end-effector. Dit is een Ø20 [mm] siliconen zuignap met een M6 aansluiting. Deze kan via een adapter worden bevestigd op de cilinder. Deze adapter bevat twee M6 verbindingen en een 6 [mm] pneumatische fitting.

Aan de basisplaat is een schotverbinding bevestigd om de pneumatische leiding uit de adapter te begeleiden.



Figuur 12: Exploded view vacuümrijper en elektromagneet

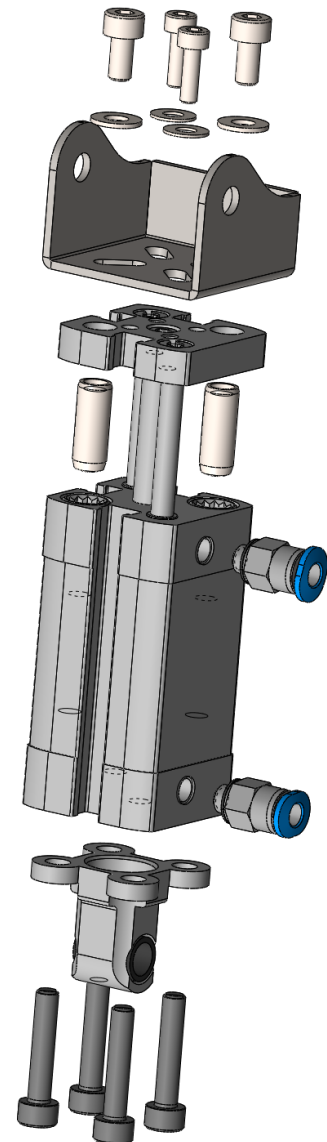
3.3 Armen

De armen aan beide zijanten dienen veren te zijn. Om deze reden zijn ook hier pneumatische cilinders toegepast. Deze cilinders werken als veren. De kracht van de veerwerking van de cilinders kan worden gevarieerd door de druk aan te passen.

Omdat de cilinder tegen buiging bestendig moet zijn, is er gekozen voor een cilinder met dubbele geleiding (de ADNGF 12-20 van Festo). Hierdoor wordt de aandrijfas ondersteund. De zuigerdiameter is 12 [mm] en heeft een slag van 20 [mm].

De arm is aan beide uiteinden scharnierend. Aan de onderkant is standaard scharnier van Festo toegepast. Door middel van een pin door het gat van dit scharnier wordt de arm met de basisplaat bevestigd.

Aan de bovenkant is een zelfontworpen scharnier toegepast. Dit scharnier is gemaakt van 1,5 [mm] dik gezet RVS. Hiermee wordt de arm bevestigd aan de mechanische grijper.



Figuur 13: Exploded view arm

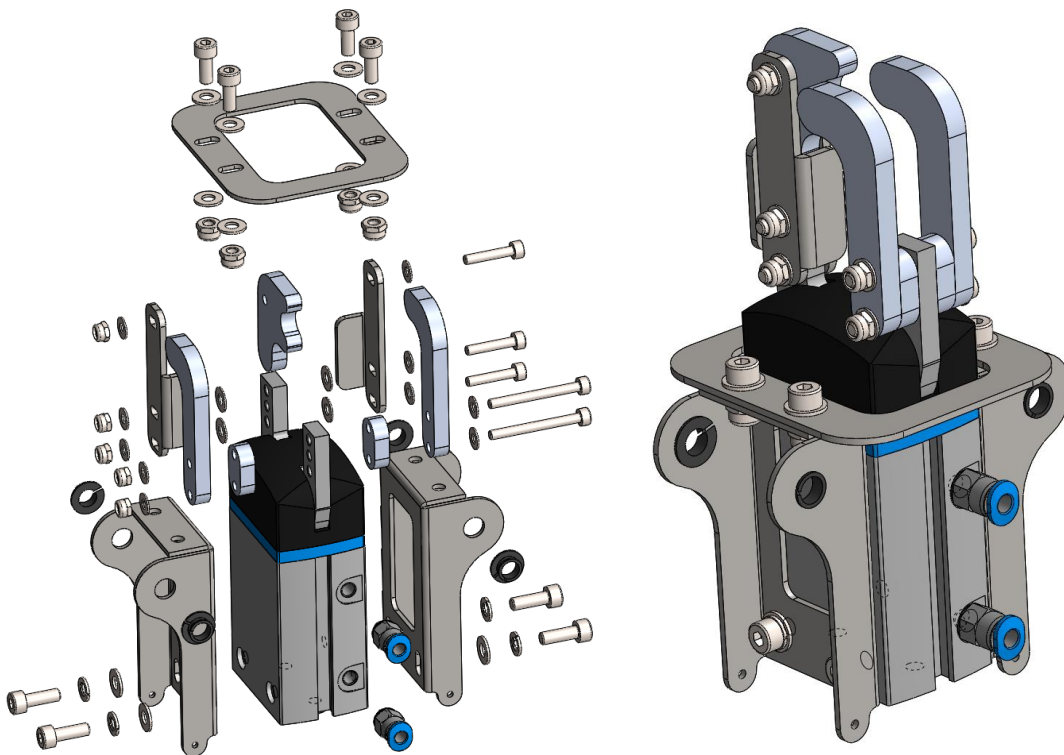
3.4 Mechanische grijper

Er is gekozen voor een mechanische vingergrijper (de DHWS 25 van Festo). Beide vingers worden door een enkele pneumatische cilinder ($\varnothing 25$ [mm]) aangedreven. De kracht van de vingers is 386 [Ncm] bij 6 [bar]. De vingers hebben samen een rotatiebereik van 40° .

Er is gekozen voor een vierpunts grijpmethode. Hiermee kan het werkstuk nauwkeurig worden ingeklemd. Hiervoor zijn drie vingers ontworpen, waarvan er één een gespleten uiteinde heeft. De vingers worden gesneden uit 5 [mm] dik aluminium en hebben een lengte van ongeveer 45 [mm].

Om de vingers bij variërende plaatdiktes van het op te pakken materiaal toch parallel te laten grijpen, is er met opzet een kleine hoeveelheid speling toegepast bij de gespleten vinger. Deze speling wordt gerealiseerd door de vinger op een draaipunt te bevestigen tussen twee aanslagen in.

De grijper is middels twee scharnierplaten, gemaakt van gesneden, gezet en gelast RVS, aan de bovenkant van beide armen bevestigd. Er is een dwarsverstijvingsplaat toegepast tussen beide scharnierplaten voor extra stijfheid.



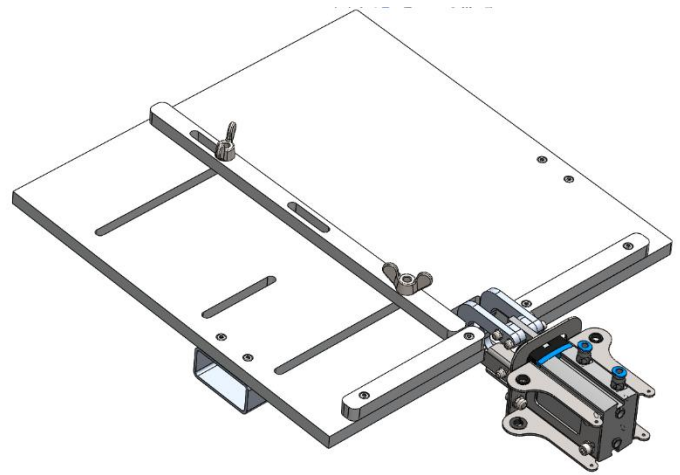
Figuur 14: Exploded view en geassembleerd grijperonderdeel

3.5 Oriëntatieplatform

De end-effector vereist een hulpmiddel om het werkstuk over te geven van de vacuümgreipper naar de mechanische gripper.

Met de vacuümgreipper wordt een plaat op het schuine vlak geplaatst. Door zwaartekracht glijdt het vanzelf naar de gewenste plek, waar het tegen een rand en een instelbare lat tot stilstand komt. Hier bevindt zich ook een inkeping in het vlak waar de plaat opgepakt kan worden met de mechanische gripper. Op deze manier kan een plaat snel en nauwkeurig worden overgepakt.

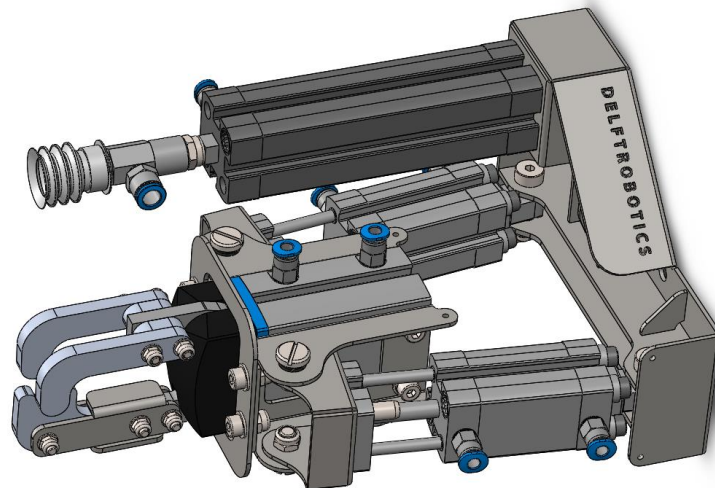
Het platform is ontworpen om op een statief bevestigd te worden. Op deze manier kan de helling en de hoogte van het platform eenvoudig worden ingesteld.



Figuur 15: ontwerp van het oriëntatieplatform

3.6 Overzicht

In Figuur 16 is de samengestelde end-effector weergegeven. Een inventarisatie van alle onderdelen is weergegeven in bijlage D. Hierin zijn ook de ordernummers en voorraadstatus van alle onderdelen weergegeven, voorafgaand aan de bestelling. Er is getracht zo veel mogelijk gebruik te maken van onderdelen die al op voorraad waren.



Figuur 16: complete samenstelling van de end-effector

Een overzicht van de technische eigenschappen van de end-effector:

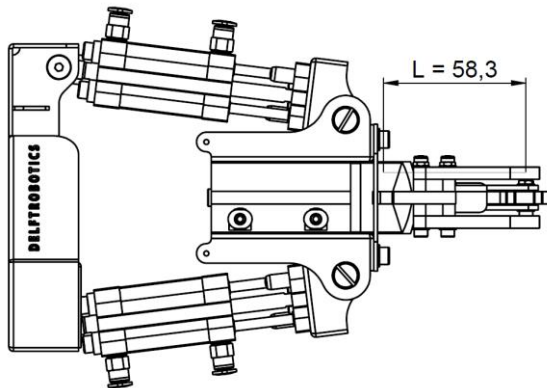
Prijs	€900,-
Afmetingen	210 x 126 x 103 [mm]
Gewicht	1400 [g]
Speling	20 [mm] voorwaarts, 15 [mm] zijwaarts 10° vrij rotatiebereik, 30° totaal rotatiebereik

Het is de bedoeling dat er veren worden toegepast tussen de basisplaat en de scharnierplaten van de mechanische grijper. Voor het verbinding van de veren zijn er gaten in de plaatonderdelen ontworpen. Het type veer dat wordt toegepast hangt af van de gewenste veerkracht. Hier wordt in de volgende paragraaf meer aandacht aan besteed.

3.7 Berekeningen

Grijper

De lengte van het vingeruiteinde tot het draaipunt van de mechanische grijper is $l = 5,83 \text{ [cm]}$ (zie Figuur 17).



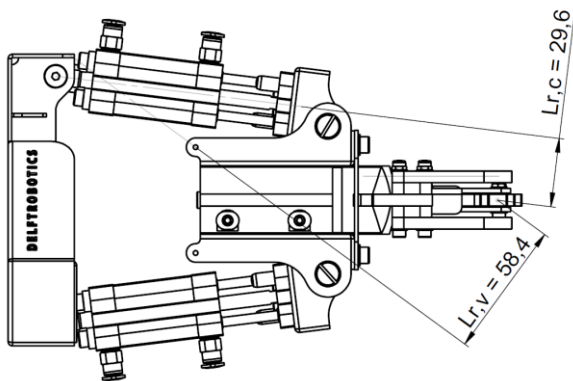
Figuur 17: gemiddelde lengte van de vingers [mm]

De kracht van de grijper is 386 [Ncm] bij 6 [bar], de vingers zijn met rubber bedekt. De statische wrijvingscoëfficiënt (μ_s) tussen rubber en staal is 1,2. De wrijvingskracht tussen de vingers en het plaatmateriaal kan worden berekend:

$$F_w = F_{vingers} \cdot \mu_s = (386/5,83) 1,2 \cdot \approx 80 \text{ [N]}$$

Ophanging

De ophanging van de mechanische grijper is een systeem van twee cilinders en vier veren. De cilinders zorgen ervoor dat de grijper tijdens het drukken tegen de aanzet meegeeft. De veren zorgen ervoor dat de grijper in ruststand wordt uitgelijnd met het uiteinde van de UR5.



Figuur 18: veer- en cilinderarm t.o.v. gemiddeld draaipunt

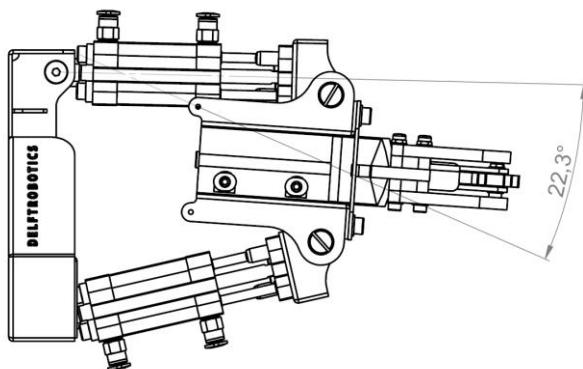
Wanneer de end-effector neigt te roteren, moet het eerst in de vering meebewegen, vervolgens in de cilinders. Op deze manier wordt het werkstuk het beste tegen de aanzet geplaatst. Om dit effect te bereiken moet het moment om het draaipunt om de vingers veroorzaakt door de veren kleiner zijn dan dat van de cilinders in ruststand:

$$2M_v < M_c \quad \rightarrow \quad 2l_{r,v}F_v < l_{r,c}F_c \quad \rightarrow \quad 2 \cdot 58,4F_v < 29,6F_c$$

Hieruit volgt dat:

$$F_v < 0,25F_c \quad (1)$$

De kracht van de cilinders kan worden ingesteld door de druk aan te passen, de veerkracht is afhankelijk van het type veer dat wordt toegepast.



Figuur 19: minimale hoek tussen veren en cilinder

De cilinders en veren werken elkaar deels tegen. De kleinst mogelijke hoek tussen de cilinders en de veren is 22,3° (zie Figuur 19). De cilinderkracht moet groter zijn dan de resulterende kracht van de veren:

$$F_c > 2 \cos(22,3) F_v \rightarrow F_v < 0,54 F_c \quad (2)$$

Vergelijking (1) en (2) geven voorwaarden voor de krachtverhouding tussen de kracht van de vering en cilinders. Wanneer (1) voldoet, voldoet (2) ook. In dit geval is $F_v < 0,25F_c$ (1) dus leidend.

