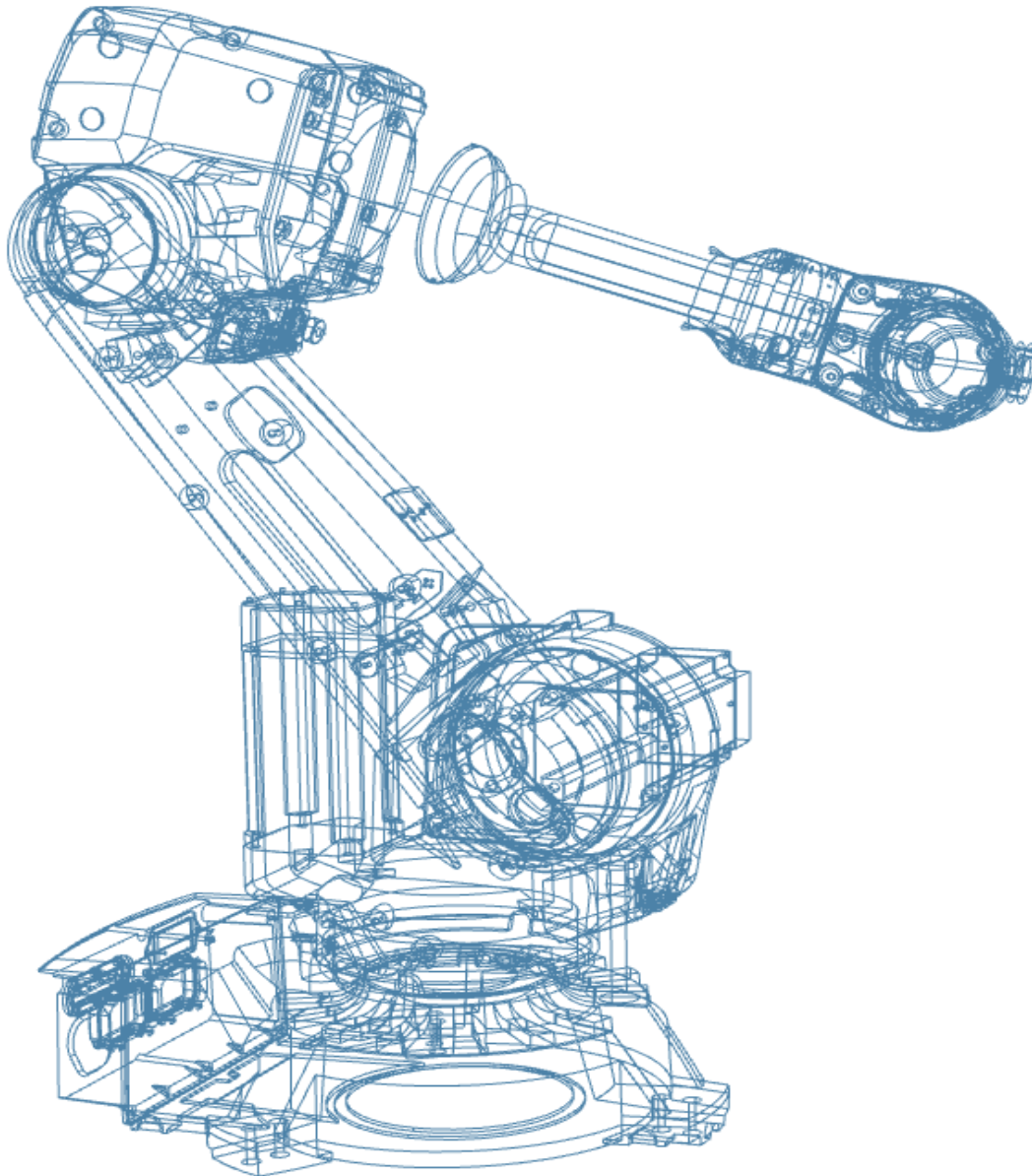




Integraalprojectverslag 3D-Printing with Co-Bots [WTB]

3D-printing – Robotlab – Co-Bots



Naam: Keije Roozendaal, Sven Dekker, Mats van der Vliet

Opdrachtgever: Marco Galli, Richard Lekkerkerker, Robotlab

Documentnaam en versienummer: Integraalprojectverslag 3D-Printing with Co-Bots 24-25 [WTB]

Datum: 26/05/2025

Voorwoord

Dit verslag is het resultaat is van ons project binnen het Robotlab van de Hogeschool van Amsterdam. Voor ons, een team bestaande uit studenten werktuigbouwkunde en elektrotechniek, bood dit project een kans om samen te werken aan een technisch uitdagend en innovatief onderwerp, het ontwikkelen van een 3D-printopstelling voor een Cobot. Onze keuze voor dit project kwam voort uit onze fascinatie voor robotica en de mogelijkheden die collaboratieve robots ons kan bieden om productie- of in dit geval educatieve-processen te verbeteren.

De samenwerking tussen werktuigbouwkunde en elektrotechniek heeft ons geholpen om breder te kijken dan ons eigen vakgebied. Waar de werktuigbouwkundige inzichten de kern waren voor het ontwerpen van de hardware en mechanische componenten, speelde de elektrotechnische expertise een de rol in de ontwikkeling van de elektronische regeling en softwarematige aansturing. Hoewel werktuigbouwkunde en elektrotechniek elk hun eigen focus hadden, was iedereen betrokken bij alle aspecten van het project wat heeft geleid tot een succesvolle samenwerking.

We willen graag onze oprechte dank uitspreken aan onze IP-begeleiders en CoP-begeleiders: Richard Lekkerkerker en Marco Galli voor hun waardevolle begeleiding, expertise en steun gedurende dit project. Hun inzichten en adviezen hebben bijgedragen aan het succes van dit project en hebben ons ook geïnspireerd om het beste uit onszelf te halen.

Dit verslag weerspiegelt de technische voortgang die we hebben geboekt en ook de persoonlijke en professionele groei die we als team hebben gemaakt. We kijken met trots terug op het project en hopen dat ons werk een waardevolle bijdrage heeft geleverd aan de verdere ontwikkeling van 3D-printing met behulp van collaboratieve robotica.

Begrippenlijst

Begrip	Beschrijving
3D-printing	Additieve productietechniek waarbij materiaal laag voor laag wordt opgebouwd om een object te vormen.
Cobot (Collaboratieve robot)	Een robot die is ontworpen om veilig samen te werken met mensen zonder fysieke afscherming.
ABB CRB15000 (GoFa)	Een specifieke collaboratieve robotarm van ABB, met geïntegreerde veiligheidssystemen (zoals SafeMove) en een draagvermogen van 5 kg.
SafeMove	Software van ABB die zonebewaking, bewegingslimieten en monitoring van de robot mogelijk maakt om veilig te werken in een gedeelde omgeving.
End-effector	Het uiteinde van een robotarm dat een taak uitvoert, in dit geval het printen van materiaal.
Extruder	Onderdeel van een 3D-printer dat filament aanvoert naar het hotend voor smelten en extrusie.
Hotend	Onderdeel van de extruder dat het filament verwarmt en door een nozzle perst.
Grasshopper	Visueel programmeerplatform binnen Rhinoceros 3D, gebruikt voor parametrisch ontwerp en het genereren van toolpaths.
Toolpath	De route die de robotarm of printkop volgt tijdens het 3D-printproces.
Flowrate (E)	De snelheid waarmee filament wordt geëxtrudeerd tijdens het printen, uitgedrukt in mm^3/s .
Isocurve	Lijn op een oppervlak die wordt gebruikt als basis voor het genereren van toolpaths in non-planar 3D-printen.
Non-planar printing	3D-printtechniek waarbij niet in lagen parallel aan de bouwplaat wordt geprint, maar in gekromde lagen.
RAPID	Programmeertaal van ABB-robots waarmee bewegingen, posities en instructies worden gedefinieerd.
Klipper	Open-source firmware voor 3D-printers die realtime bediening van de printerhardware mogelijk maakt via bijvoorbeeld een Raspberry Pi.
PID-kalibratie	Afstemmen van de proportional-integral-derivative-regeling, veelal toegepast op temperatuurregeling in een hotend.

Exploded view	Een tekening waarin de onderdelen van een assemblage zijn 'uitgeklapt' om de samenstelling te tonen.
Parametrisch ontwerp	Ontwerpprincipe waarbij geometrieën worden aangestuurd via variabelen, vaak toegepast in Grasshopper.
TCP (Tool Center Point)	Het werkpunt van de robotarm waar het gereedschap effectief werkt — cruciaal voor precisie bij robottoepassingen.