Wanneer het werkstuk met de grijper tegen een aanzet van een zetbank wordt geplaatst is het de bedoeling dat het veersysteem van de end-effector meeveert. De kracht van de cilinders moet om deze reden kleiner zijn dan de wrijvingskracht van de vingers:

$$2F_c < F_w \rightarrow F_c < 40 [N]$$

De kracht van de cilinders is afhankelijk van de pneumatische druk: $P = F/A$. De kracht van beide cilinders in de lengterichting mag samen niet meer zijn dan $F_{vingers}$. Uit een test is gebleken dat de minimale druk waarbij een cilinder uitschuift ~ 1 bar is. Het zuigeroppervlak is $6^2\pi$ (mm), de wrijvingskracht is bekend. De pneumatische druk op de cilinders kan dus worden bepaald:

$$P_{cilinder} < \frac{F_w}{2A} \rightarrow 1 [bar] < P_{cilinder} < 3,5 [bar]$$

Dit geldt wanneer de cilinders parallel aan de lengterichting georiënteerd zijn. In werkelijkheid staan de cilinders onder een kleine hoek. Dit is echter bewust als veiligheidsfactor buiten de berekening gelaten. Wat ook uit de berekening is gelaten is dat de veren de cilinders deels tegenwerken.

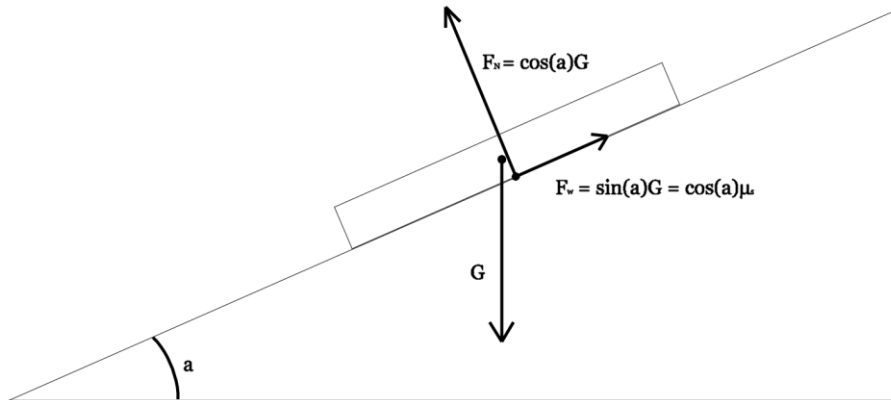
Omdat de druk c.q. de kracht van de cilinders verhoogt tijdens het indrukken, en de trekkracht van de veren juist vermindert, is het belangrijk om toch onder de berekende waarde te blijven. Uit tests blijkt dat het systeem goed werkt bij een druk van 1,7 [bar], wat zich vertaalt naar een cilinderkracht $F_c \approx 20[N]$.

Vergelijking (1) geeft $F_v < 5,2[N]$. Omdat de veren ook de wrijving in de scharnieren moet overbruggen is het verantwoord om veren toe te passen van $F_v \approx 5,2[N]$ in evenwichtstand. In evenwichtstand heeft een veer een lengte van circa 68 [mm]. Het volledige bereik van een veer in dit systeem is 47-78 [mm].

Een trekveer die hiervoor geschikt zou zijn is de E0300-031-1500M van leverancier Amatec. Deze functioneert bij een lengte tussen 38 en 83 [mm] en levert bij 68 [mm] een trekkracht van ~ 5.6 [N]. Uiteindelijk is er echter een vergelijkbaar type veer uit de voorraad van het bedrijf toegepast.

Oriëntatieplatform

Het platform is gemaakt van polycarbonaat (PC). De statische wrijvingscoëfficiënt μ_s van staal op polycarbonaat is ongeveer 0,5. De hoek waarbij het plaatmateriaal over het schuine platform kan worden berekend:



$$G \sin \alpha > G \cos \alpha \cdot \mu_s$$

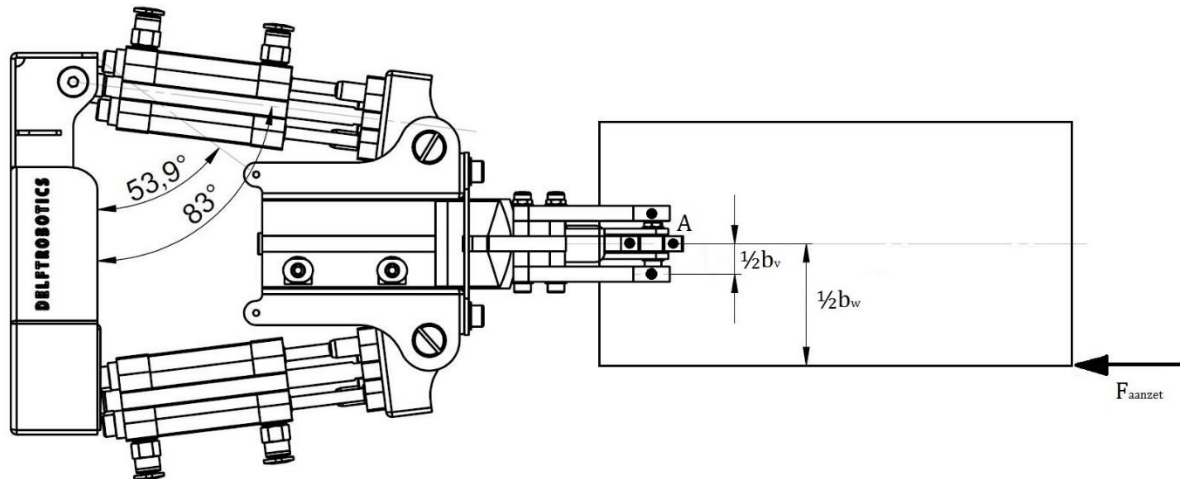
$$\alpha > \tan^{-1} \mu_s$$

$$\mu_s = 0,5 \text{ geeft } \alpha > 26^\circ$$

In theorie zou een helling van meer dan 26° voldoende moeten zijn om het plaatmateriaal tegen de aanzetten aan te laten glijden. Voor de zekerheid is er gekozen om een helling van 30° te gebruiken. Dit is de resultante helling over de diagonaal van het platform. Deze hoek is samengesteld uit twee gelijke hoeken $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{3\sqrt{2}}\right) = 22^\circ$, over de x-richting en de y-richting van het platform.

Rotatie

De wrijvingskracht tussen het plaatmateriaal en de vingers moet er voor zorgen dat het werkstuk niet roteert wanneer het tegen een aanzet wordt geplaatst. Wanneer een plaat schuin tegen een aanzet wordt geplaatst, komt er een kracht (F_{aanzet}) op een hoek van de plaat te staan (zie Figuur 20).



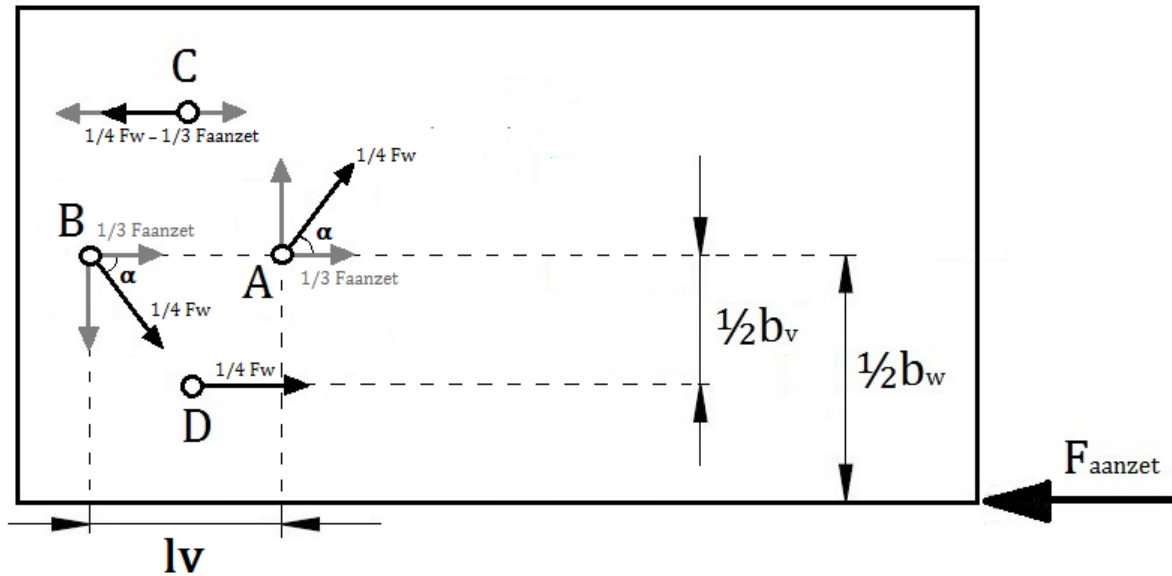
Figuur 20: rotatie tussen de vingers

De aanzet is stationair. F_{aanzet} is dus reactiekracht die bij het aandrukken gelijk aan de resultante kracht van beide cilinders minus de resultante kracht van de vier veren:

$$F_{\text{aanzet}} = 2 \cdot \sin(83) \cdot F_c - 4 \cdot \sin(53,9) \cdot F_v$$

$$F_{\text{aanzet}} = 2 \cdot \sin(83) \cdot 20 - 4 \cdot \sin(53,9) \cdot 5,2 \approx 23[N]$$

Hierdoor ontstaat er een draaimoment om de dichtstbijzijnde vinger, punt A (zie Figuur 21). Elke vinger heeft een maximale wrijvingskracht van $F_w/4 = 20[N]$. Deze wrijvingskrachten worden toegepast op punten A, B, C en D. Het is de bedoeling dat hiermee zowel een krachterevenwicht als een momentevenwicht om draaipunt A ontstaat. Wanneer dit niet het geval is, zal de plaat tussen de vingers slippen.



Figuur 21: Samengestelde reactiekrachten door de wrijving van de vingers

De arm (a_{BA}) van F_B om punt A is afhankelijk van α . Uit $\cos(\alpha) = \frac{\frac{1}{3}F_{aanzet}}{\frac{1}{4}F_w}$ blijkt dat $\alpha \approx 67,5^\circ$.

$$\Sigma F_x = \frac{1}{4}F_w + 2 \cos(\alpha) \frac{1}{4}F_w - \left(\frac{1}{4}F_w + \frac{1}{3}F_{aanzet} \right) - F_{aanzet} = 0$$

$$\Sigma F_y = \sin(\alpha) \frac{1}{4}F_w - \sin(\alpha) \frac{1}{4}F_w = 0$$

Het moment om punt A (M_A) moet in evenwicht zijn:

$$M_A = 0 \text{ wanneer } F_{aanzet} \cdot \frac{1}{2}b_w \leq \frac{1}{2}b_v(F_C + F_D) + l_v \sin(\alpha) F_B.$$

Hiermee kan worden berekend wat de maximale breedte van een plaat mag zijn, zonder dat deze bij schuin aandrukken tegen een aanzet tussen de vingers gaat roteren:

$$b_w \leq \frac{b_v(F_C + F_D) + 2l_v \sin(\alpha) F_B}{F_{aanzet}} \rightarrow b_w \leq \frac{20(12,33 + 20) + 2 \cdot 15 \cdot \sin(67,5) 20}{23}$$

$$b_w \leq 52,2 \text{ [mm]}$$

Deze rotatie tussen de vingers vindt plaats wanneer de hoekafwijking tussen de plaat en de aanzet groter is dan het vrije rotatiebereik van 10° van de ophanging, en de plaat breder is dan 52,2 [mm].

3.8 Pneumatische en elektronische aansluiting

In het ontwerp is een aantal pneumatische hoofdonderdelen toegepast:

Hoekgrijper (DWS-25-A)

Cilinders (ADNGF-12-20-P-A (2x), AND-16-75-A-P-A-Q (1x))

Vacuümgrijper (ESS-20-CS)

Voor de aansluiting en schakeling zijn er echter meer onderdelen nodig. Een compleet overzicht van alle pneumatische onderdelen en aansluitingen is weergegeven in Bijlage D. Hier is te zien dat er gekozen is om drie pneumatische kleppen toe te passen voor het schakelen van de hoofdonderdelen.

Klep 1 (Q2) schakelt de mechanische grijper aan/uit, oftewel dicht en open.

Klep 2 (Q3) schakelt de stand van de drie cilinders aan/uit. Bij een stand staan de cilinders met de mechanische grijper uit, en de cilinder van de vacuümgrijper in. Bij de andere stand juist andersom.

Klep 3 (Q4) schakelt de vacuümgrijper aan/uit. Tussen de klep en de vacuümgrijper zijn een vacuümgenerator en een filter toegepast.

Voor het testen is er gebruik gemaakt van monostabiele 5/2 kleppen omdat deze aanwezig waren. Voor het uiteindelijke ontwerp is het om veiligheidsredenen gewenst om bistabiele kleppen toe te passen.

Er is gekozen om de twee kleppen van de grippers (Q2, Q4) op de end-effector te bevestigen. Dit zorgt ervoor dat er minder pneumatische leidingen langs de robotarm geleid hoeven worden.

Alle kleppen worden elektronisch aangesloten aan de I/O van de UR5. De twee kleppen aan de end-effector worden met een zelf gesoldeerde stekker aangesloten op de tool connector van de UR5. De overgebleven klep die zich bevindt aan de basis van de UR en wordt direct op de I/O kast aangesloten aan een digital output (in dit geval DO4). Een overzicht van de gekozen I/O aansluitingen:

Set Tool 0 on: vacuümgrijper aan

Set Tool 0 off: vacuümgrijper uit

Set Tool 1 on: mechanische grijper open

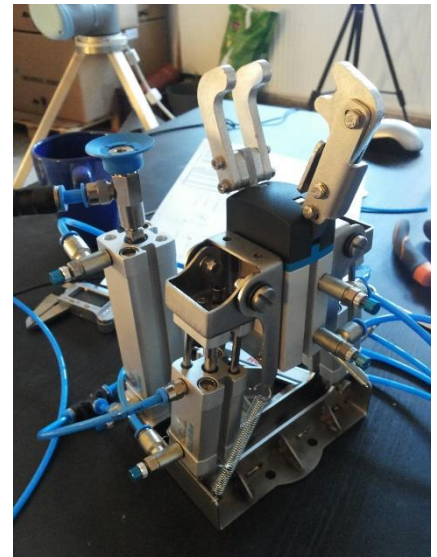
Set Tool 1 off: mechanische grijper dicht

Set DO4 on: vacuüm cilinder uit, mechanische cilinders in

Set DO4 off: vacuüm cilinder in, mechanische cilinders uit

Er zijn twee pressure regulators (R2, R9) toegepast om de druk van de cilinders bij het uitschuiven te beperken. Er zijn ook flow control valves (R3, R4, R5, R6) toegepast om de bewegingssnelheid van bepaalde onderdelen te beperken.

Alle pneumatiek wordt aangesloten via 4mm pneumatische leidingen. Dit is de afmeting die standaard wordt toegepast bij Delft Robotics.



Figuur 22: end-effector

4 Testen

Om de functies van de end-effector te testen is er een testopstelling gemaakt in de Betafactory. Dit is een werkplaats van de Haagse hogeschool waar ook enkele zetbanken aanwezig is. De testopstelling is bij een van deze zetbanken opgesteld.

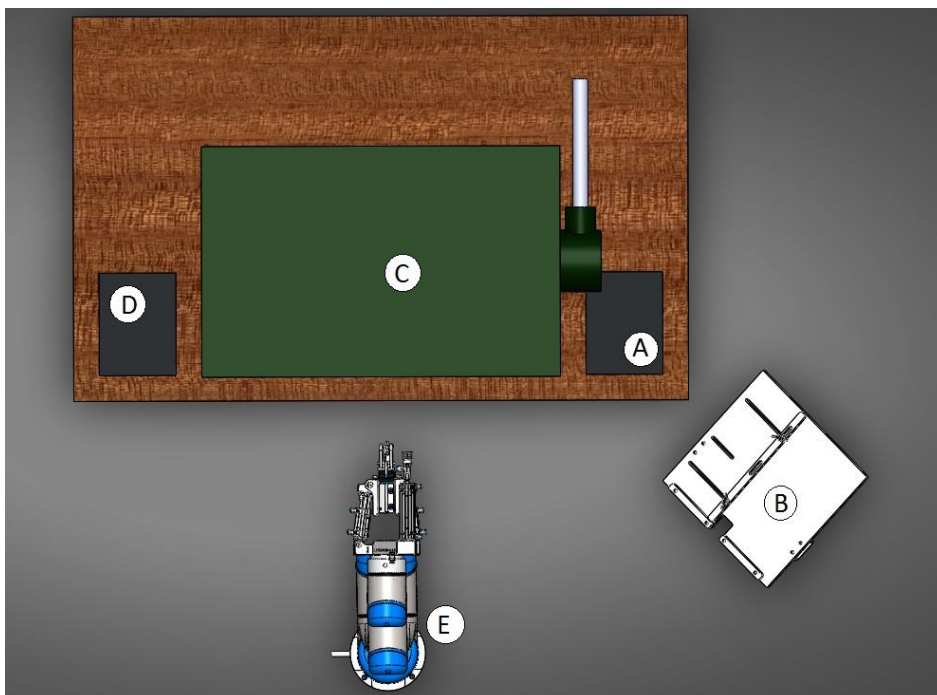
Het doel van de test is om te kijken of het concept van de end-effector, in combinatie met de UR5 en het overpakplatform, werkt. De nadruk is gelegd op:

1. Het oppakken van het plaatmateriaal met de vacuümgreipper vanaf een vaste positie
2. Het overpakken van het plaatmateriaal via het platform
3. Het plaatsen ervan tegen een aanzet van de zetbank
4. Het loslaten voor, en weer vastpakken na een zetbewerking
5. Het wegleggen van het gezette materiaal

4.1 Opstelling

Een overzicht van de testopstelling is te zien in Figuur 23. De zetbank (C) is geplaatst op een tafel in de Betafactory. Het is een kleine zetbank die met de hand wordt aangedreven. De zetbank heeft geen ingebouwde aanzet. Dit is wel vereist voor het testen van het veersysteem. Om deze reden is er een aanzet gesimuleerd door een plaat achter de messen van de zetbank vast te klemmen.

De UR5 met end-effector (E) is recht tegenover de zetbank geplaatst. Bij de test is er geen vision toegepast omdat het enkel bedoeld is om de functies van de end-effector te testen. Het materiaal wordt op een vaste positie (A) op de tafel opgepakt. Het oriëntatiestation (B) bevindt zich aan de rechter zijde van de robot. Het materiaal wordt op een vaste positie (D) op de tafel weggelegd.



Figuur 23: schematisch overzicht van de testopstelling

4.2 Programmastructuur

De robot is geprogrammeerd om een bepaald traject te volgen en om op bepaalde punten in dit traject een bepaalde handeling uit te voeren. Het traject is opgebouwd uit verschillende waypoints. De handelingen en bijbehorende commando's zijn weergegeven in hoofdstuk 3.8. Via de teach pendant wordt de programmastructuur ingevoerd. Het volledige programma van de UR5 tijdens de tests is weergegeven in bijlage F.

4.3 Resultaten

Op- en overpakken

Het overpakken van het materiaal is het eerste gedeelte van het proces dat is getest. Hierbij wordt plaatmateriaal vanaf een vaste locatie op de tafel opgepakt met de vacuümgreipper. Het wordt boven het oriëntatieplatform losgelaten. Hierna glijdt het plaatmateriaal vanzelf naar de juiste locatie om het vervolgens met de mechanische gripper op te pakken.

Er is gebleken dat het overpakken met deze methode erg betrouwbaar is. Bij de tests is het overpakken circa 30 keer uitgevoerd zonder fouten. Uitzondering hierop is wel dat het statief waar het platform zich op bevindt soms per ongeluk is verschoven, waardoor de gripper mis greep. Dit was van tevoren voorzien en bij de uiteindelijke uitvoering van het systeem zal het platform zich op een vaste locatie begeven.

Er is ook gebleken dat het overpakken erg snel kan gebeuren. Tijdens de test is er een tijd van ongeveer 14 seconden gemeten voor het oppakken, plaatsen en overpakken van het plaatmateriaal via het platform. Dit is echter uitgevoerd met de robot op halve snelheid. Hiernaast volgde de robot een pad dat niet geoptimaliseerd was. Verwacht wordt dat het overpakken in 7 seconden zonder veel moeite gerealiseerd kan worden.

Plaatsen

Het werkstuk wordt met de mechanische gripper tegen de aanzet geplaatst. Tijdens dit proces wordt het veersysteem getest. Het is belangrijk dat het werkstuk automatisch recht tegen de aanzet wordt gedrukt m.b.v. het veersysteem, ook als de aanzet scheef benaderd wordt.

Uit de test is gebleken dat het werkstuk in alle instanties recht tegen de aanzet wordt gedrukt, ondanks dat het veersysteem niet altijd werkte zoals verwacht: In sommige gevallen bleef bij het indrukken een van de cilinders haken, waardoor de end-effector scheef verder ging met als gevolg dat het werkstuk ging roteren tussen de vingers. Het werkstuk bleef in deze gevallen wel recht tegen de aanzet gepositioneerd. Voor bewerkingen met een enkele zetbewerking is dit dus niet van invloed. Wanneer er meerdere zetbewerkingen moeten worden uitgevoerd is het echter onwenselijk omdat het voor opstapelende onnauwkeurigheden kan zorgen.

Het zetten van het plaatmateriaal gaat met de handmatige zetbank niet in een soepele beweging. Om deze reden is er gekozen om het materiaal tijdens het zetten los te laten, en het vervolgens op te pakken wanneer de zet klaar is.

Het geautomatiseerd uitvoeren van meerdere zetbewerkingen op en enkel werkstuk is nog niet getest. Dit komt omdat de geïmproviseerde aanzet dit verhinderde en niet eenvoudig verschoven kon worden. Hiernaast was het nog niet mogelijk om een gezet werkstuk over te pakken.

Dubbele aanzet

Er is ook gebleken dat het werkstuk tegen een dubbele aanzet, zowel in zijwaartse als voorwaartse richting, geplaatst kan worden. Dit bleek te werken wanneer de plaat eerst tegen de zijaanzet aan werd geduwd, en vervolgens naar achteren tegen de achterste aanzet werd gedrukt. De end-effector heeft een zijwaarts spelingsbereik van circa 15 [mm].

Force mode

De mogelijkheid voor het gebruiken van force mode van de UR om het plaatmateriaal vast te houden tijdens een zetbewerking is ook onderzocht. De robot is ingesteld op force mode om je y-as van de tool-coördinaten, terwijl het een plaat vasthield met de mechanische grijper. Vervolgens is er gekeken of door het roteren van de plaat, zoals bij een zetbewerking, de arm mee zou bewegen. Het is uiteindelijk gelukt om op deze manier de arm te roteren. Hierbij was het wel belangrijk de instellingen zoals afstand t.o.v. het draaipunt en de oriëntatie, de massa en het massa middelpunt van de end-effector goed waren ingevoerd. Tijdens deze test is het echter wel vaak voorgekomen dat de arm overging in protective stop. Dit is een error die voor komt wanneer er te veel kracht op de arm wordt uitgeoefend, waarbij de arm stopt en zich afsluit.

Complexe zetbewerkingen

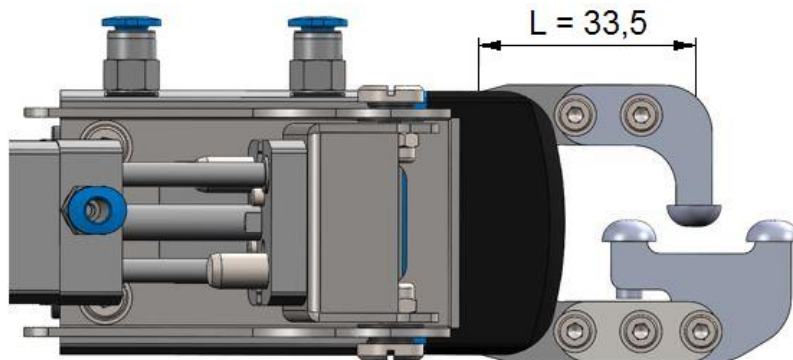
Helaas is het niet mogelijk geweest om te testen hoe complex de werkstukken kunnen zijn die worden behandeld met dit ontwerp. Dit komt vooral door gebrek aan materieel en tijd. Dit kan het beste getest worden met een automatische zetbank met automatische aanzetten. Hiernaast is er een overpakstation nodig voor bepaalde handelingen die nodig zijn bij complexere werkstukken, zoals het overpakken van een werkstuk onder een bepaalde hoek.

5 Verbeteringen

Na het uitvoeren van de tests is er een aantal verbeteringen toegevoegd aan het ontwerp.

5.1 Vinger ontwerp

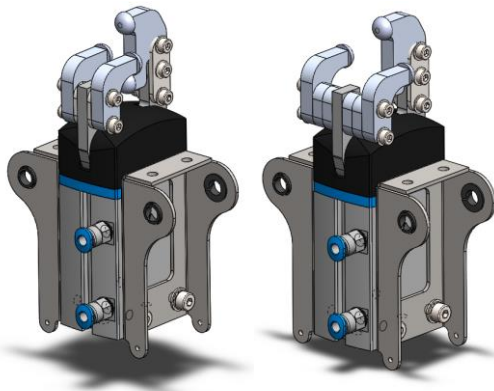
Het ontwerp van de vingers is aangepast voor betere functionaliteit. Om meer kracht over te kunnen brengen is de gemiddelde lengte van de vingers verkort van gemiddeld 57,2 [mm] naar 33,5 [mm]. Hierdoor is de totale wrijvingskracht F_w tussen de grippers verhoogd van 80 [N] naar 137 [N]. Dit zal de grip van de vingers aanzienlijk versterken en zal het werkstuk minder snel glijden tussen de vingers.



Figuur 24: Verbeterde vingers (1)

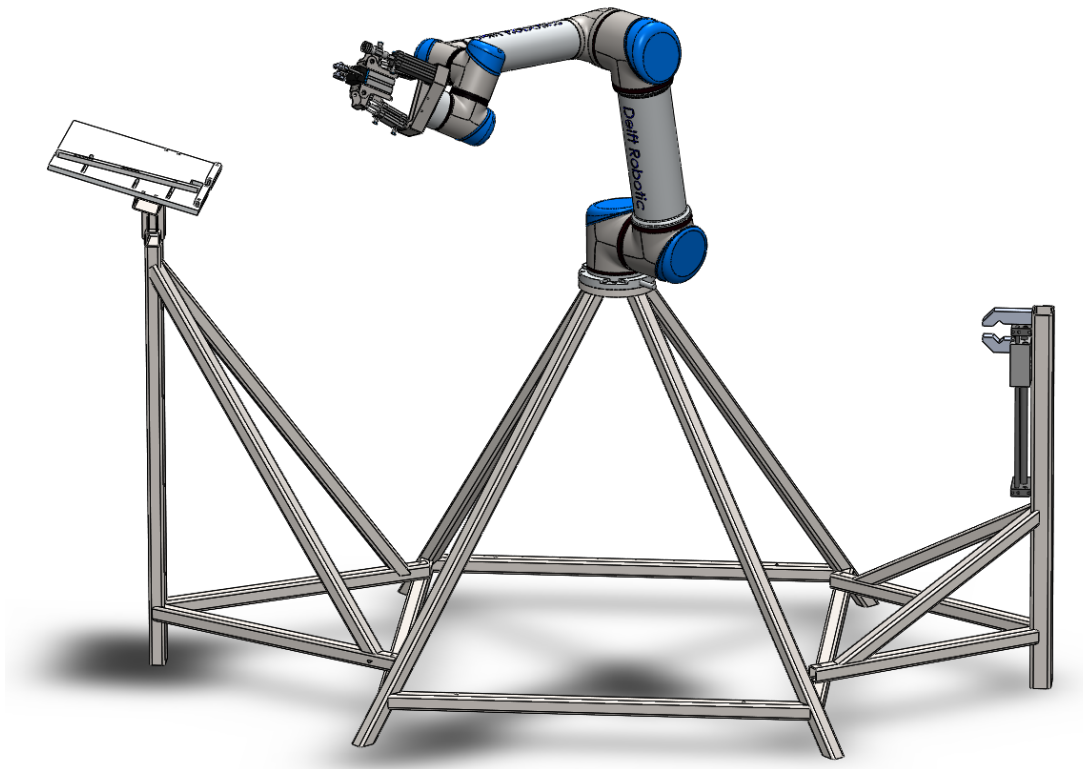
Ook zijn er silicone toppen geïntegreerd op de vingers. Voorheen waren er stukken rubber om de grippers heen gelijmd. Deze silicone bollen kunnen eenvoudig vervangen worden.

Om rotatie van het werkstuk tussen de vingers verder tegen te gaan is het ook wenselijk dat het werkstuk zo breed mogelijk wordt opgepakt. Om deze reden is het handig om de breedte van de vingers in te kunnen stellen. Dit is mogelijk door meer dunnere afstandsplaatjes toe te passen.



Figuur 25: verbeterde vingers (2)

Hiermee kan de breedte van beide vingers aan de zijkant worden aangepast door het aantal afstandsplaatjes dat wordt toegepast. Wanneer het belangrijk is dat het materiaal niet roteert tussen de vingers, kan de breedte van de vingers kan afhankelijk van de breedte van het werkstuk volgens de volgende formule worden opgesteld: $b_v \geq \frac{b_w F_{aanzet} - 2l_v \sin(\alpha) F_B}{F_C + F_D} \rightarrow b_v \geq \frac{b_w - 41,3}{60,8}$.