Inhoud

Voorwoord	2
Begrippenlijst.....	3
1. Inleiding.....	7
1.1 Context.....	7
1.2 Aanleiding.....	7
1.3 ABB CRB15000 collaboratieve robot	8
2. Probleemdefinitie.....	9
2.1 Opdracht en doelstelling.....	9
2.2 Hoofdvraag	9
2.3 Deelvragen.....	9
3. Analyse	11
3.1 Klantwensen	11
3.2 Eisen	11
4. Softwarematige en elektronische regeling	12
5. Hardware: End effector	13
5.1 onderzoek.....	13
5.1.1 Innovatie en Technologie	13
5.1.2 Ergonomie en Veiligheid	14
5.2 Kooponderdelen.....	15
5.3 Concepten.....	16
5.3.1 Concept 1.....	16
5.3.2 CoboPrint	17
5.4 Succescriteria.....	18
5.5 Conclusie	18
6. Detailontwerp	19
6.1 Feedback	19
6.2 Schets CoboPrint v2.....	20
6.3 CoboPrint v2	21
6.3.1 Exploded View	22
7. Grasshopper	23
7.1 Inleiding.....	23
7.2 Toolpaths.....	23
7.3 Flowrate	25
7.4 Visualisatie	26

7.5 RAPID	28
8. Resultaten	29
Bibliografie	30
BIJLAGE A	30

1. Inleiding

1.1 Context

Europa staat voor de uitdaging om de productiecapaciteit binnen de eigen regio te vergroten, vooral gezien de afhankelijkheid van productieprocessen in andere delen van de wereld, zoals Azië. Om concurrerend te blijven en de impact op het milieu te verminderen, is er behoefte aan nieuwe, flexibele productiemethoden die gebruikmaken van innovatieve technologieën. Een belangrijke ontwikkeling die kan bijdragen aan het terughalen van productie naar Europa is de opkomst van collaboratieve robotica (Cobots). Deze robots werken zij aan zij met mensen en maken efficiëntere, flexibele en kostenbesparende productieprocessen mogelijk. Cobots verlagen de fysieke en mentale belasting van werknemers door repetitieve en zware taken over te nemen en de samenwerking tussen mens en robot te optimaliseren. Toch blijft collaboratieve robotica wereldwijd een nichemarkt, goed voor slechts 7,5% van de totale industriële robotmarkt (IFR, 2022).

Om deze technologie verder te ontwikkelen en implementeren, is er nog een aantal stappen nodig. Het Robotlab van de Hogeschool van Amsterdam, onderdeel van de Digital Production Research Group, richt zich op het invullen van enkele van deze ontbrekende stappen. Het lab combineert robotica met duurzame materiaalinnovaties, zoals het gebruik van gerecycled plastic en resthout, en ontwikkelt flexibele productieprocessen die geschikt zijn voor variabel materiaal. Deze technologieën bieden oplossingen voor de vraag naar efficiënte en duurzame productie in Europa. Het multidisciplinaire team van het Robotlab, bestaande uit ontwerpers, architecten, werktuigbouwkundigen, IT-experts, en robotica-specialisten, werkt samen aan projecten die het potentieel van collaboratieve robotica verder verkennen. Jullie project zal bijdragen aan het oplossen van een van de uitdagingen waar het Robotlab aan werkt door deze innovatieve technologie verder te ontwikkelen en toe te passen.

1.2 Aanleiding

3D-printen met industriële robotarmen is een gebied met veel ruimte voor verkenning, innovatie en verbetering. Dit project, als onderdeel van het Robotlab staat centraal in het onderzoek van de mogelijkheden die deze technologie biedt en het verbeteren van de huidige 3D-print opstelling van het Robotlab met de specifieke wensen van het Lab op oog. Met de nieuwe 3D-print opstelling kan het Robotlab educatie leveren met 3D-printen als onderdeel, hierbij leren studenten en onderzoekers te werken met robotica en meer complexe end-effectors in een veilige omgeving. Dit project is in vervolg van een eerdere opdracht waarbij een 3D-print end-effector is ontworpen voor de industriële IRB ABB1200 robotarm echter deze valt tegen in meerdere aspecten, waardoor het Robotlab opzoek is naar nieuwe oplossingen. Ook wil het Robotlab gebruik maken van de GoFa CRB 15000 Cobot in plaats van de IRB1200 voor het 3D-printen. De Cobot is een Collaboratieve die sensoren en ontwerp karakteristieken bevat voor het samenwerken met de mens. De bedoeling van de nieuwe end-effector is dat deze veiliger en intuïtiever is vergelijken met de voorgangers net zoals de Cobot veiliger en intuïtiever is vergeleken met de IRB1200.

1.3 ABB CRB15000 collaboratieve robot

De GOFA 15000 is een geavanceerde collaboratieve robot (Cobot) die speciaal is ontwikkeld voor taken waar nauwkeurigheid, snelheid en veiligheid essentieel zijn. Met een draagcapaciteit van 5 kg is deze robot geschikt voor een breed scala aan toepassingen, zoals assemblage, kwaliteitscontrole en materiaalverwerking. Dankzij zijn compacte ontwerp kan de GOFA 15000 gemakkelijk worden geïntegreerd in bestaande productielijnen, zelfs in kleine ruimtes.

Belangrijke kenmerken van de GOFA 15000 zijn:

- Hoge precisie: Dankzij geavanceerde sensoren en een nauwkeurige besturing kan de robot complexe taken met uiterste precisie uitvoeren.
- Veiligheid: De GOFA 15000 is uitgerust met geïntegreerde veiligheidssystemen die de samenwerking met menselijke operators mogelijk maken zonder dat fysieke barrières nodig zijn (SafeMove).
- Eenvoudige programmering: Door gebruik te maken van intuïtieve interfaces en programmeertools kan de robot snel worden geconfigureerd en ingezet, zelfs door gebruikers met beperkte programmeerervaring.

SafeMove is een innovatieve softwareoplossing die speciaal is ontwikkeld voor het verbeteren van de veiligheid en controle van industriële robots. Deze technologie maakt het mogelijk om robots in een gedeelde werkomgeving te laten werken, waarbij veiligheidsrisico's tot een minimum worden beperkt.

De belangrijkste functies van SafeMove zijn:

- Zonebewaking: SafeMove stelt gebruikers in staat om veiligheidszones rond de robot te definiëren. Als de robot of een externe factor deze zones betreedt, wordt de robot automatisch gestopt of vertraagd.
- Flexibele instellingen: Gebruikers kunnen parameters aanpassen aan specifieke productieomgevingen, zoals snelheid, bewegingstrajecten en werkruimtes.
- Diagnose en monitoring: De software biedt real-time diagnose- en monitoringsmogelijkheden, zodat operators snel kunnen reageren op mogelijke problemen.

2. Probleemdefinitie

2.1 Opdracht en doelstelling

Het Robotlab wil een 3D-printer opstelling voor de CRB15000 Cobot die eenvoudig te gebruiken, veilig en betrouwbaar is, zodat ze lessen in additieve productie kunnen geven als onderdeel van verschillende educatie programma's. Hiervoor moet een 3D-print opstelling worden ontworpen, gerealiseerd en getest. Zowel hardware- en softwarematig. Denk hierbij bijvoorbeeld aan, het extruder systeem, het montage systeem, de elektronische regeling en de communicatie tussen end-effector en Robotcontroller. Dit moet ontworpen worden met veiligheid van de gebruiker in gedachte. De opstelling wordt gebruikt door studenten en onderzoekers met weinig tot geen ervaring in robotica en 3D-printen. Daarom is het van belang dat het gebruik van de opstelling intuïtief is en dat de opstelling zo wordt ontworpen dat er zo min mogelijk risico tijdens gebruik is.

2.2 Hoofdvraag

Hoe kan een multi-axis 3D printopstelling worden ontworpen en gebouwd voor collaboratieve robots, waarbij zowel hardware- als softwarecomponenten worden geïntegreerd?

2.3 Deelvragen

Om de hoofdvraag te beantwoorden, zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

Communicatie en Integratie:

1. Welke softwaretools en programmeerplatforms zijn beschikbaar voor het integreren van cobots in een multi-axis 3D-printopstelling?
2. Welke communicatieprotocollen zijn het meest geschikt voor het verbinden van de cobot met de 3D-printer en andere systeemcomponenten?

Besturingssysteem en Controle:

1. Welke methoden kunnen worden gebruikt voor het aansturen van een cobot in een complexe 3D-printomgeving?
2. Wat zijn de minimale vereisten voor een besturingssysteem om zowel de cobot als de 3D-printer effectief te beheren?
3. Hoe kan real-time monitoring en controle worden geïntegreerd in het systeemontwerp?

Innovatie en Technologie:

1. Wat zijn de nieuwste trends en innovaties in cobottechnologie die relevant zijn voor multi-axis 3D-printen?
2. Welke hardwarecomponenten zijn onmisbaar voor het bouwen van een efficiënte multi-axis 3D-printopstelling met cobots?
3. Hoe kunnen emerging technologies, zoals machine learning en sensoren, de prestaties van cobots in 3D-printen verbeteren?

Ergonomie en Veiligheid:

1. Welke ergonomische en veiligheidsnormen moeten worden toegepast bij het ontwerpen van een werkruimte met cobots en 3D-printers?
2. Hoe kunnen risico's, zoals botsingen of overbelasting, worden geminimaliseerd bij het werken met cobots in een industriële omgeving?

Efficiëntie en Arbeidsomstandigheden:

1. Wat is de impact van het gebruik van cobots op arbeidsomstandigheden, zoals werkdruk, repetitieve taken en samenwerking tussen mens en machine?

3. Analyse

3.1 Klantwensen

Er zijn klantwensen opgesteld vanuit een gesprek met Marco Galli, de opdrachtgever. Deze wensen geven verschillende aspecten aan die gericht zijn op het behalen van de opdrachtgevers specifieke doelstellingen, de klantwensen geven het project richting en een begin voor de eisen waar het project aan moet voldoen. Klantwensen zijn meestal niet gedefinieerd als harde voorwaarde, klantwensen zijn wensen die verder moeten worden onderzocht en worden uitgewerkt naar concrete eisen, deze eisen kunnen dan dienen als methode om te kijken of het project is geslaagd.

Voor het tabel klantwensen wordt er verwezen naar het hoofdverslag (Keije Roozendaal, Sven Dekker, Mats van der Vliet, Miguel Chacon Jimenez, Gijs de Jongh, 2025).