Figuur 26: Volledig automatiseringssysteem

5.2 Overpakgrijper

Overpakken kan via zetbank voor 180° rotatie op z-as. Voor 90-180° rotatie op de y-as is een extra hulpmiddel nodig. Hiervoor kan een parallelgrijper worden gebruikt. De plaat kan op twee manieren worden overgepakt m.b.v. de parallelgrijper. De plaat kan vlak tussen de vingers van de grijper worden geplaatst, en vervolgens onder een andere hoek worden overgepakt. De plaat kan ook aan een kant tussen de inkeping worden geplaatst, en vervolgens aan de andere worden overgepakt. Voordeel hierbij is dat de plaat opnieuw wordt uitgelijnd.

5.3 Frame

Er is een frame ontworpen voor het gehele automatiseringssysteem. De UR5 is centraal gelokaliseerd in de opstelling. Het staat op een piramidevormig frame met vier poten dat is opgebouwd uit gelaste vierkante holle stalen buizen van 30 [mm]. Het platform en de overpakgrijper hebben vergelijkbare driehoekige frames die aangekoppeld kunnen worden aan de zijdes van het centrale frame. Op deze manier kan de opstelling op verschillende manieren worden opgebouwd naast een automatische zetbank. De robotarm staat centraal, en het platform en de overpakgrijper bevinden zich op vaste locaties om de robotarm heen. De opstelling kan ook eenvoudig weer worden afgebroken of verplaatst.

6 Verwachtingen

In Tabel 2 zijn de verwachte prestaties van het geautomatiseerde systeem met de end-effector weergegeven. Ook zijn de geschatte prestaties van een menselijke operator vermeld.

		Geautomatiseerd systeem	Menselijke operator
Insteltijd (t_i)		10-30 minuten	1-3 minuten
Operatietijd (t_o)	Oppakken	2 [s]	1 [s]
	Oriënteren	5 [s]	2 [s]
	Plaatsen	3 [s]	2 [s]
	Zetten	2 [s]	2 [s]
	Heroriënteren	2-10 [s]	1-3 [s]
	Plaatsen	3 [s]	2 [s]
	Zetten	2 [s]	2 [s]
	Wegleggen	4 [s]	2 [s]
	<i>Gemiddeld</i>	27 [s] / product	15 [s] / product
Effectieve beschikbaarheid		12 uur / dag	6 uur / dag
Bezettingsgraad (b)		10-50%	100%

Tabel 2: verwachte prestaties van het geautomatiseerde systeem t.o.v. een menselijke operator

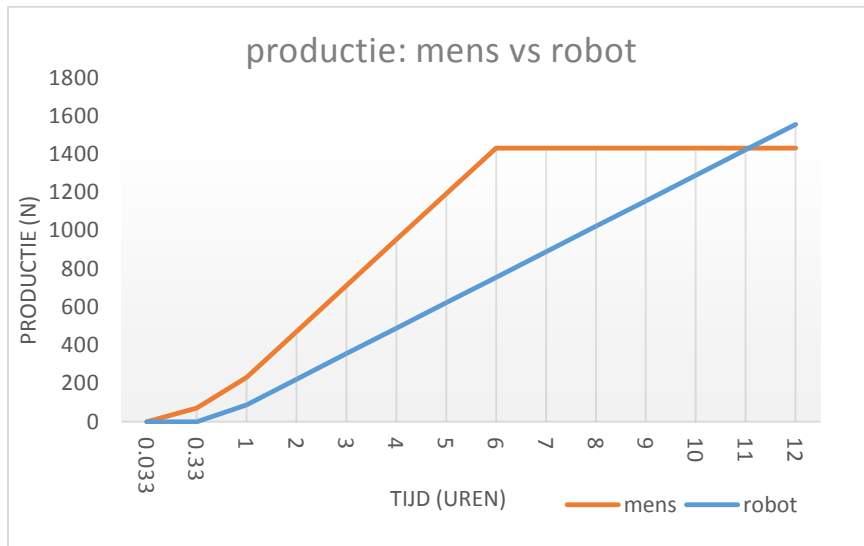
Er wordt verwacht dat een ervaren operator, afhankelijk van de complexiteit van het eindproduct, binnen 10 en 30 minuten de robot kan programmeren. Deze programma's kunnen worden opgeslagen zodat deze bij herhaalorders opnieuw kan worden gebruikt.

De operatietijd (t_o) per werkstuk is ook afhankelijk van het aantal zetsbewerkingen van het product. Bij de gemiddelde operatietijd is er uitgegaan van twee zetsbewerkingen.

Verwacht wordt dat een mens per dag maximaal 6 uur effectief zetsbewerkingen kan uitvoeren. Een robot kan waarschijnlijk zo'n 12 uur zetsbewerkingen uitvoeren. Dit komt omdat er een operator een deel van de tijd aanwezig moet zijn bij de robot om materiaal aan te voeren en voltooide producten af te voeren, en om eventuele errors te verhelpen.

Met de data uit Tabel 2 kan er een productieverwachting worden opgesteld voor een werkdag van 12 uur. In Figuur 27 is een voorbeeld gegeven van de productie van één type werkstuk, met twee zetbewerkingen en een gemiddelde insteltijd (2 minuten voor de mens en 20 minuten voor de robot). De functies voor de formule zijn opgesteld met de data uit Tabel 2. De gebruikte formules zijn:

$$P_{mens} = \left(t - \frac{2}{60}\right) \left(\frac{3600}{15}\right), \quad P_{robot} = \left(t - \frac{20}{60}\right) \left(\frac{3600}{27}\right)$$



Figuur 27: maximale productie van mens t.o.v. robot

Hierbij wordt de mens echter als een soort robot beschouwd. In werkelijkheid is de productie van een menselijke operator niet constant. Een operator wordt moe, waardoor de productie omlaag gaat. Ook neemt een operator tussendoor pauzes. Er kan ook niet verwacht worden dat de robot zonder problemen 12 uur draait. Er kunnen bijvoorbeeld errors optreden. In beide gevallen zal de werkelijke productie lager zijn.

Er kan worden geconcludeerd dat de geautomatiseerde oplossing minder snel is dan de mens. De robot kan echter wel langer en constanter produceren, waardoor een vergelijkbare productiecapaciteit per dag kan worden bereikt.

De werklast van de operator wordt verminderd. Het uitvoeren van zetbewerkingen is bij grote orders een zware taak. Met de geautomatiseerde oplossing hoeft de operator de robot eenmalig in te stellen, en een klein deel van de tijd materiaal aan- en af te voeren. In de tussentijd kan de operator zich met andere taken bezig houden.

6.2 Kostenoverzicht

Hoofdonderdeel	Subonderdeel	Kosten
End-effector	RVS plaatwerk	€300,-
	Aluminium onderdelen	€50,-
	Pneumatiek	€500,-
	Bevestigingsonderdelen	€50,-
	subtotaal	€900,-
Platform	Frame	€150,-*
	Platform	€100,-*
Overpakgrijper	Frame	€150,-*
	Grijper	€100,-*
Aansturing		€500,-*
Hoofdframe		€250,-*
Universal Robot 5		€25.000,-
Totaal		€27.150,-
Verwachte verkoopprijs		€50.000,-

Tabel 3: kostenoverzicht

*schatting

De losse onderdelen van het systeem kosten bij elkaar zo'n €27.00,-. Het overgrote deel hiervan is afkomstig van de prijs van de UR5 robot. Wanneer we hierbij ontwikkelingskosten en een winstmarge optellen is de verwachte prijs voor het gehele systeem voor een klant zo'n €50.000,-.

Het voordeel van het gebruik van de robot is dat het voor het grootste deel van de tijd onbemand kan produceren. Er wordt ervan uitgegaan dat een operator naast de insteltijd van 10-30 minuten, ook bij elke 50 gezette werkstukken 3 minuten besteedt aan het aanleveren en afhalen van materialen.

De bezettingsgraad van een operator (b) van het systeem tijdens een serie kan worden uitgerekend als functie van insteltijd (t_i) in minuten, seriegrootte (n) en operatietijd (t_o) in minuten van een werkstuk:

$$b = \frac{\frac{n}{50} \cdot 3 + t_i}{\frac{n \cdot t_o}{60}}$$

Bij Het gekozen voorbeeld in Figuur 27 is de bezettingsgraad (b) bijvoorbeeld 16%. Dit betekent dat de operator in dit geval 84% van de tijd andere werkzaamheden kan verrichten.

Wanneer ervan uit wordt gegaan wordt dat de productie ongeveer twee keer langer duurt met de robot, kan er gezegd worden dat de robot voor $1 - 2b = 68\%$ de mens vervangt. Dit betekent ook dat de operatiekosten in dit geval grofweg zo'n 68% lager zijn dan met een menselijke operator.

Er kan berekend worden hoe lang het ongeveer duurt om de investering van de automatiseringsoplossing terug te verdienen. Dit kan door de bespaarde manuren uit te drukken in bespaarde salariskosten: $(1 - 2b) \cdot k_o$

De terugverdiëntijd is gelijk aan de investeringskosten (k_{invest}) gedeeld door de jaarlijks bespaarde salariskosten

$$t_{tv} = \frac{k_{invest}}{(1 - 2b) \cdot k_o}$$

Het jaarlijkse salaris van een operator (k_o) is zo'n €16800,-. Voor de investeringskosten (k_i) wordt €50.000,- genomen. De terugverdiëntijd van het systeem bij verschillende seriegroottes en productie uren per week is weergegeven in Tabel 4. Hierbij is er uitgegaan van de gemiddelde operatietijd (t_o) die is genoemd in Tabel 2.

Terugverdiëntijd in jaren						
		Gemiddelde seriegrootte				
		100	200	500	1000	5000
Gemiddelde productietijd (uren/week)	20	30,9	17,5	13,8	12,9	12,3
	40	15,4	8,7	6,9	6,5	6,1
	60	10,3	5,8	4,6	4,3	4,1

Tabel 4: terugverdiëntijd bij verschillende gemiddelde seriegroottes en productietijden

Hieruit blijkt dat het systeem vooral loont wanneer het met hoge regelmaat gebruikt wordt.

Conclusie

Uit de locatietest is de werking van de ontwikkelde end-effector bewezen. Deze eerste stap van het proces verloopt snel en betrouwbaar. Verwacht wordt dat deze stap binnen 7 seconden kan worden uitgevoerd. Er wordt geadviseerd om bij de uiteindelijke uitvoering het platform op een vaste locatie van de robot te plaatsen.

Het veersysteem van de mechanische grijper functioneerde naar verwachting. Het plaatmateriaal werd hierdoor altijd recht tegenover de enkele aanzet geplaatst. Later is het systeem ook succesvol tegenover een dubbele aanzet getest: Het plaatmateriaal kan tegen twee aanzetten tegelijk worden geplaatst met een speling van 20 [mm] voorwaarts en 15 [mm] zijwaarts.

Het is mogelijk om de plaat voor het zetten los te laten, en na het zetten weer vast te pakken uit de zetbank. Het is ook mogelijk om het werkstuk vast te houden tijdens de zetbewerking, en mee te bewegen met het werkstuk door gebruik te maken van force mode. Er zal hieraan echter wel extra aandacht moeten worden besteed om deze methode storingvrij te maken.

De betrouwbaarheid van de het systeem is onbekend. Er wordt aangeraden om het systeem met zo veel mogelijk verschillende zetbewerking (beschreven in bijlage B) zo vaak mogelijk te testen bij een automatische zetbank. Hieruit zal blijken hoe betrouwbaar het systeem is en waar de grenzen aan werkstukcomplexiteit zich bevinden.

De geautomatiseerde oplossing is wat betreft productiesnelheid niet sneller dan de mens. Verwacht wordt dat het ongeveer de helft van de snelheid van een mens haalt. De robot kan echter wel langer en constanter produceren, waardoor een vergelijkbare productiecapaciteit per dag kan worden bereikt. De werklast van een operator wordt hierdoor verminderd. Een bedrijf geeft zich met dit geautomatiseerde systeem de mogelijkheid om grotere orders aan te kunnen nemen. Het systeem vervangt voor een groot deel de operator van de zetbank. De financiële winst van het systeem wordt vooral uitgedrukt in besparing op kosten van operators. De terugverdientijd van de investeringskosten van een dergelijk systeem is sterk afhankelijk van de gebruiksintensiteit ervan.

Reflectie

Tijdens het ontwerpproces heb ik me verkeken op een aantal zaken. Ten eerste is het niet gelukt om twee prototypen te vervaardigen. Dit was wel de bedoeling bij aanvang van de stage (stagewerkplan). Het ontwerpproces duurde langer dan verwacht, en op een bepaald moment is er besloten om het liever in een keer zo goed mogelijk te doen. Tijdens het ontwerpen heb ik verschillende berekeningen gemaakt. Ik heb echter geen rekening gehouden met de rotatie van een plaat tussen de vingers, met als gevolg dat platen met een grote lengte soms tussen de vingers roteerden wanneer ze tegen de aanzet werden geplaatst. Ik verwacht echter wel dat dit met het aangepaste ontwerp van de vingers kan worden opgelost.

Ik heb ervaring opgedaan als onderzoeker tijdens het vooronderzoek, en als ontwerper tijdens de ontwerpfase van de stage. Door het ontwikkelen van dit product van begin tot eind heb ik ook nieuwe vaardigheden geleerd, onder andere het werken met Solidworks, solderen, ontwikkelen en vervaardigen van complexe pneumatische systemen en programmeren met de UR.

Hoewel de opdracht niet geheel volgens de planning is verlopen, ben ik tevreden met het resultaat. De werking van het concept van de ontworpen end-effector is succesvol getest. Het is gelukt om met de end-effector simpele werkstukken met een enkele zetsbewerking automatisch te zetten. De betrouwbaarheid en de grenzen aan complexiteit van de bewerkingen zijn nog onbekend. Ik heb er vertrouwen in dat een systeem met een deze end-effector tot een succesvolle automatiseringsoplossing kan leiden.

Literatuur

Bron	Type	Locatie
GUPTA, A. K. & ARORA, S. K. 2007. Industrial automation and robotics, hoofdstuk 15	Boek	Vooronderzoek
LETANG, P. K. 2012. Justifying a robotic press brake. The Fabricator april 2012.	Artikel	Vooronderzoek
RUSH, J. Leaping the hurdles to press brake automation. The Fabricator januari 1999.	Artikel	Vooronderzoek
BORSBOOM, J. N. & RAAIJMAKERS, H. L. M. 2007. Geautomatiseerd buigen, Tech-Info-Blad nr.TI.07.38 december 2007	Artikel	Vooronderzoek

Bijlage A: Vooronderzoek

Concurrentieanalyse

Het doel van de concurrentieanalyse is om te onderzoeken waar de kansen liggen voor een nieuwe end-effector. Dit gebeurt door de krachten en zwaktes te analyseren van de zetsbewerkingsmethodes en automatiseringsoplossingen die hierbij momenteel worden toegepast. Deze methodes worden globaal in kaart gebracht middels een analyse uitgevoerd op het internet. Hierbij zal een overzicht gemaakt worden van de eigenschappen voor verschillende zetsbewerkingsmethodes.

Handmatig zetten

Handmatige bediening van een zetbank komt nog vaak voor. In bijna elke werkplaats is wel een handzetbank of een automatische zetbank aanwezig. Het materiaal wordt hierbij door een werknemer met eigen handen begeleid. Dit wordt in westerse landen voornamelijk toegepast bij productie van enkelstuksproductie of bij kleine orders. Dit komt omdat er met de hand geen of zeer geringe insteltijd nodig is. Handmatig zetten is daarom een zeer flexibel productieproces. Voor de werknemer is het echter onverantwoord om grote aantallen producten achter elkaar te zetten. Dit is zeer repetitief werk en tevens komt de veiligheid van de werknemer in het geding. Ook kan er met de hand een beperkt groottebereik aan werkstukken worden behandeld.

Machinaal zetten

Vaak worden er grote zetmachines gebruikt wanneer producten die op grote schaal geproduceerd worden. Deze machines voeren vaak in serie ook andere bewerkingen zoals nibbelen uit. Dit leidt tot een extreem lage stukprijs per product. Hiervoor is echter een zeer grote investering vereist. Hiernaast kan zo'n machine vaak maar een product of productfamilie produceren. Voor het veranderen van product is een zeer grote omsteltijd nodig. Er is hier dus sprake van een zeer lage productieflexibiliteit.

Articulated robot handling

De articulated robot wordt steeds vaker ingezet om handlingtaken uit te voeren bij conventionele productieprocessen. Dit gebeurt sinds een aantal jaar ook bij zetsbewerkingen. Het plaatmateriaal wordt gestapeld en gesorteerd aangeleverd in het aanleverstation dat zich bevindt in het werkgebied van de robot. De robot pakt het plaatmateriaal op met de end-effector die doorgaans gebruik maakt van een of meerdere zuignappen, afhankelijk van de grootte en het gewicht van het werkstuk. Doordat hiermee slechts een beperkte nauwkeurigheid bereikt kan worden, wordt het werkstuk tussendoor in een oriëntatiestation geplaatst en weer opgepakt. Wanneer er een nieuw product gemaakt wordt, is het soms nodig om een of beide stations aan te passen. Om deze reden is de productieflexibiliteit matig. Hiernaast is de toepassing van een articulated robot dankzij de noodzakelijke insteltijd pas effectief bij ordergroottes van meer dan ~50 stuks¹ of bij herhaalorders. De investeringskosten zijn in principe alleen de prijs van de robotarm en end-effector in het geval dat er al een automatische zetbank aanwezig is.

Productiecel

Er zijn verschillende uitvoeringen van het productiecelprincipe in verband met zetsbewerkingen. In sommige gevallen wordt een hybride cel toegepast. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van een articulated robotarm op een rails, samen met een zetbank in een afgebakende ruimte. De robot

¹ RUSH, J. Leaping the hurdles to press brake automation. The Fabricator januari 1999.

maakt gebruik van een elektrische rotatiegrijper om zowel de werkstukken te begeleiden als de gereedschappen op de zetbank te verwisselen.

Bij een andere uitvoering van het productiecelprincipe wordt het plaatmateriaal op rollers aangevoerd en opgepakt met een SCARA robotarm met een zuignap end-effector. Het werkstuk kan hierbij slechts om een enkele as geroteerd worden, wat resulteert in beperkte productcomplexiteit.

Beide uitvoeringen van de productiecel bevatten geïntegreerde oriëntatiesystemen (al dan niet ondersteund door gebruik van visiontechnologie) en een automatische aanzet gesitueerd achter het zetgereedschap. Dit zorgt voor grote productieflexibiliteit. De investeringskosten voor een productiecel zijn echter zeer hoog.

Overzicht

In Tabel 5 zijn de kenmerken van de verschillende zetsbewerkingsmethodes uiteengezet.

Handling	Handmatig	Machinaal	Articulated robot	productiecel
Robottype	-	Machine	Articulated robot fixed	-Articulated robot op rails -Machine met rollers en SCARA arm
Grijpertype	-	-	-Zuignap	-Zuignap -Angular electric
Assistentie	-	-	-Aanleverstation -Oriëntatiestation -evt. overpakstation	-Aanleverstation -Oriëntatiestation -Automatische aanzet -Vision support
Complexiteit	Eenvoudig-complex	Eenvoudig-complex	Eenvoudig-complex	Eenvoudig-complex
Omsteltijd	Seconden / minuten	Dagen / weken	10 minuten tot 1 uur	10 minuten tot 1 uur
Werkstuk grootte	0,4-50 dm ²	0,4-300 dm ²	1,5-150 dm ²	1,0-150 dm ²
Ordergrootte	< 100	5000 – 100.000+	100 – 10.000	100 – 10.000
Aanlevering materiaal	Ongeordend	Geordend	Geordend	Geordend
Investering	Laag	Zeer hoog	Hoog/gemiddeld	Zeer hoog

Tabel 5: Eigenschappen van verschillende toegepaste zetsbewerkingsmethodes

In dit overzicht is te zien dat er momenteel geen automatiseringsoplossing wordt toegepast waarbij kleine zetproducten in grote getalen flexibel kunnen worden geproduceerd, zonder dat daar een zeer grote investering mee gepaard gaat. Dit is het segment waar het nieuwe product kans maakt om te slagen.

Toepassingsmogelijkheden

Het is belangrijk dat er voor de nieuwe end-effector een bijpassende doelgroep bestaat. Dit zijn bedrijven met een vraag naar het product, die tevens de middelen hebben om het te faciliteren.

Vraag

De vraag naar een product dat ondersteuning kan geven bij het op grote schaal uitvoeren van zetsbewerking van kleine metalen werkstukken zal vooral aanwezig zijn bij bedrijven die momenteel dit soort bewerkingen met de hand uitvoeren. Dit zijn metaalbewerkings- en productiebedrijven die grote orders of herhaalorders verwerken, of producten in grote oplagen produceren.

Middelen

Mocht het bedrijf behoefte hebben aan het product, zal het ook over de juiste middelen moeten beschikken om het product te kunnen faciliteren. Dit betekent dat het desbetreffende bedrijf de mogelijkheid moeten hebben om te investeren in het product. De end-effector zelf zal geen grote investering zijn. De end-effector werkt echter alleen in combinatie met een automatische zetbank en een robotarm. Dit zijn beide grote investeringen. De meeste metaalbewerkings- en productiebedrijven beschikken echter wel een automatische zetbank.

Doelgroep profiel

Metaalbewerkings- en productiebedrijven die:

- op grote schaal zetsbewerkingen (willen) uitvoeren met klein en gemiddeld plaatmateriaal;
- beschikken over een automatische zetbank, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren;
- beschikken over een articulated robotarm, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren.

Na een kort onderzoek is gebleken dat er in Nederland enkele tientallen bedrijven zijn die zich binnen deze begrenzings kunnen bevinden. Er wordt geschat dat er in Nederland tenminste acht bedrijven zijn die daadwerkelijk binnen dit profiel vallen. Deze inschatting is tot stand gekomen door te kijken naar de kernactiviteiten en middelen van de bedrijven en deze te vergelijken met het doelgroep profiel. De volledige lijst van gevonden bedrijven is te vinden in (Tabel 6).

Bedrijf	Kans
Scheuter barneveld BV	***
OBS Constructie	***
Wemo	***
ITEQ Industries	***
Metalco de Leye BV	***
Heurkens & van Veluw	***
Hoekman	***
MCM Marknesse	***
Vecomach	**
Brink Industrial	**
Goburg	**
Hopcon	**
Van den Brink	**
Holleman	**
Willems machinebouw	**
Mennes	*
Zanting RVS	*
Douna	*
Scholtus	*
Lurvink BV	*
Spirado	*
Giezenman	*
Metaalbewerking Noord BV	*
FTD metaaltechniek	*
Verbraak	*

Tabel 6: Lijst van bedrijven en inschatting van kans op voldoening aan het doelgroep profiel

Technologische mogelijkheden

Er worden verschillende grijpertechnieken en robottypen besproken om te kijken welke hiervan toepasbaar zijn voor het grijpersysteem. De kenmerken en eigenschappen hiervan worden doorgenomen en er wordt gekeken of de toepassing hiervan realistisch is.

Robotarm

Er zijn veel verschillende typen robotarmen voor verschillende toepassingen. Ze bestaan uit verschillende combinaties van armen, rotatieassen (R) en translatieassen (T). In Tabel 7 staat een overzicht van de meest gebruikte robots.

Type	Assen	Veelvoorkomende toepassingen
Cartesian Robot	3T	Transport, handling, inpakken
Cylindrical Robot	RTT	Assemblage, handling, puntlassen
SCARA Robot	RRT	Montage
Articulated robot	6R	Vrijwel alle toepassingen
Delta Robot	3R	Handling

Tabel 7: Overzicht van veel voorkomende robottypen

Het begeleiden van een verscheidenheid aan werkstukken bij zetsbewerkingen vereist een behendige en nauwkeurige robotarm. Het werkstuk moet met verschillende oriëntaties in de zetbank kunnen worden geplaatst. Ook moet de arm meebewegen met het plaatmateriaal wanneer dit ingedrukt wordt.

Het enige robotarmtype dat hieraan voldoet is de articulated robot. Dit is een verzamelnaam voor robotarmen met zes rotatieassen. Evenals een menselijke arm bevinden zich de eerste twee rotatieassen bevinden zich dicht bij elkaar en vormen het schoudergewricht, de laatste drie rotatieassen bevinden zich ook dicht bij elkaar en vormen het polsgewricht. Hiertussen bevinden zich twee assen met ongeveer gelijke lengte en in het midden een rotatie-as (elleboog). Het resultaat hiervan is een grote *dexterous workspace*. Dit is het werkgebied waarin de robot onder alle oriëntaties een punt kan bereiken met het uiteinde van zijn arm. Afhankelijk van de taak van de robot kan er een grote verscheidenheid aan end-effectoren worden bevestigd aan het uiteinde van de arm.

Een articulated robot die vaak wordt toegepast is de Universal Robot. Zoals de naam suggereert kan de robot voor veel verschillende automatiseringstoepassingen worden ingezet. Er bestaan verschillende uitvoeringen van deze robots met verschillende armlengten en laadvermogens.

Grijpertechnieken

Voor het oppakken en begeleiden van het plaatmateriaal tijdens het zetproces zullen een of meerdere grippers worden toegepast. De meest voorkomende grijpertechnieken² zijn:

- vingergrippers
- mechanische grippers
- zuignappen
- magnetische grippers

Vingergrippers worden aangestuurd door een cilinder. De cilinder is verbonden aan twee of meer scharnierende vingers. Wanneer de cilinder in en uitschuift bewegen de vingers naar elkaar toe of van elkaar af. De vingers kunnen parallel en of onder een hoek vastgrijpen.

Mechanische grippers kunnen op verschillende manieren worden aangedreven en worden meestal parallel uitgevoerd. Pneumatische aandrijving biedt een hoge grijsnelheid en redelijke grijpkracht. Bij pneumatische aansturing kan echter slechts een klein grijsbereik worden toegepast. Ook kan de grijsbeweging niet worden gecontroleerd.

Elektrische grippers worden steeds vaker toegepast, vaak bij handelingen die hoge grijsnelheid, een groot grijsbereik en lage grijpkracht vereisen. Hiernaast kan een elektrische grijsper eenvoudig gestuurd en gecontroleerd worden bij aanwezigheid van een stappenmotor. Een nadeel is wel dat elektrische grippers relatief zwaar zijn.

Hydraulische aandrijving wordt vaak toegepast wanneer er grote grijpkracht gewenst is. Hydrauliek is echter een relatief dure oplossing die ook veel onderhoud vereist. Hiernaast vereist dit een hydraulische pomp die in de meeste werkplaatsen niet aanwezig zijn, in tegenstelling tot perslucht of elektriciteit.

Zuignappen worden toegepast bij het oppakken van werkstukken met vlakke onderdelen. Afhankelijk van de grootte c.q. het gewicht van het werkstuk kunnen er een of meerdere zuignappen worden toegepast. De zuignappen kunnen al dan niet worden bediend door een vacuümpomp.

Magnetische grippers worden tevens toegepast bij het oppakken van werkstukken met vlakke onderdelen. Een voordeel van magnetische grippers ten opzichte van zuignappen is dat het werkstukken met gaten op kan pakken. Een nadeel ten opzichte van zuignappen is dat magnetische grippers niet toepasbaar zijn bij niet-magnetische werkstukken, zoals RVS en aluminium.

Magnetische grippers kunnen met elektromagneten worden uitgevoerd. Op deze manier kan het magnetisme elektrisch maar ook pneumatisch geschakeld worden. Permanente magneten kunnen ook worden toegepast. Voor het loslaten van het werkstuk wordt dan veelal een uitduwpin gebruikt.

Een of meerdere van deze grijpertechnieken zullen worden toegepast op de end-effector.

² GUPTA, A. K. & ARORA, S. K. 2007. Industrial automation and robotics, chapter 15

Uitkomst van het vooronderzoek

Momenteel worden er nog geen automatiseringsoplossing toegepast waarbij kleine zetproducten in grote getalen flexibel kunnen worden geproduceerd, zonder dat daar een zeer grote investering mee gepaard gaat. Dit is het segment waar het nieuwe product kans maakt om te slagen.

Het grijpersysteem zal het dus mogelijk moeten maken om op grote schaal en op flexibele wijze zetbewerkingen uit te voeren zonder dat daar een grote investering bij komt kijken.

Potentiele bedrijven die voordeel kunnen hebben van dit product zijn metaalbewerkings- en productiebedrijven die:

- op grote schaal zetbewerkingen (willen) uitvoeren met klein en gemiddeld plaatmateriaal;
- beschikken over een automatische zetbank, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren;
- beschikken over een articulated robotarm, of de middelen en bereidheid hebben om hierin te investeren.

Verwacht wordt dat er in Nederland tenminste tien bedrijven voldoet aan dit profiel.

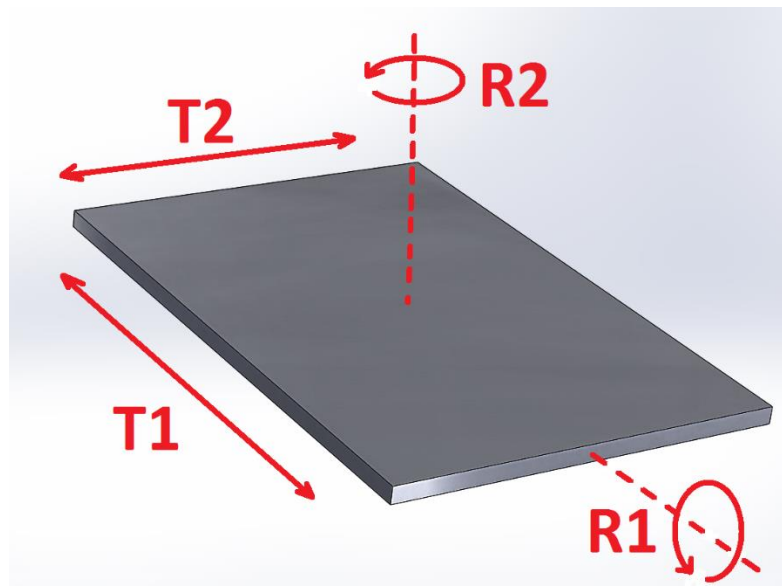
Het mechanische deel van het grijpersysteem zal bestaan uit een articulated robot in combinatie met een end-effector waarbij een of meerdere nader te bepalen grijpertechnieken worden toegepast.