3.2 Eisen

De specificaties van dit project zijn gebaseerd op het klantwensen en de problemen van de oudere printkop. Op basis van deze inzichten zijn de volgende specificaties vastgesteld:

Categorie	Nummer	Eis
Veiligheid	1	Het eindproduct voldoet aantoonbaar aan de CE-richtlijnen of relevante machineveiligheidsnormen
	2	Het eindproduct bevat een fysieke noodstop (killswitch) die binnen <1s de stroomtoevoer onderbreekt
Technische wensen	3	De opstelling kan via Grasshopper (Rhino) met een gebruiksvriendelijke interface bediend worden
	4	De complete module is in <60 seconden (de)monteerbaar op de ABB GOFA 15000 met max. 2 bevestigingshandelingen
	5	Het eindproduct ondersteunt minimaal twee filamenttypes: PLA en PETG, getest onder identieke instellingen
	6	Minimaal 80% van de onderdelen is vrij verkrijgbaar als standaardcomponent binnen de 3D-print industrie
	7	Het eindproduct print consistent met een minimum flowrate van 60mm ³ /s (getest met PLA bij 220°C)
	8	Bij normaal gebruik is geen onderhoud nodig voor een periode van minimaal 4 maanden (gedefinieerd als één semester Robotlab-gebruik)
Overig	9	Het eindproduct wordt geleverd met een Nederlandstalige handleiding die uitleg geeft over gebruik, onderhoud en troubleshooting
	10	Een compatibel .STEP of .IGES CAD-model van de End-effector wordt meegeleverd, geschikt voor import in Fusion 360 of vergelijkbare CAM-software

4. Softwarematige en elektronische regeling

In dit hoofdstuk delen de elektrotechniekstudenten Miguel en Gijs hun bijdrage aan het project op het gebied van software en elektronische aansturing. Dit onderdeel is essentieel voor een succesvolle afronding van het project. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar het hoofdverslag (Keije Roozendaal, Sven Dekker, Mats van der Vliet, Miguel Chacon Jimenez, Gijs de Jongh, 2025).

5. Hardware: End effector

5.1 onderzoek

Aan de hand van de probleemdefinitie is er nu duidelijk wat de doelstelling is. Aan de hand van de bijbehorende deelvragen die onder **Innovatie en Technologie** en **Ergonomie en Veiligheid** vallen is er onderzoek gedaan.

5.1.1 Innovatie en Technologie

Hieronder vallen twee vragen die we een voor een gaan beantwoorden.

Wat zijn de nieuwste trends en innovaties in cobottechnologie die relevant zijn voor multi-axis 3D-printen?

Voor deze vraag is er state-of-the-art onderzoek gedaan naar bestaande 3d print oplossingen met cobot. Uit dit onderzoek is er maar een product gevonden die een 3d printing cell kit produceert. Dit product wordt gemaakt door het bedrijf Massive Dimension (MDAC1 3D Printing Cell Kit - ABB GoFa Cobot). De manier en gedachtengang hoe de printkop en material opslag zijn ontworpen kunne goed ter inspiratie gebruikt worden voor de concepten.



Figuur 1, Bron: [youtube.com/watch?v=pxDihxXKTc0](https://www.youtube.com/watch?v=pxDihxXKTc0)

Welke hardwarecomponenten zijn onmisbaar voor het bouwen van een efficiënte multi-axis 3D-printopstelling met cobots?

Voor deze vraag slaan we de elektronica componenten over, dit is in hoofdstuk 4 besproken. Welke hardwarecomponenten verder nodig zijn kunnen we zien in figuur 1 en figuren op de website van Massive Dimension (MDAC1 3D Printing Cell Kit - ABB GoFa Cobot).

- Hot-end
- Extruder
- Printbed
- Filament ophanging
- Kabel montage

5.1.2 Ergonomie en Veiligheid

Welke ergonomische en veiligheidsnormen moeten worden toegepast bij het ontwerpen van een end-effector op een cobots en 3D-printers?

Bij het ontwerp van de printkop moet zorgvuldig rekening worden gehouden met de veiligheid van de gebruiker. Het is van groot belang dat er geen bewegende onderdelen blootgesteld worden die letsel kunnen veroorzaken. Daarnaast dienen hete oppervlakken zoveel mogelijk afgeschermd en onbereikbaar te zijn om verbrandingen te voorkomen. Ook moet het ontwerp zodanig zijn dat er geen uitstekende delen aanwezig zijn waaraan materialen of kleding kunnen blijven haken.

5.2 Kooponderdelen

Nu de robot en de technische eisen bekend zijn kan er gekeken worden naar de hardware die nodig zal zijn om een werkende 3D print end effector te realiseren. Hiervoor zijn de hoofdonderdelen een Extruder en een Hotend hiernaar is onderzoek gedaan en is er een overzicht gecreëerd met verschillende opties die mogelijk zullen zijn, Hierbij is ook gekeken of de apparatuur compatibel met elkaar zijn.



Kenmerk	Optie 1	Optie 2	Optie 3
Totale prijs	€225 incl nozzle	€531,37	€1112,51
Hotend	Dragon Hotend UHF (€78,99)	LGX ACE Magnum+ Hotend (€349,88)	Mosquito® Prime™ (€999,99)
Flowrate	70.5 mm ³ /s	90 mm ³ /s	116 mm ³ /s
Extruder	APUS Extruder (€80,99)	LGX Extruder (€120)	QR-M Extruder (€112,52)

Na een overleg met de opdrachtgevers is besloten om optie 1 en optie 2 te combineren. Dit zorgt voor een betaalbaar maar goede basis van ons project. Zo zijn de Dragon Hotend UHF en de LGX Extruder aangeschaft.



Extruder
LGX Extruder
(€120)



Hotend
Dragon Hotend
UHF (€79)

- 30mm stepper motor
- Larger drive wheels
- Compatible with Dragon hot end
- Flowrate: 70.5 mm³/s
- Easy nozzle switch
- Compatible with LGX Extruder



5.3 Concepten

Vanuit deze onderdelen en het voor onderzoek zijn 2 concepten gekomen. De concepten worden hieronder uitgelegd en word er gekeken of het wel of niet geschikt is voor ons uiteindelijke doel. Elk concept zal zo natuurlijk zijn eigen voor en nadelen hebben. Een van deze concepten wordt uiteindelijk gekozen en zal in detail uitgewerkt worden.

5.3.1 Concept 1

Bij concept 1 wordt gebruikgemaakt van een compact ontwerp waarbij het TCP (Tool Center Point) zich dicht bij de robot bevindt. Dit resulteert in een stevige end effector met een korte arm. Een korte arm zorgt voor een klein moment, wat minder speling mogelijk maakt en bijdraagt aan een hoge nauwkeurigheid.

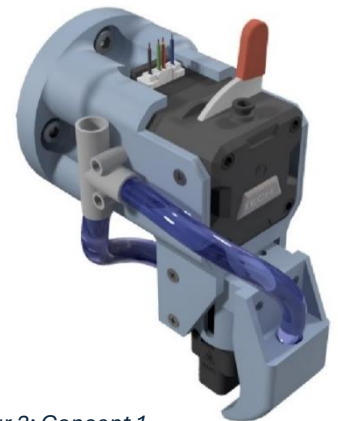
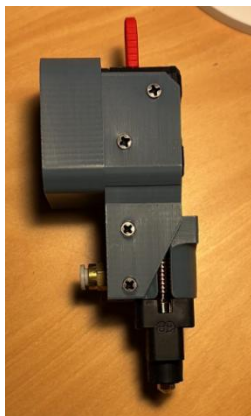
Het ontwerp bestaat uit relatief weinig onderdelen en is eenvoudig te monteren. Er wordt gebruikgemaakt van heat inserts om bevestigingspunten te creëren, zodat specifieke tools gemakkelijk kunnen worden bevestigd. In ons geval gebruiken wij een fan duct die aan de voorkant van de end effector kan worden gemonteerd. Deze fan duct functioneert als een hulptool tijdens het printen om het geëxtrudeerde materiaal sneller te laten afkoelen..

Daarnaast wordt er luchtdruk direct op het hotend toegepast. Het koelen van het hotend van een 3D-printerextruder is essentieel om de printkwaliteit te waarborgen en technische problemen tijdens het printen te voorkomen.

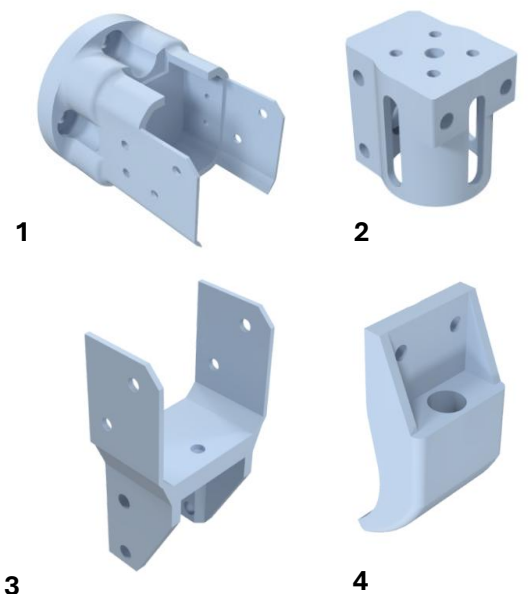
Concept 1 bestaat uit 4 onderdelen:

1. Extruderbehuizing
2. Hotendbehuizing
3. Tussenadapter
4. Fan duct

Alle 4 de onderdelen kunnen ge-3Dprint worden. En zijn hier onder te zien. (5)