Bijlage B: Beoordeling werkstukcomplexiteit

De complexiteit van een werkstuk hangt af van het aantal verschillende bewerkingshandelingen dat moet worden uitgevoerd. We onderscheiden vijf verschillende soorten handelingen:

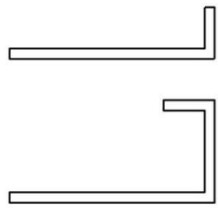
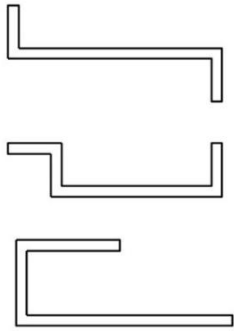
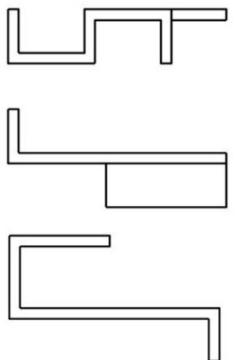
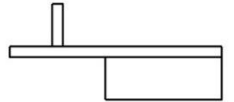
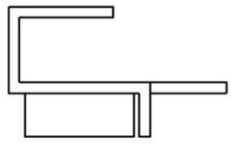
1. Translatie in de lengterichting (T1): Dit is een basisbeweging die bij elke zetbewerking voorkomt. Het werkstuk wordt met een bepaalde diepte in de zetbank geplaatst
2. Translatie in de breedterichting (T2): Bij sommige zetbewerkingen is het vereist om het werkstuk nauwkeurig in de breedterichting te plaatsen op de zetbank, bijvoorbeeld wanneer het werkstuk niet over de hele breedte gezet moet worden.
3. Rotatie om de lengte as (R1): Om omgekeerde zetbewerking op een enkel werkstuk toe te passen moet het werkstuk in de lengterichting worden gerooteerd.
4. Rotatie om de diepte as (R2): wanneer het werkstuk aan verschillende uiteinden bewerkt dient te worden, moet het gerooteerd worden om de diepte as.
5. Gebruik van een speciaal zetgereedschap (SG): Bij zetbewerkingen waarbij de eerste zet even diep of dieper is dan de tweede, moet speciaal gereedschap worden toegepast. Het begeleiden van het werkstuk vereist hierbij extra aandacht.

De rotatie- en translatieassen zijn weergegeven in Figuur 28.

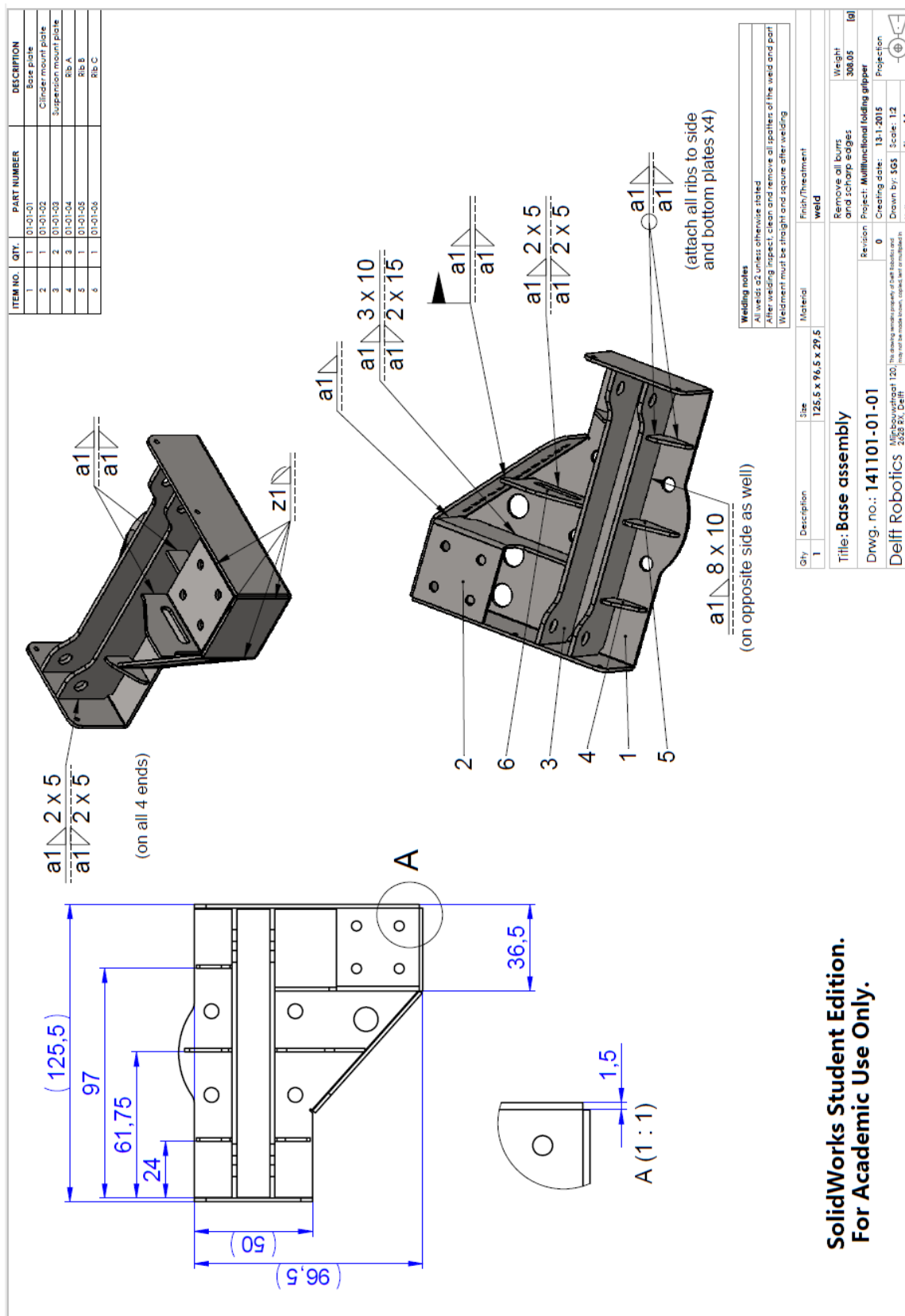


Figuur 28: rotatie en translatieassen om een werkstuk

Er wordt vaak een combinatie van deze bewerkingshandelingen toegepast. Om een gradatie aan te kunnen geven voor de complexiteit van een werkstuk, zijn er verschillende complexiteitsniveaus opgesteld. Bij een groter aantal verschillende uit te voeren handelingen is het werkstukcomplexiteitsniveau hoger. In Tabel 8 zijn deze complexiteitsniveaus weergegeven.

Complexiteits Niveau	Handelingen	Voorbeeld
1	T1	
2	T1 & R1 Of T1 & SG	
3	T1 & een combinatie van twee handelingen uit T2, R1, R2, SG.	
4	T1 & een combinatie van drie handelingen uit T2, R1, R2, SG.	
5	T1 & T2 & R1 & R2 & SG	

Tabel 8: Combinaties van bewerkingshandelingen en de bijbehorende werkstukcomplexiteitsniveaus

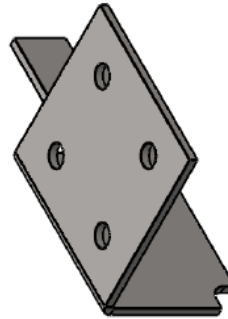
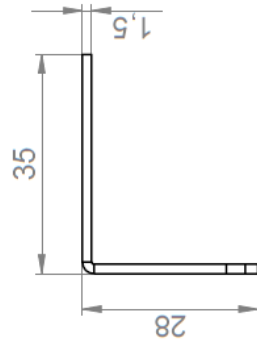
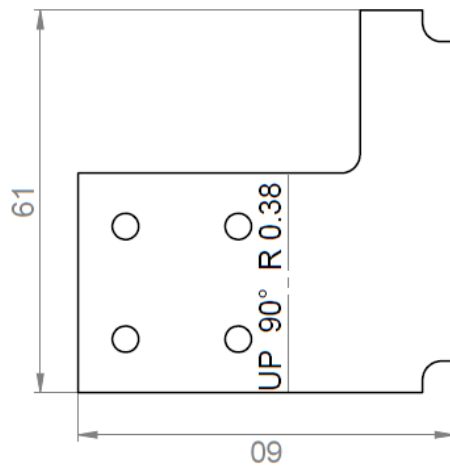




Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model, bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	$\pm 0,3$ mm/bend	
Cuts	$\pm 0,5$ mm	
Bends	$\pm 1^{\circ}$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
1	plate 1.5	176.5 x 128.5	AISI 304	laser cut & fold
Title: Base plate				
Drwg. no.: 141101-01-01-01				
Delif Robotics Intelligence at work				
Milsbouwing 120, 1105 CA Schiedamschen The Netherlands Tel: +31 (0)20 486 8500 Email: info@delifrobotics.nl				
Weight 183.45				
Revision Project: Multifunctional folding gripper Drawing date: 12-1-2015 Drawing by: SCS Scale: 1:2 Unit: mm Projection: 1st angle				

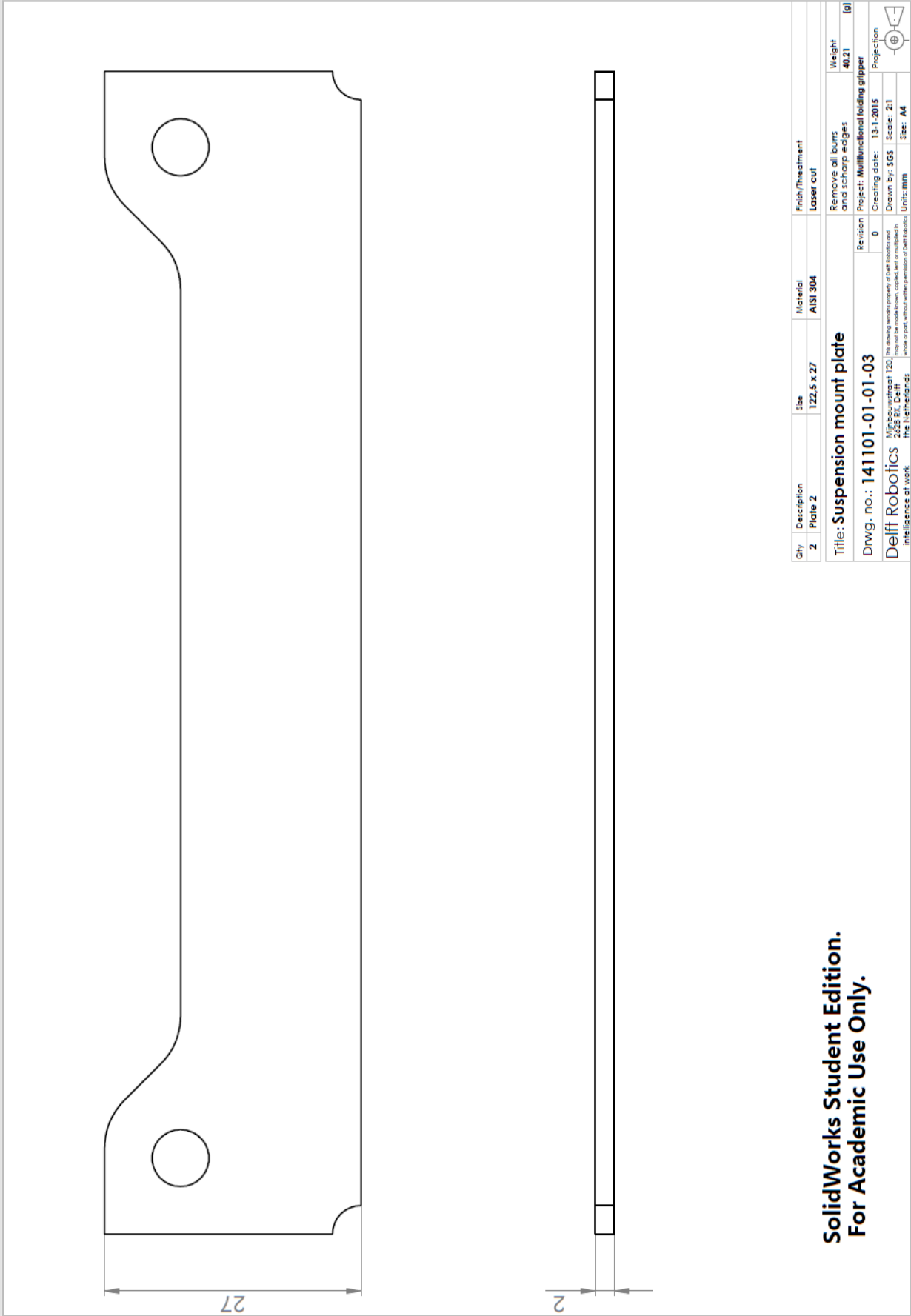




Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model. Manufacturing tolerances must be collected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm / bend	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	± 1°	

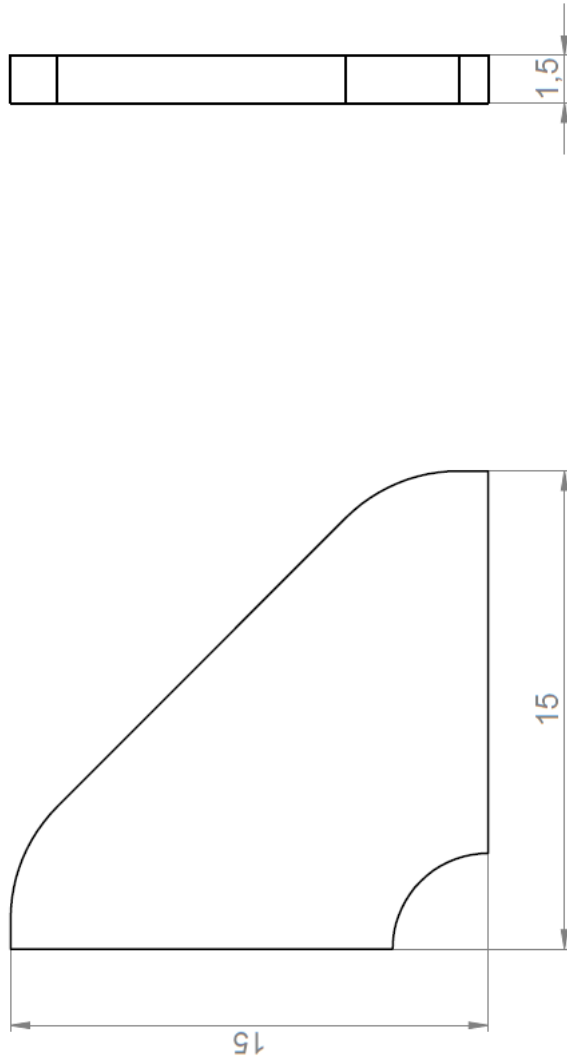
Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
1	plate 1.5	60 x 61	AlSi 304	laser cut & fold
Title: Cylinder mount plate				
Dwg. no.: 141101-01-01-02		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
		0	[a]	
Delft Robotics		Mijnbouwdepart 120		Weight
Intelligence at work		2428 P.V. Delft		29.11
		the Netherlands		Scale: 1:1
				Size: A4
				Projection

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

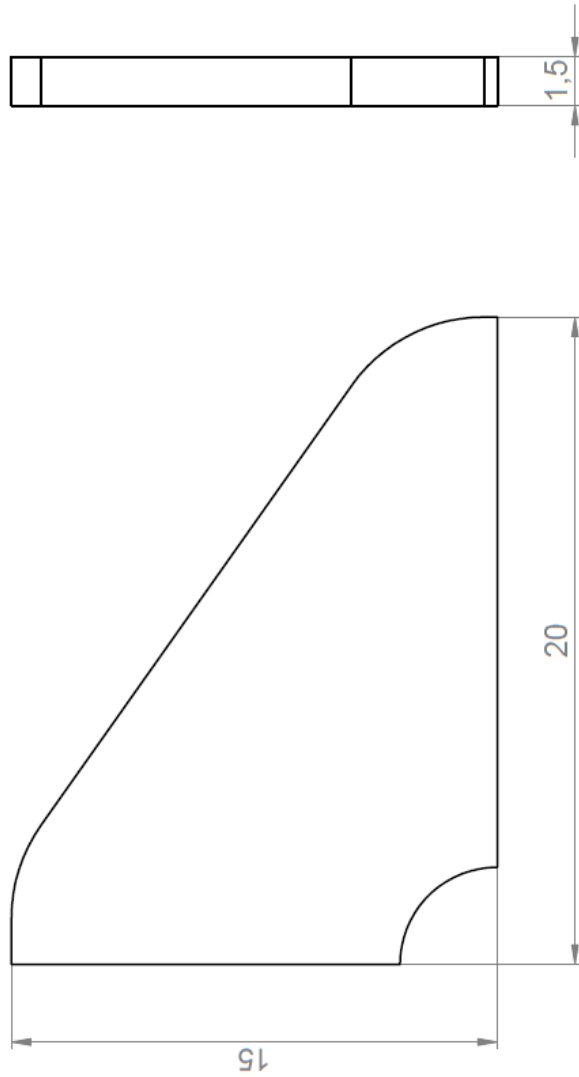
Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
2	Plate 2	122.5 x 27	AISI 304	Laser cut
Title: Suspension mount plate				
Dwg. no.: 141101-01-01-03		Revision	Remove all burrs and sharp edges	Weight
Delft Robotics		0	Project: Multifunctional folding gripper	40.21
Mijnbouwstraat 120,		Creating date: 13-1-2015	Drawn by: SGG	Scale: 2:1
2025 8X, Delft		Units: mm	Size: A4	Projection
Intelligence at work		the Netherlands		



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model Bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	± 0.2 mm/bend	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
3	plate 1.5	15 x 15	AISI 304	laser cut
Title: Rib A				
Drwg. no.: 141101-01-01-04		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
Mitsuboustraat 120		0	Remove all burrs and sharp edges	
Delft Robotics		Creating date: 12-1-2015		Weight
Intelligence at work		Drawn by: SGS		1.74
		Unit: mm		Projection
		Size: A4		(a)

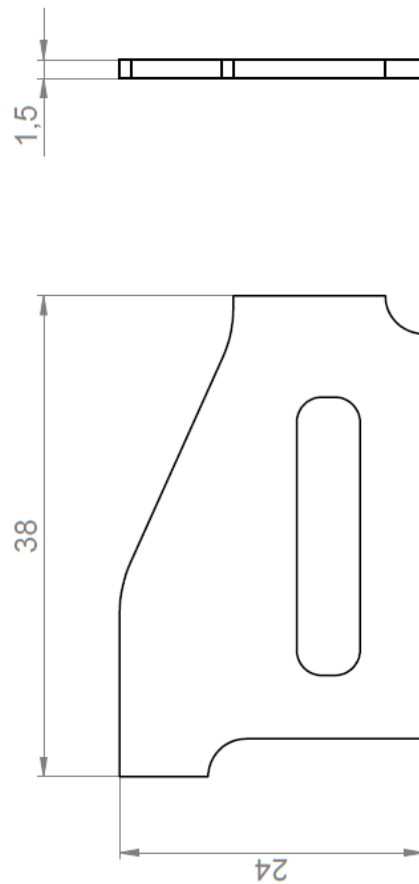
SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model, bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm / bend	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	± 1°	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
1	plate 1.5	20 x 15	AlSi 304	laser cut
Title: Rib B				
Dwg. no.: 141101-01-01-05		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
Delft Robotics		0	Weight 2.28	
Miniboustraat 120		Creating date: 12-1-2015		
2228 EA Delft		Scale: 5:1		
the Netherlands		Unit: mm		
independence of work		Size: A4		
		Projection		

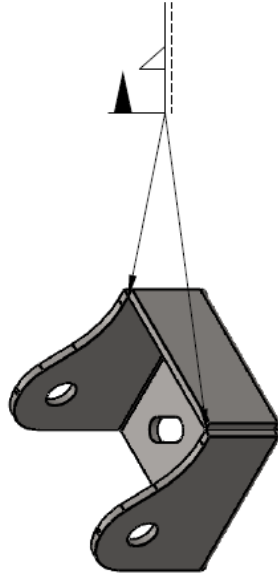
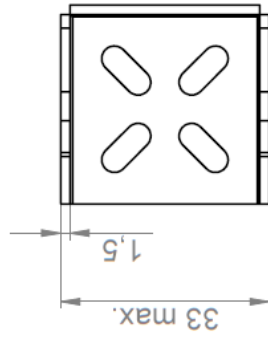
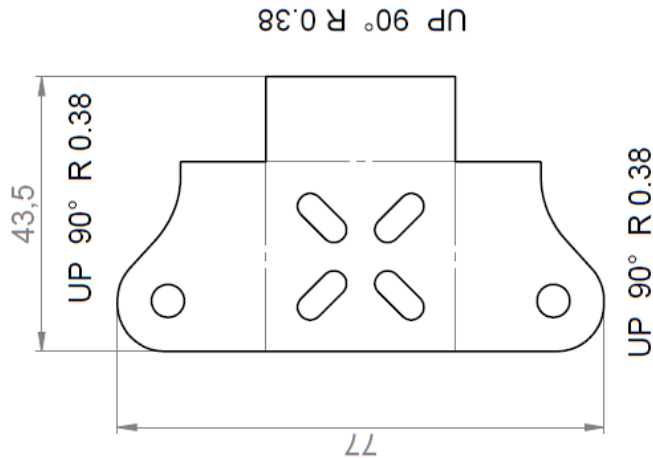
SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model. Deviation from model may be corrected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm / bend	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Threadment	Weight
1	plate 1.5	38 x 24	AISI 304	laser cut	7.5g
Remove all burrs and sharp edges					
Project: multifunctional folding gripper					
Revision					
0					
Creating date: 12.1.2015					
Drawn by: SGG					
Scale: 2:1					
Units: mm					
Size: A4					
Projection					
					

SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

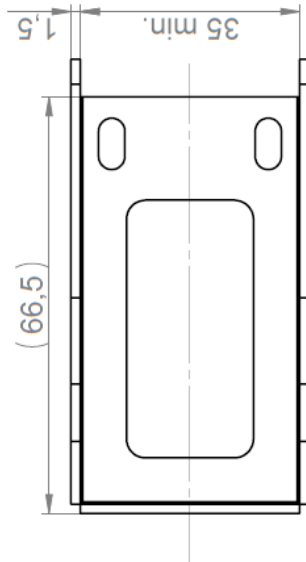
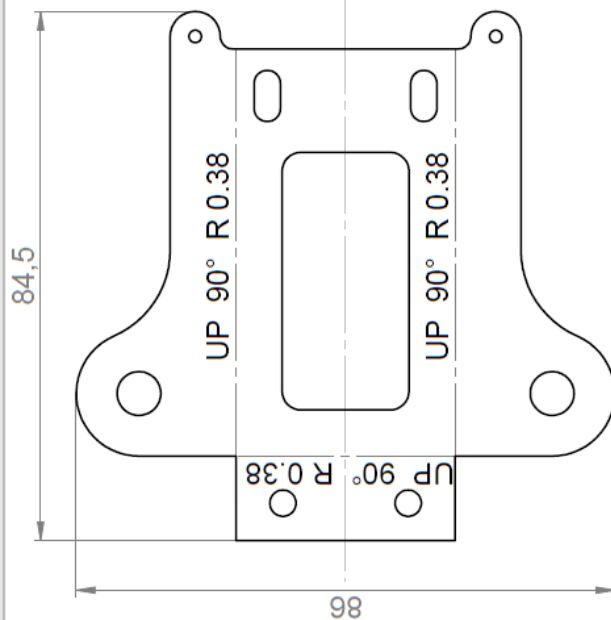


Steel metal tolerance table		Geometry according to CAD model
Bends	± 0.3 mm/bend	Weld dimensions must be corrected by manufacturer
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

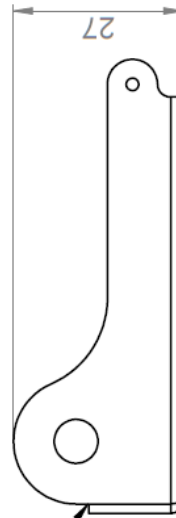
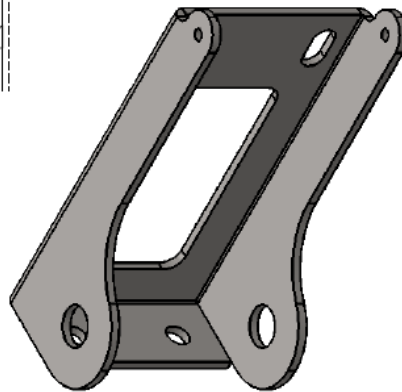
Welding notes	
All welds a2 unless otherwise stated	
After welding inspect, clean and remove all spatter of the weld and part	
Weldment must be straight and square after welding	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
2	plate 1.5	77 x 43.5	AISI 304	laser cut, fold & weld
Title: Cylinder hinge				
Dwg. no.: 141101-01-02-01		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
		0	Weight	
			28.07	
Delft Robotics		Created date: 12-1-2015	Projection	
intelligence at work		Drawn by: SCS	Scale: 1:1	
		Units: mm	Size: A4	

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



(also on opposite side)

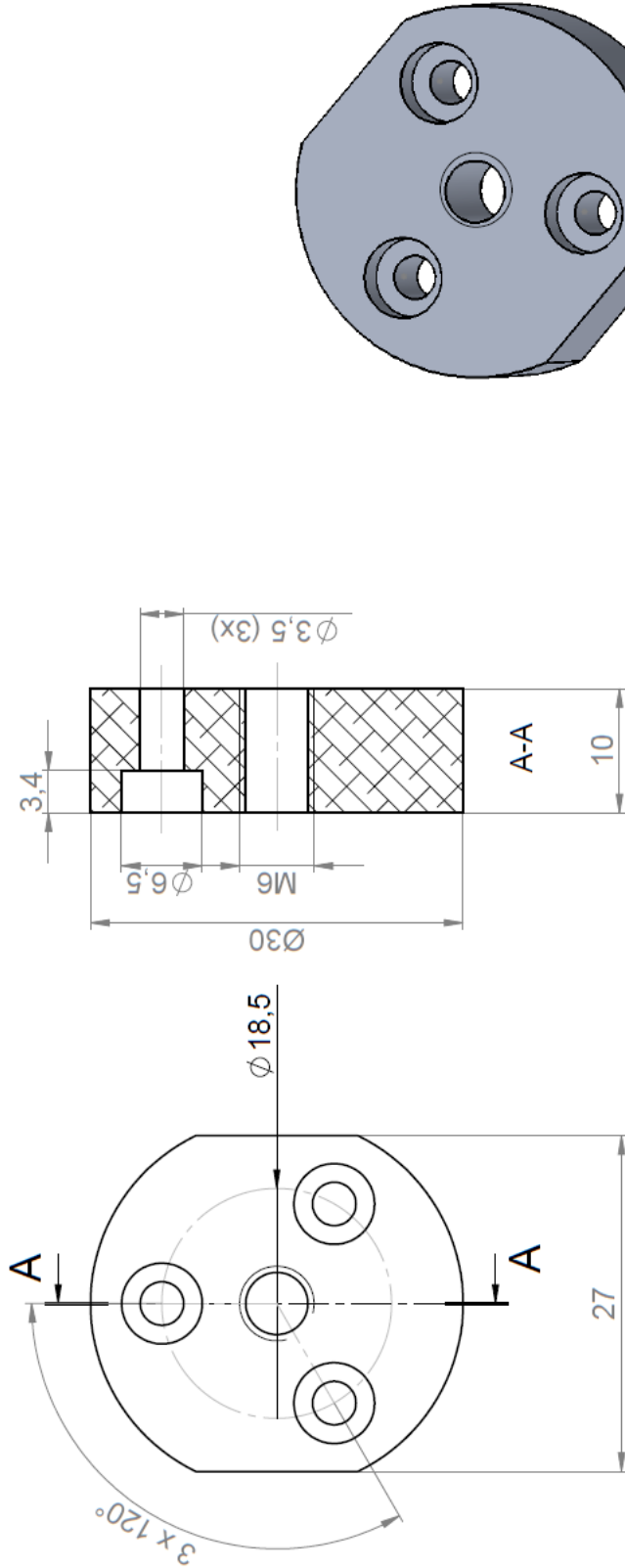


Steel metal tolerance table		Geometry according to CAD model
Bends	± 0.3 mm/bend	Geometry according to CAD model
Cuts	± 0.05 mm	Geometry according to CAD model
Bends	± 1°	Geometry according to CAD model

Welding notes
 All welds as2 unless otherwise stated
 After welding inspect, clean and remove all spatters of the weld and part
 Weldment must be straight and square after welding

Gly	Description	Size	Material	Finish/Finetreatment
2	plate 1,5	86 x 84,5	AISI 304	laser cut, fold & weld
Title: Gripper hinge				
Drwg. no.: 141101-01-03-01				
Delft Robotics				
Intelligence at work				
the Netherlands				
Nijboersstraat 120				
2525 BX, Delft				
Phone: +31 (0)15 275 1234				
Email: info@delftrobotics.nl				
Website: www.delftrobotics.nl				
Revision: 0				
Project: Multifunctional folding gripper				
Creating date: 12-1-2015				
Drawn by: SCS				
Scale: 1:1				
Units: mm				
Size: A4				
Remove all burrs and sharp edges				
Weight: 47.23				
Projection: [a]				