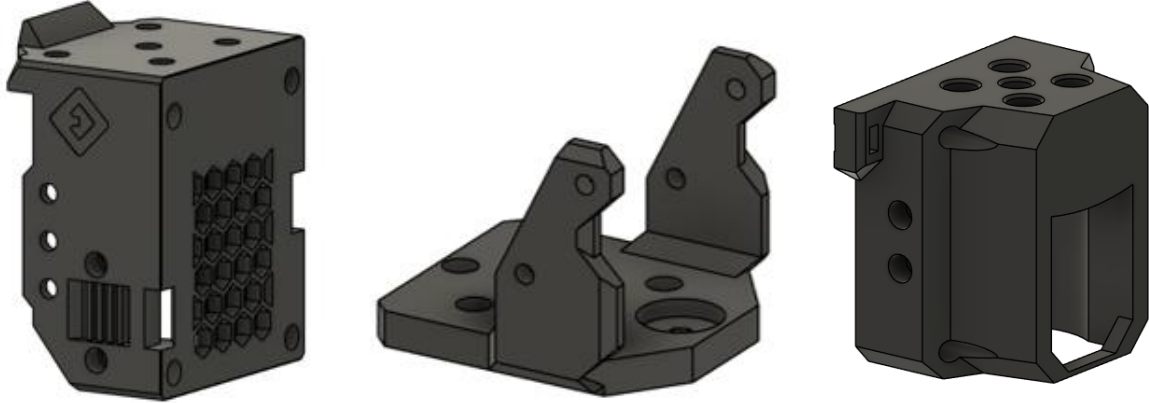


Figuur 2: Concept 1



5.3.2 CoboPrint

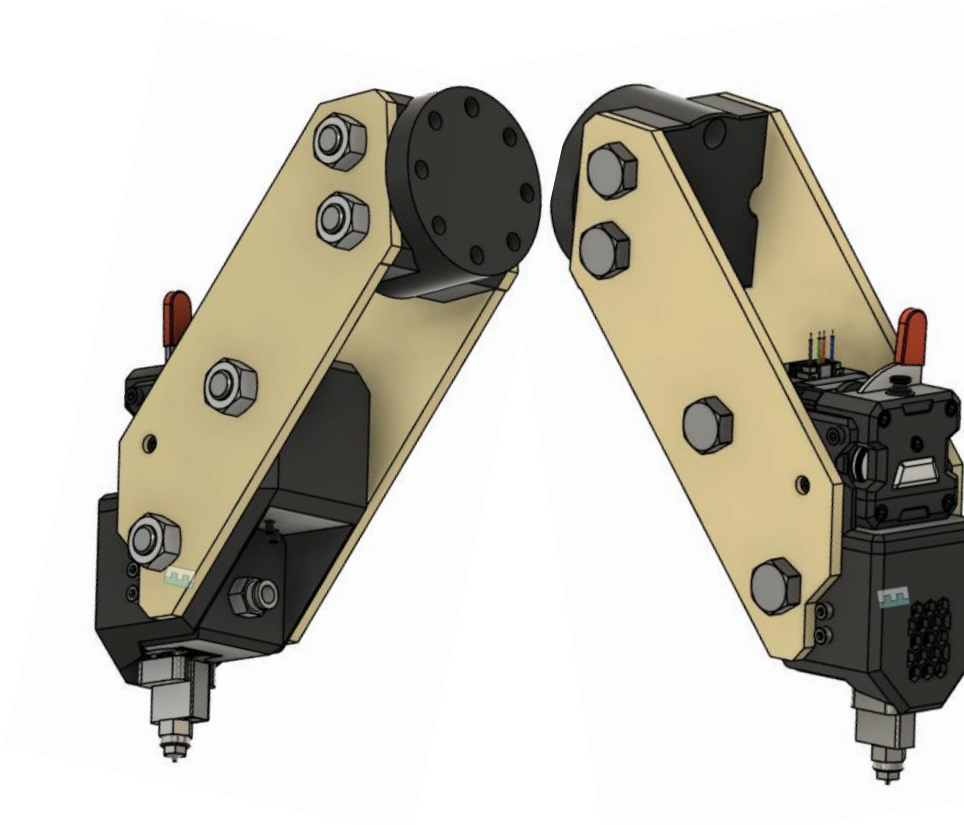
Voor concept 2 is er inspiratie genomen uit de printkop van Massive Dimension (MDAC1 3D Printing Cell Kit - ABB GoFa Cobot). Daarnaast is het **EVA 3 printkop platform** (Marschall, 2022) als basis gebruikt, waarbij gebruik is gemaakt van kennis en ervaring opgedaan tijdens de bouw van een eerdere zelfgebouwde 3D-printer.



Figuur 3

In figuur 3 zijn de drie onderdelen te zien die als basis hebben gediend. Deze onderdelen zijn zodanig aangepast dat ze, met behulp van twee lasergesneden houten platen, aan een koppelstuk konden worden gemonteerd. Dit koppelstuk wordt vervolgens weer op de cobot bevestigd. Om dit te realiseren, waren lange bouten nodig om beide platen stevig te klemmen met de 3D-geprinte onderdelen. De enige geschikte bouten die op school beschikbaar waren, hadden een diameter van 10 mm, wat resulteerde in een wat robuuster uiterlijk van het geheel (figuur 4).

Aan de achterzijde is een pneumatische connector toegevoegd voor de koeling van de hotend. Het concept is zo eenvoudig mogelijk ontworpen om snel een prototype te kunnen realiseren en de eerste tests uit te voeren.



Figuur 4

5.4 Succescriteria

Criteria.	Weging.	Concept 1	CoboPrint
	1 T/M 5	1 T/M 5	1 T/M 5
Gebruiksvriendelijkheid			
De end effector moet zo makkelijk mogelijk in elkaar gemonteerd kunnen worden.	3	$3 \times 4 = 12$	$3 \times 4 = 12$
De end effector moet zo makkelijk mogelijk gepositioneerd kunnen worden op de robot	4	$4 \times 4 = 16$	$4 \times 3 = 12$
De end effector moet zo licht mogelijk zijn	3	$3 \times 4 = 12$	$3 \times 3 = 12$
Duurzaamheid / kwaliteit			
De end effector moet een zo lang mogelijke levensduur hebben.	5	$5 \times 3 = 15$	$5 \times 4 = 20$
De end effector moet robuust mogelijk zijn	4	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 5 = 20$
Kostprijs moet zo laag mogelijk zijn	4	$4 \times 4 = 16$	$4 \times 3 = 12$
Veiligheid			
De hotend moet zo minimaal mogelijk blootgesteld zijn	5	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 4 = 20$
Er moeten zo min mogelijk objecten uitsteken	4	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 4 = 16$
Totaal		115	124

5.5 Conclusie

Uit de tabel met succescriteria blijkt dat CoboPrint een hogere totaalscore (124) behaalt dan Concept 1 (115). Dit betekent dat CoboPrint beter aansluit bij de gestelde eisen op het gebied van gebruiksvriendelijkheid, duurzaamheid/kwaliteit en veiligheid. Vooral de hogere scores bij de criteria "duurzaamheid/kwaliteit" en "veiligheid" dragen bij aan de betere totale prestatie van CoboPrint.

Hoewel de scores dicht bij elkaar liggen, is uit de realisatie van beide concepten gebleken dat CoboPrint beter presteert. Dit kwam met name door de toevoeging van tussenplaten die als extra arm dienen, waardoor de robot meer bewegingsvrijheid heeft. Dit voordeel werd tijdens het testen duidelijk zichtbaar en was vooraf moeilijk te voorspellen. Daarnaast bieden de zijplaten ruimte voor kabels en perslucht, wat een praktisch voordeel is (figuur 5)

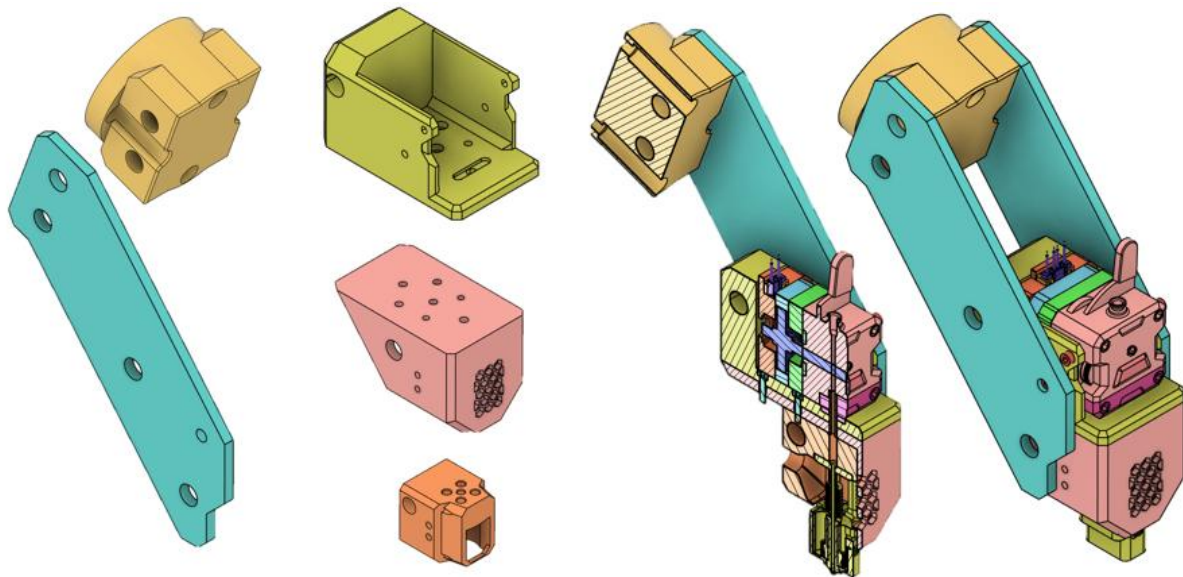
Voor het detailontwerp zal daarom verder worden gewerkt aan CoboPrint.



Figuur 5

6. Detailontwerp

Uit het succescriteria tabel is er een concept uitgekomen met de meeste punten, dit is concept CoboPrint. Dit concept wordt door ontwikkelen. Voor extra feedback was er een pitch presentatie ingepland waardoor we feedback kregen van de opdrachtgevers.



Figuur 6

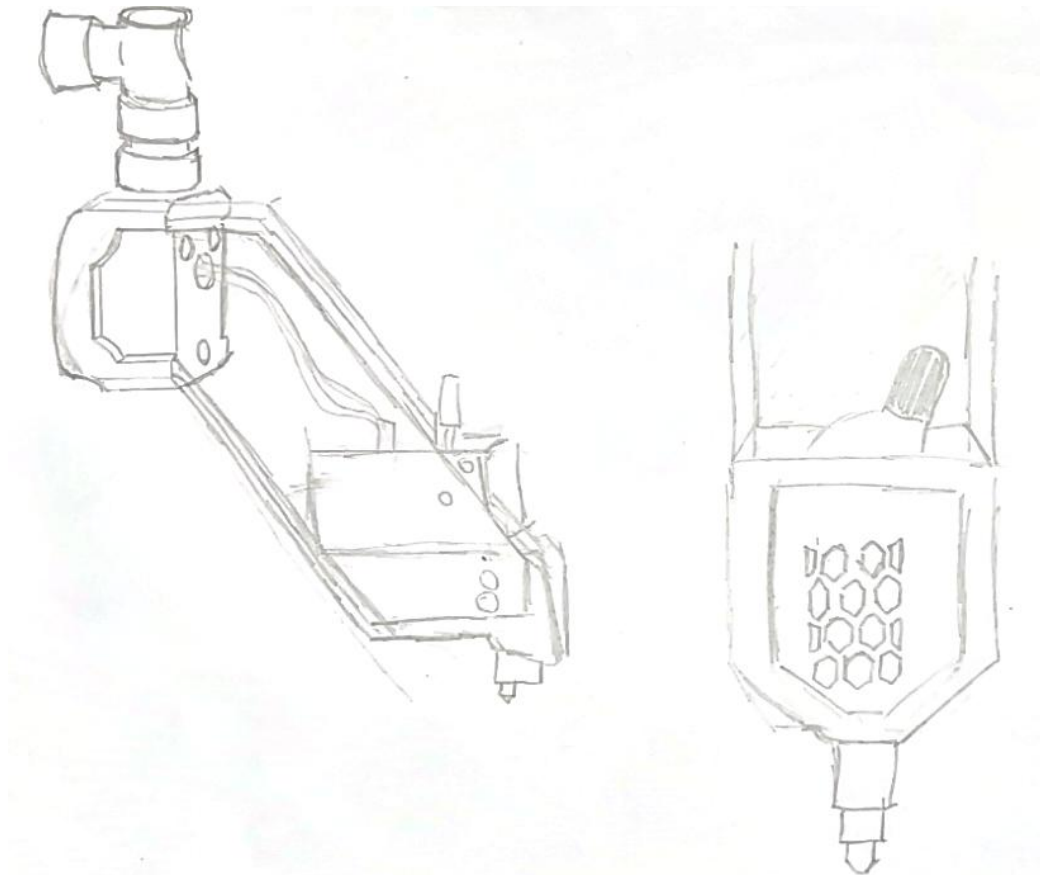
6.1 Feedback

Dit zijn enkele feedbackpunten die we na de pitch van de opdrachtgevers ontvingen. Mondeling werd daarnaast besproken dat de opdrachtgevers graag zien dat het ontwerp meer een geheel vormt en bij voorkeur de rondingen van de cobot volgt. Ook zijn er enkele theoretische budgetkaders besproken, wat helpt bij het schetsen van de mogelijkheden en beperkingen voor de volgende iteratie. Op basis hiervan zouden we bijvoorbeeld kunnen overwegen om aluminium of carbonfiber platen te gebruiken, indien dit wenselijk en haalbaar is.

Verder werd benadrukt dat de opdrachtgevers vertrouwen hebben in onze ontwerpvaardigheden en erop rekenen dat alle designkeuzes goed overwogen zullen worden. Dit geeft ons de ruimte om zelfstandig beslissingen te nemen en een goed doordacht eindproduct te leveren.

- Voeg kabelgeulen toe
- Maak het ontwerp eleganter (lijkt meer op een geheel)
- Maak het monteren van de printkop 1 stap
- Maak gebruik van kleinere bouten
- Voeg materiaal koeling toe
- Kijk naar andere materiaalkeuzes voor de platen
- Montage punten toevoegen voor accessoires

6.2 Schets CoboPrint v2



Figuur 7

Figuur 7 is het conceptschets van **CoboPrint v2**. Bij dit concept zijn de ontvangen feedbackpunten zorgvuldig meegenomen in de overwegingen. Er is bewust gekozen om verder te gaan met dezelfde ontwerpfilosofie als bij het oorspronkelijke CoboPrint-concept, omdat dit de fabricage eenvoudiger, goedkoper en efficiënter maakt.

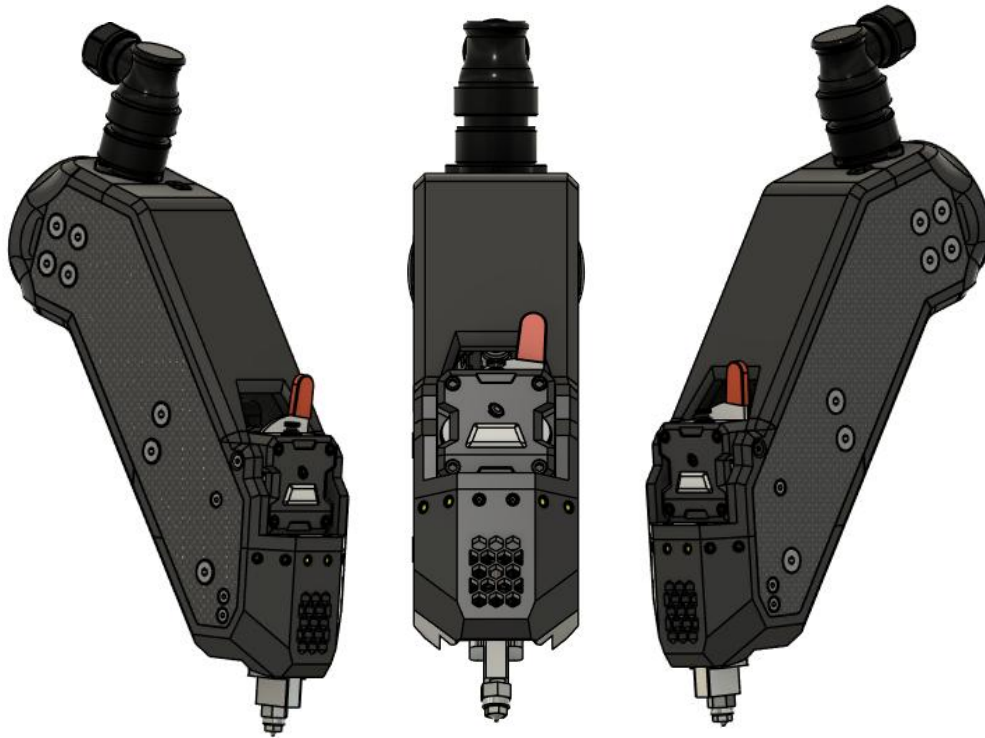
Daarnaast is nagedacht over een netter en esthetischer ontwerp. Dit begint met een 3D-geprint onderdeel dat de verbinding met de cobot vormt. Dit onderdeel loopt vloeiend over van een ronde vorm naar een wat vierkantere vorm, waarmee de carbonfiber plaat subtiel wordt omhuld voor een elegante uitstraling. Deze ontwerpkeuze is doorgevoerd in alle onderdelen van de printkop, wat zorgt voor een consistent en doordacht geheel.

Opsomming van overige designpunten:

- Platen van 4mm carbonfiber met countersunk gaten
- RVS hex socket countersunk head screw 5mmx50
- RVS Hulsmoer 5mm
- Carbonplaat verwerken in 3d print
- 3d print dekplaten om de kabels weg te werken waar het nu open is
- Magneten verwerken in de 3d prints voor de dekplaten
- Kabels via een connector aan de bovenkant uit

6.3 CoboPrint v2

CoboPrint v2 is een doorontwikkeling van Coboprint v1 dat is terug te zien in de basis. Alle punten die genoemd zijn bij de feedback en bij de schets van CoboPrint v2 zijn verwerkt in dit nieuwe 3d model.



Figuur 8

In figuur 9 en 10 is te zien dat de alles nu afgedekt is met platen waardoor de kabels niet meer te zien zijn en het CoboPrint v2 een eleganter uiterlijk krijgt. In figuur 9 wordt weergegeven hoed de 3 bouten (blauw cirkel) bereikbaar zijn van de voorkant.