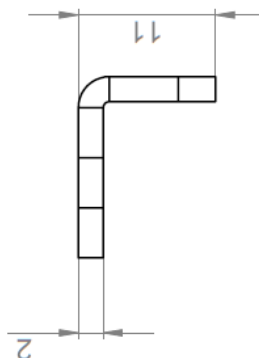
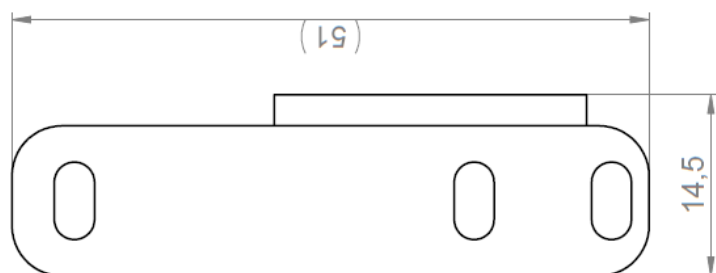
**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model
Bends	± 0.3 mm/bend	bend allowance must be corrected by manufacturer
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
1	Round bar Ø30	10	6061 Alloy	
Title: Magnet connection piece				
Drwg. no.: 141101-01-05-01		Revision	Remove all burrs and sharp edges	Weight
		0	Project: Multifunctional folding gripper	16.41
Delft Robotics		Creating date: 12-1-2015	Drawn by: SGG	Scale: 2:1
Intelligence at work		Unit: mm	Size: A4	Projection

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



Sheet metal tolerance table	
Bends	$\pm 0,3$ mm/bend
Cuts	$\pm 0,05$ mm
Bends	$\pm 1^{\circ}$

Geometry according to CAD model, bend allowance must be corrected by manufacturer

Gty	Description	Size	Material	Finish/Treatment	Weight
2	plate 2	51 x 21.5	AlSI 304	laser cut & fold	13.00

Title: Finger connection plate

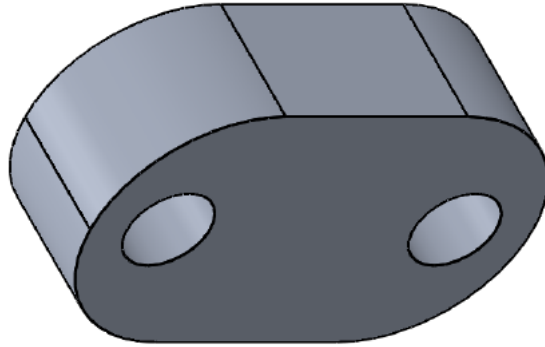
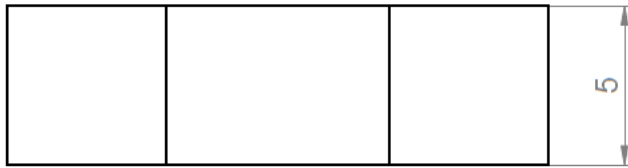
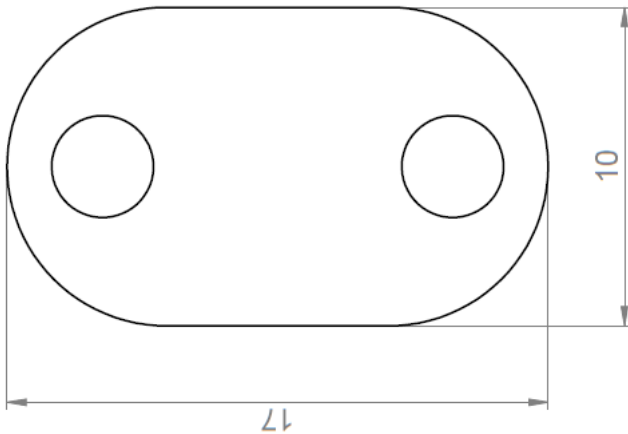
Dwg. no.: 141101-01-06-01

Miljöburen 120
Delft Robotics

This drawing consists of self-explanatory parts.
It may be made known, copied and/or modified,
without the need for written permission.

Project: Multifunctional folding gripper
0
Creating date: 12-1-2015
Drawn by: SCS
Scale: 2:1
Size: A4
mm

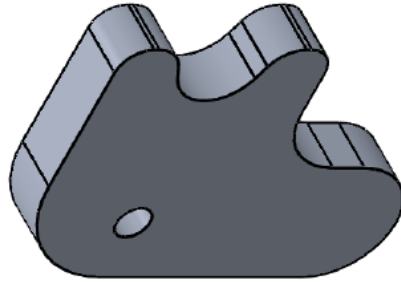
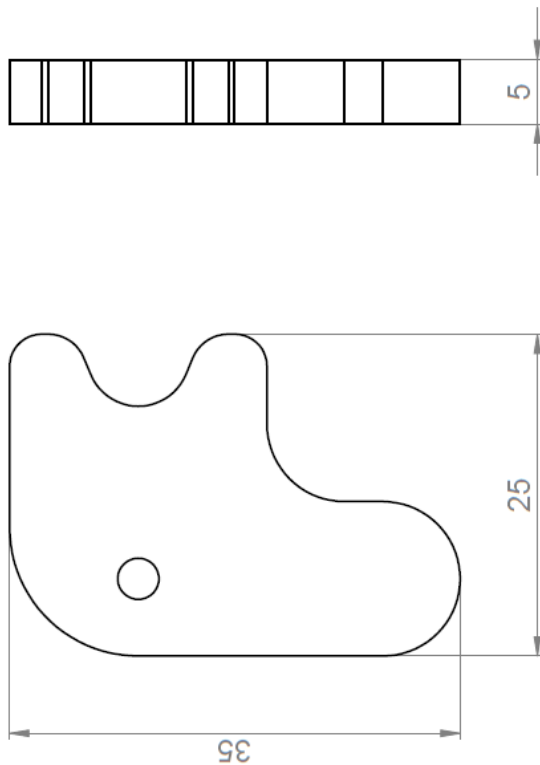
**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



Steel metal tolerance table		Geometry according to CAD model. Bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm/bend	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
2	plate 5	17 x 10	6061 Alloy	water jet cut
Title: Distance piece				
Drwg. no.: 141101-01-07-01		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
Delft Robotics		0	Weight	
Intelligence at work		The drawing remains property of Delft Robotics and may not be reproduced or used in any way without prior written permission of Delft Robotics		1.79
		Created date: 12-1-2015		Projection
		Drawn by: SCS		Scale: 5:1
		Units: mm		Size: A4

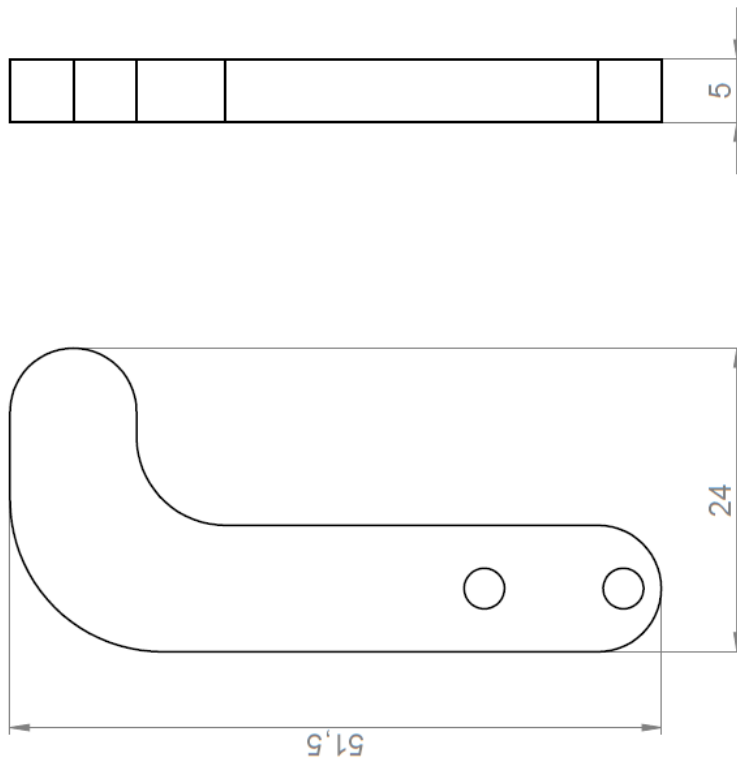
**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model
Bends	± 0.3 mm/bend	Geometry and dimensions must be corrected by manufacturer
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment	Weight
1	plate 5	35 x 25	6061 Alloy	water jet cut	8.08
Title: Split finger					
Dwg. no.: 141101-01-08-01		Revision	Project: Multifunctional folding gripper		
		0	[g]		
Delft Robotics		Creating date: 12-1-2015		Projection	
Intelligence at work		Units: mm		Scale: 2:1	
		Size: A4		Projection	

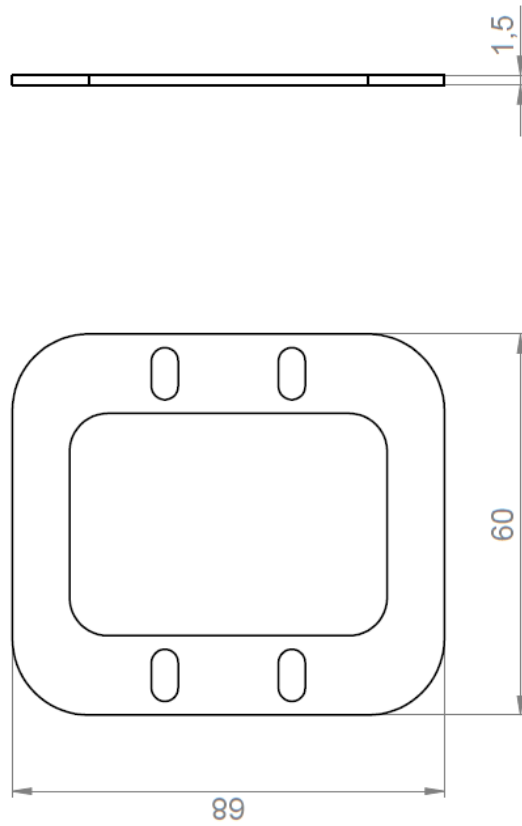
SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAD model, bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm/bend	
Cuts	±0.05 mm	
Bends	+1°	

[illegible]

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**



Sheet metal tolerance table		Geometry according to CAB model. Bend allowance must be corrected by manufacturer
Bends	± 0.3 mm (bend)	
Cuts	± 0.05 mm	
Bends	$\pm 1^\circ$	

Qty	Description	Size	Material	Finish/Treatment
1	Plate 1.5	60 x 68	AISI 304	Laser cut
Title: Stiffener plate				
Drwg. no.: 141101-01-10-01		Revision	Project: Multifunctional folding gripper	
Delft Robotics		0	Weight 25.38	
Intelligence at work		Creating date: 9-1-2015		Projection 
The drawing is the property of Delft Robotics and shall not be used for production without written permission of Delft Robotics		Drawn by: SSS		
		Scale: 1:1		
		Unit: mm		Size: A4

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

Bijlage D: Onderdelenlijst

Festo

Name	Description	Order number	Quantity	Stock	
QSM-M5-4	pneumatic connector	153304	8		
ADN-16-75-A-P-A-Q	Cilinder 16x75	536218	1		
ADNGF-12-20-P-A	Cilinder 12x20	554208	2		
SNCL-12	Rotary cilinder mount	537790	2		
DHWS-25-A	Angle gripper	1310180	1		
QSMS-4	Bulk head connector	153376	1		
ESH-HB-4-QS	Pneumatic adapter	189209	1		
ESS-20-CS	Suction cup M6	189401	1		
VN-05-M-I2-PQ1-VQ1	Vacuum generator	193580	1		
	Solenoid valve 3/2				
VUWS-L20-M32U-A-Q4	monostabiel	576517	1		
	solenoid valve 5/2				
VUVG-L10-B52-T-M5-1R8L	bistabiel	574351	2		
LR-1/4-DB-7-MINI	Pressure regulator	539682	1		
ESF 4A	Vacuum filter	191203	1		

	in stock
	replacable with similar part from stock
	not in stock

Fabory

Name	Description	Order number	Quantity	Stock
ISO 7379 M5 6 x 16	hex screw with shoulder slotted pan shoulder	51.044.050.016	2	
DIN 923 M5 x 5	screw	-	4	
ISO 8735 6 x 16 A	Pin with inner tap	39.090.060.016	4	
DIN 912 M3 x 10	Hex screw M3	51.050.030.010	7	
DIN 912 M3 x 16	Hex screw M3	51.050.030.016	3	
DIN 912 M3 x 30	Hex screw M3	51.050.030.030	2	

DIN 912 M4 x 6	Hex screw M4	51.050.040.006	4	
DIN 912 M4 x 10	Hex screw M4	51.050.040.010	4	
DIN 912 M4 x 16	Hex screw M4	51.050.040.016	8	
ISO 7040 M3	Prevailing torque nut M3	51.730.030.001	5	
ISO 7040 M4	Prevailing torque nut M4	51.730.040.001	4	
ISO 7040 M5	Prevailing torque nut M5	51.730.050.001	6	
ISO 7040 M6	Prevailing torque nut M6	51.730.060.001	1	
DIN 125-1A M3	Plain washer 3.2	51.420.030.001	18	
DIN 125-1A M4	Plain washer 4.3	51.420.040.001	20	
DIN 127 B M4	Spring washer M4	51.450.040.001	16	
DIN 127 B M6	Spring washer M6	51.450.060.001	1	

Amatec

trekveer 0,79 x 7,62 x 38,1	trekveer	E0300-031-1500M	4	
-----------------------------	----------	-----------------	---	--

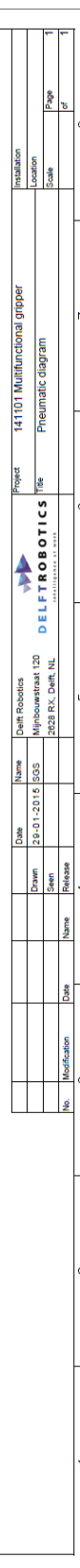
MCM

Name	Description	Order number	Quantity	Stock
MCM-06-02	Lager 06 02	-	4	

RS

Name	Description	Order number	Quantity	Stock
Electromagnet	-	-	1	

69



Bijlage F: Programmastructuur van de UR5 tijdens de locatietest

MoveJ

- WP Home
- SET TO[0]=Off
- SET DO[4]=On
- WP initial_pickup_approach
- SET TO[0]=On
- WP initial_pickup
- WP initial_pickup_approach
- WP platform_drop_approach
- WP platform_drop
- SET TO[0]=Off
- SET DO[4]=Off
- WP mechanical_pickup_approach
- SET TO[1]=On
- WP mechanical_pickup
- SET TO[1]=Off
- WP mechanical_pickup_depart
- WP platform>press1
- WP platform>press2
- WP platform>press3
- WP press_approach1
- WP press_approach2
- WP press
- Popup1
- Set TO[1]=On
- WP press_depart
- WP press>press_pickup
- WP press_pickup_approach
- Popup2
- WP press_pickup
- SET TO[1]=Off
- Popup3
- WP press_pickup_depart
- WP press_pickup>drop_off
- WP drop_off_approach
- WP drop_off
- SET TO[1]=On
- WP drop_off_depart1
- WP drop_off_depart2