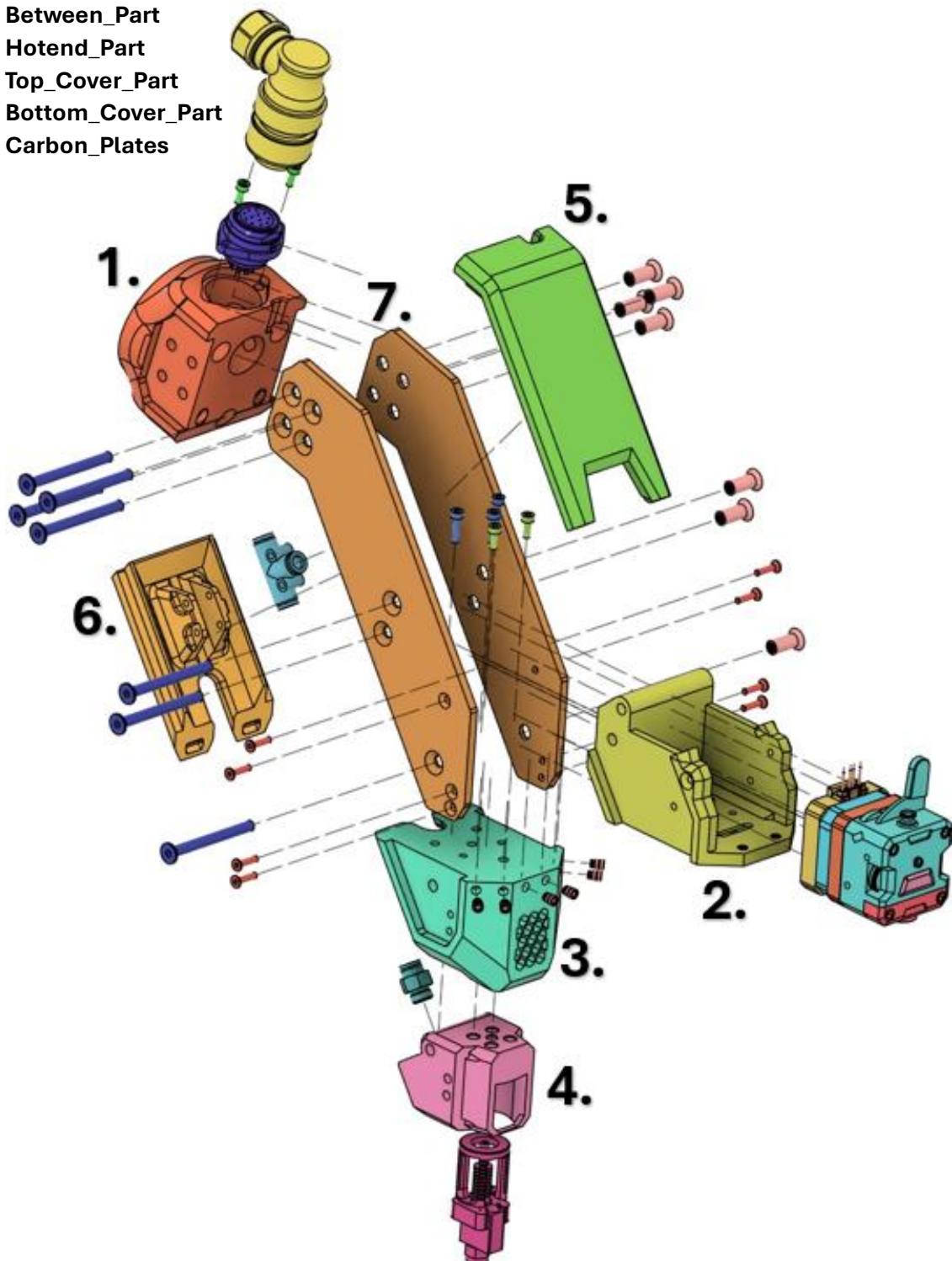
Figuur 9

6.3.1 Exploded View

Om de exploded view overzichtelijker te houden (figuur 10) zijn kleuren toegepast aan de verschillende onderdelen van de CoboPrint v2. De genummerde onderdelen zijn custom onderdelen.

Legenda exploded view:

1. Connector_Part
2. Extruder_Part
3. Between_Part
4. Hotend_Part
5. Top_Cover_Part
6. Bottom_Cover_Part
7. Carbon_Plates



Figuur 10

7. Grasshopper

7.1 Inleiding

Grasshopper is een visueel programmeerplatform dat draait binnen Rhinoceros 3D, een software voor 3D-modellering. Grasshopper maakt gebruik van een node-based interface waarin je grafische componenten verbindt om complexe geometrieën, algoritmen en workflows te ontwerpen, zonder dat je direct hoeft te programmeren in een tekst-gebaseerde taal. Grasshopper wordt veel gebruikt in architectuur, industrieel ontwerp en andere disciplines waar parametrisch ontwerp en computational design een rol spelen.

Grasshopper kan ook gebruikt worden voor het aansturen van robots. Zo is er een plugin voor grasshopper die dat ondersteunt genaamd Robotics. Deze plugin heeft een aantal hulp tools die het aansturen van robots een stuk eenvoudiger maakt.

Voor ons project gebruiken wij Grasshopper voor het 3D-modelleren van het object dat we willen printen, maar ook voor het genereren van de toolpaden. Daarnaast simuleren we met Grasshopper de bewegingen van de robotarm om te controleren of alles correct verloopt en eventuele problemen tijdig op te sporen.

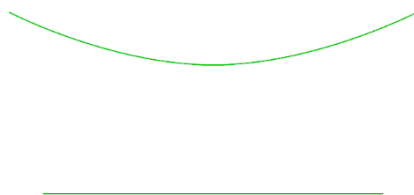
7.2 Toolpaths

Om de robotarm de juiste bewegingen te laten uitvoeren, maken we gebruik van toolpaths. Wij werken met een ABB Cobot, die gebruikmaakt van de programmeertaal RAPID. In de RAPID-code worden coördinaten en oriëntaties gespecificeerd waarop de robotarm reageert. Het is daarom essentieel om deze informatie vanuit ons Grasshopper-programma te genereren. Dit proces verloopt als volgt:

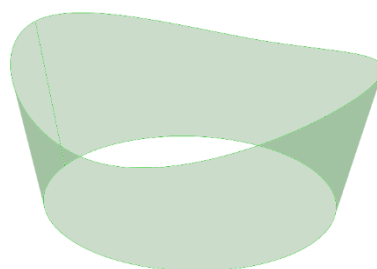
We beginnen met het ontwerpen van een structuur die we willen printen. Het doel is om een vorm te creëren die non-planar is en met multi-axis technieken wordt geprint. Een isocurve is hiervoor een geschikt voorbeeld om als basis te gebruiken.

We maken gebruik van twee cirkels (1), waarbij we de bovenste cirkel opdelen in vier punten (2). Twee van deze punten verhogen we met een bepaalde afstand. Hierna kunnen we opnieuw een lijn trekken tussen deze punten. Hierdoor ontstaat een polyline met een lichte bolling erin. (3)

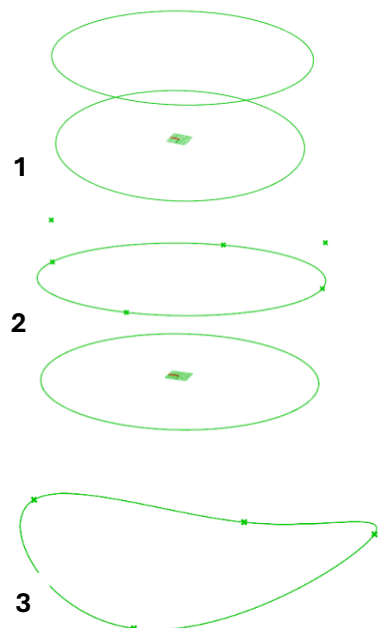
Ook schalen we deze cirkel met een factor van 1.2, zodat hij iets groter wordt dan de onderste cirkel (4). Als laatste stap gebruiken we een *ruled surface* om de lijnen met elkaar te verbinden. (5)



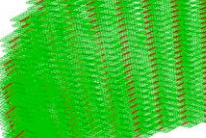
4



5



6



Panel			{0}
0	O(552.00, 62.00, 5.00)	Z(-0.00, -0.00, -1.00)	
1	O(552.00, 52.00, 5.00)	Z(0.00, -0.26, -0.97)	
2	O(542.54, 51.10, 5.00)	Z(0.06, -0.25, -0.97)	
3	O(533.42, 48.42, 5.00)	Z(0.10, -0.23, -0.97)	
4	O(524.97, 44.06, 5.00)	Z(0.14, -0.22, -0.97)	
5	O(517.50, 38.19, 5.00)	Z(0.19, -0.20, -0.96)	
6	O(511.27, 31.00, 5.00)	Z(0.25, -0.18, -0.95)	
7	O(506.52, 22.77, 5.00)	Z(0.32, -0.16, -0.93)	
8	O(503.41, 13.79, 5.00)	Z(0.40, -0.11, -0.91)	
9	O(502.06, 4.38, 5.00)	Z(0.44, -0.03, -0.90)	
10	O(502.51, -5.12, 5.00)	Z(0.43, 0.07, -0.90)	
11	O(504.75, -14.35, 5.00)	Z(0.36, 0.14, -0.92)	
12	O(508.70, -23.00, 5.00)	Z(0.28, 0.17, -0.94)	
13	O(514.21, -30.74, 5.00)	Z(0.22, 0.14, -0.96)	
14	O(521.09, -37.30, 5.00)	Z(0.17, 0.21, -0.96)	
15	O(529.09, -42.44, 5.00)	Z(0.12, 0.23, -0.97)	
16	O(537.91, -45.97, 5.00)	Z(0.08, 0.24, -0.97)	
17	O(547.25, -47.77, 5.00)	Z(0.03, 0.26, -0.97)	
18	O(556.75, -47.77, 5.00)	Z(-0.03, 0.26, -0.97)	
19	O(566.09, -45.97, 5.00)	Z(-0.08, 0.24, -0.97)	

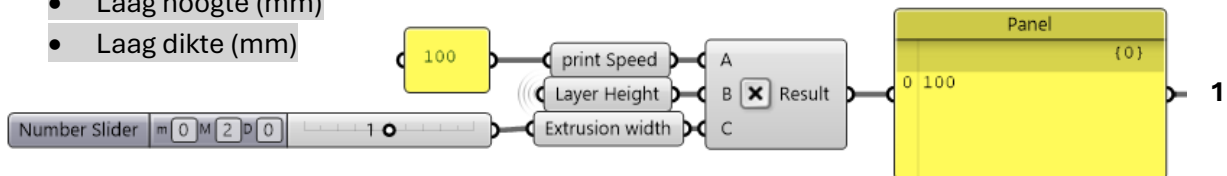
9 Coördinaties | Oriëntatie

Wanneer we de data bekijken die hieruit voortkomt, zien we dat er tweemaal drie waardes worden gegenereerd. Hiermee zijn zowel de coördinaten als de oriëntatie van elke plane bekend. (9) Dit vormt de basis voor het aansturen van de robot met nauwkeurige positionering en richting.

7.3 Flowrate

Nu het object ontworpen is en alle coördinaten en oriëntaties berekend zijn, kan de robot het gehele pad afgaan en zou het object geprint kunnen worden. Wat er alleen nog mist is de Flowrate (E). De flowrate is de hoeveelheid filament dat geëxtrudeerd moet worden. De flowrate is te berekenen met 3 parameters:

- Print snelheid (mm/s)
- Laag hoogte (mm)
- Laag dikte (mm)

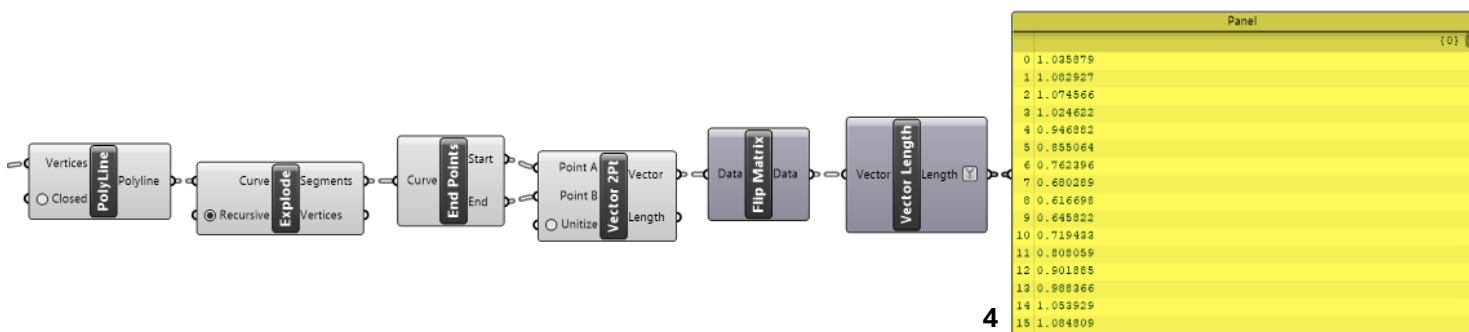
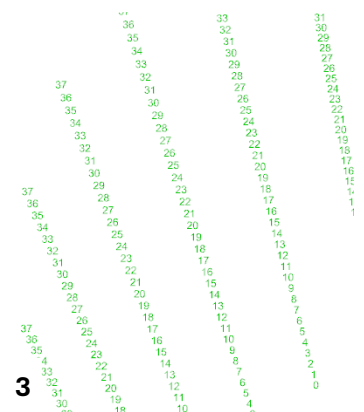
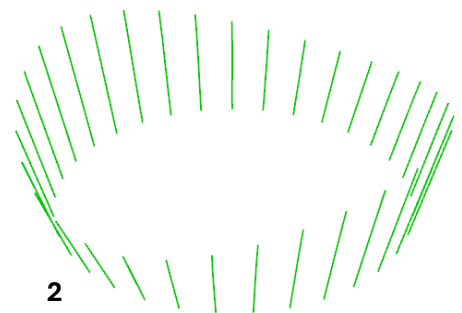


Als we deze met elkaar vermenigvuldigen zal de uitkomst de gewenste flowrate zijn in mm^3/s . (1)

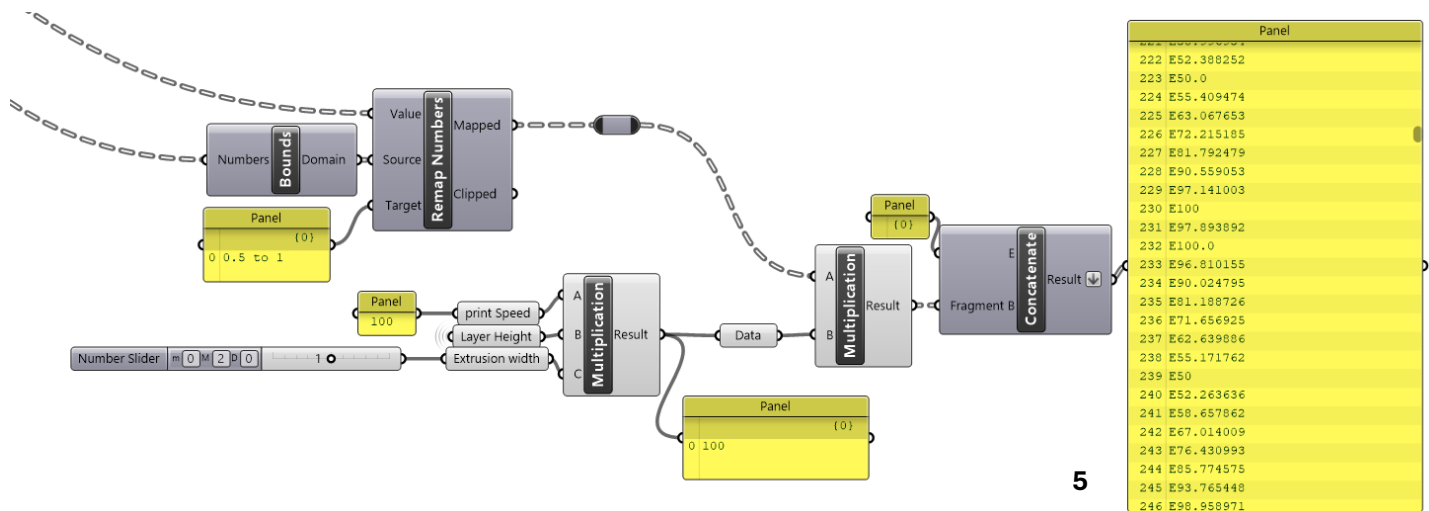
Echter werkt bovenstaande formule alleen als de parameters constant zijn, in ons geval is bij de ISO curve de laaghoogte variabel en zal dit niet werken en moet er een berekening worden gemaakt om de flowrate te berekenen. Om dit berekenen is het van belang om de laag hoogte op elk punt te berekenen.

Dit doen we door verticale lijnen te trekken door elk punt die vorig hoofdstuk is aangemaakt. In afbeelding (2) lijkt het 1 doorgetrokken lijn maar deze lijn bestaat uit allemaal kleine fragmenten. Als we de eind punten van deze lijnen pakken en ze nummeren is te zien dat elke lijn bestaat uit 37 punten. (3) Door de lengte te pakken tussen deze punten hebben we dus per punt een waarde die dus de laaghoogte representeert. (4)

Hier onder is het script te zien die de afstand tussen de punten berekenend.



De gemeten lengtes willen we omzetten naar een vermenigvuldigingsfactor, waarbij de grootste waarde wordt geschaald naar 1 en de kleinste waarde minimaal 0,5 is. Dit zorgt ervoor dat elk punt een waarde krijgt tussen 0,5 en 1. Deze factor wordt vervolgens gebruikt als vermenigvuldigingsfactor voor de originele flowrate. Hierdoor kunnen we een variabele flowrate genereren voor elk punt. Deze variabele flowrate wordt uiteindelijk toegevoegd aan de RAPID-code, zodat de robotarm tijdens het printen de juiste hoeveelheid materiaal kan doseren op basis van de specifieke behoeften per punt. (5)



7.4 Visualisatie

Grasshopper wordt ook gebruikt om de omgeving van de robotarm te visualiseren en te simuleren. Door deze functionaliteit kan nauwkeurig worden gecontroleerd of de bewegingen van de robotarm overeenkomen met de verwachtingen en de gestelde doelen. Het gebruik van simulaties biedt een veilige en efficiënte manier om het gedrag van de robotarm te evalueren voordat deze daadwerkelijk wordt ingezet in de praktijk.

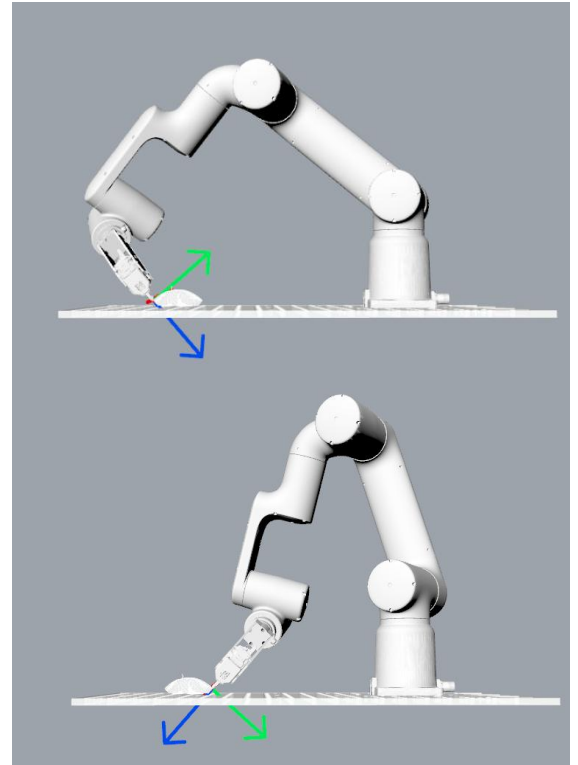
Grasshopper maakt het gemakkelijk om fouten in het ontwerp of de programmering van de robotarm op te sporen. Zo kan bijvoorbeeld worden geanalyseerd of bewegingsbanen de gewenste efficiëntie hebben of dat er obstakels worden geraakt. Daarnaast kan botsingsdetectie worden gevisualiseerd, waardoor potentiële schade aan de robotarm, werkstukken of de omgeving kan worden voorkomen.

Naast de visuele controle op posities en oriëntaties, kunnen in Grasshopper ook dynamische eigenschappen van de robotarm worden geanalyseerd. Denk hierbij aan:

- Snelheid en acceleratie tijdens bewegingen.
- De Zone, hoe nauwkeurig de punten worden benaderd. Hierbij is 0.1 heel nauwkeurig en 100 heel grof.
- De impact van plotselinge stops of wijzigingen in het bewegingspad of singulariteiten

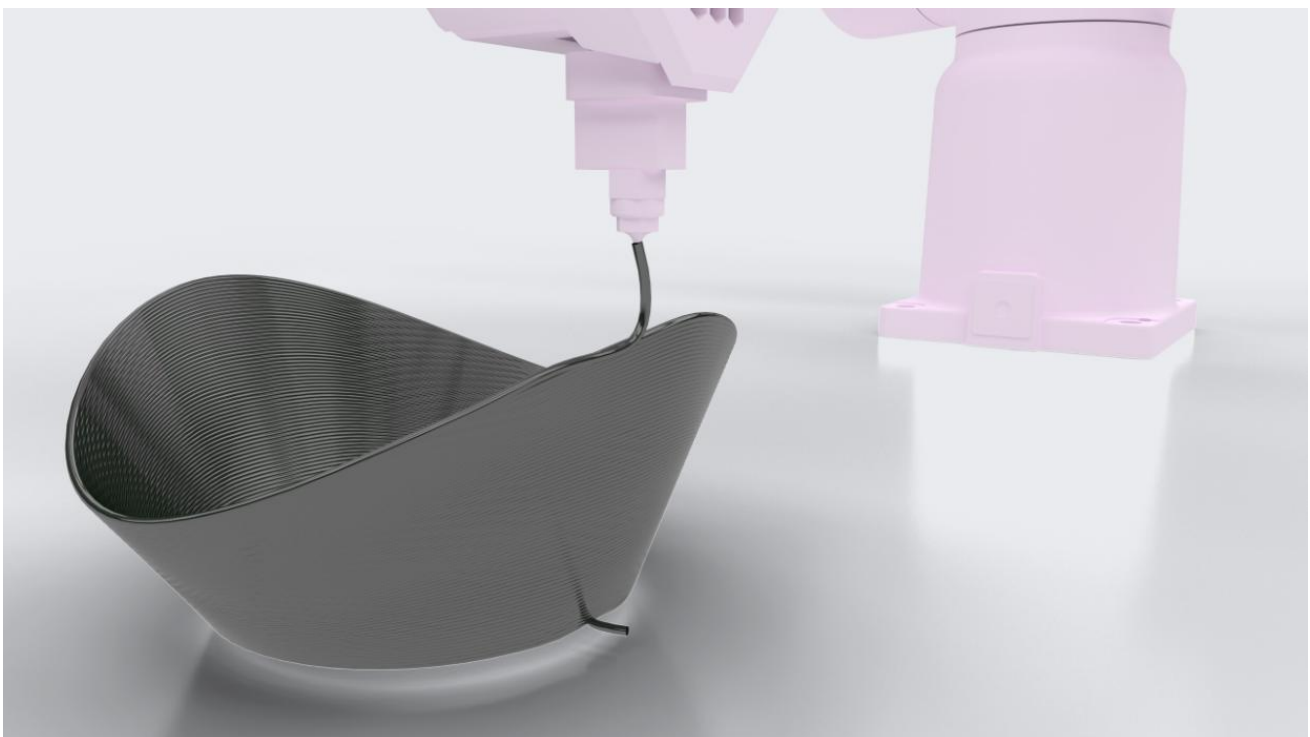
Een belangrijk aspect van de simulatie in Grasshopper is de mogelijkheid om het Tool Center Point (TCP) zichtbaar te maken. (1) Het TCP vertegenwoordigt het punt waar de gereedschappen of de end effector van de robotarm zich bevinden en is essentieel voor het uitvoeren van nauwkeurige taken. In Grasshopper kan niet alleen de positie van het TCP worden weergegeven, maar ook de oriëntatie ervan. Dit geeft inzicht in:

- **De exacte positie van het TCP in de 3D-ruimte:** Hiermee kan worden gecontroleerd of de robotarm het gewenste doel nauwkeurig bereikt.
- **De snelheid en versnelling van het TCP:** Dit is vooral belangrijk in dynamische omgevingen of bij taken waarbij precisie cruciaal is, zoals het hanteren van kwetsbare objecten.
- **Het pad dat het TCP volgt tijdens een taak:** Visualisatie van de bewegingsbaan kan inzicht geven in de efficiëntie en mogelijke optimalisaties van de bewegingen.



1

Tenslotte kunnen er specifieke functies worden gebruikt om het 3D-geprinte object zo realistisch mogelijk te visualiseren. (2) Deze functies maken het mogelijk om een nauwkeurig beeld te krijgen van hoe het object eruit zal zien na het voltooien van het printproces. Dit biedt niet alleen een voorproefje van het uiteindelijke resultaat, maar helpt ook bij het identificeren van mogelijke verbeteringen of aanpassingen voordat het ontwerp wordt geprint.



2

```

ROBOT CODE
(0:0:0:0)

0 SocketCreate mySocket;
1 SocketConnect mySocket, "192.168.125.2", 5009;
2 SocketSend mySocket \Str = "START_EXTRUSION";
3 <empty>
4 MODULE Cube_V1_F_RGB1
5 VAR extobjint extj := [SE9,SE9,SE9,SE9,SE9,SE9];
6 VAR confdata conf := [[0,0,0,0],
7 PERS tooldata Pick_Place:=TRUE,[[131.403,0,182.194],[0.81614,0,0.57786]],[[2],[131.403,0,182.194],[1,0,0,0],[0,0,0]],
8 TASK PERS wobjdata DefaultFrame:=[FALSE,TRUE,"",[0,0,0],[1,0,0,0],[0,0,0],[1,0,0,0]],
9 TASK PERS speeddata Speed000:=[1000,180,500,1080],
10 TASK PERS speeddata Speed001:=[100,180,500,1080],
11 TASK PERS somedata Zone000:=[FALSE,0.1,0.1,0.1,0.01,0.1,0.01],
12 TASK PERS somedata Zone001:=[FALSE,0.3,0.3,0.3,0.03,0.3,0.03],
13 PROC Main()
14 ConfL Off;
(0:0:1:0)

0 SocketCreate mySocket;
1 SocketConnect mySocket, "192.168.125.2", 5009;
2 SocketSend mySocket \Str = "START_EXTRUSION";
3 <empty>
4 MoveAbsJ [0,18,18,0,5,-10],extj,Speed000,Zone000,Pick_Place;
5 Move [352,62.5],[0,0.70711,0.70711,0],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
6 Move [352,52.5],[0,-0.09073,0.70126,0.70126,-0.09073],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
7 Move [342.537,51.096,5],[0.06875,0.70376,-0.6987,0.10869],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
8 Move [332.417,48.418,5],[0.04857,0.70544,-0.69649,0.12209],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
9 Move [324.568,44.063,5],[0.02856,0.70653,-0.69364,0.13735],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
10 Move [317.496,38.187,5],[0.00556,0.70708,-0.68882,0.15971],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
11 Move [311.271,31.003,5],[0.02859,0.70663,-0.68016,0.19386],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
12 Move [306.518,22.771,5],[0.07368,0.70326,-0.66585,0.23799],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
13 Move [302.409,12.788,5],[0.1449,0.6921,-0.65001,0.27836],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
14 Move [302.057,4.379,5],[0.23418,0.6672,-0.63309,0.27106],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
15 Move [302.509,-3.116,5],[0.28444,-0.64738,0.68143,-0.18881],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
16 Move [304.75,-14.253,5],[0.26068,-0.6573,0.69905,-0.10617],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
17 Move [308.699,-23,5],[0.21472,-0.67372,0.70532,-0.04721],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
18 Move [314.219,-30.743,5],[0.17456,-0.68512,0.70705,-0.00866],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
19 Move [321.052,-37.303,5],[0.14734,-0.69159,0.70688,0.01771],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
20 Move [329.089,-42.442,5],[0.12915,-0.69521,0.70605,0.03689],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
21 Move [337.913,-45.975,5],[0.11551,-0.69761,0.70468,0.05851],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
22 Move [347.247,-47.774,5],[0.10078,-0.69995,0.70263,0.07949],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place \WObj:=DefaultFrame;
23 Move [356.759,-47.774,5],[0.07845,0.70263,-0.69585,-0.10078],conf,extj,Speed001,Zone001,Pick_Place

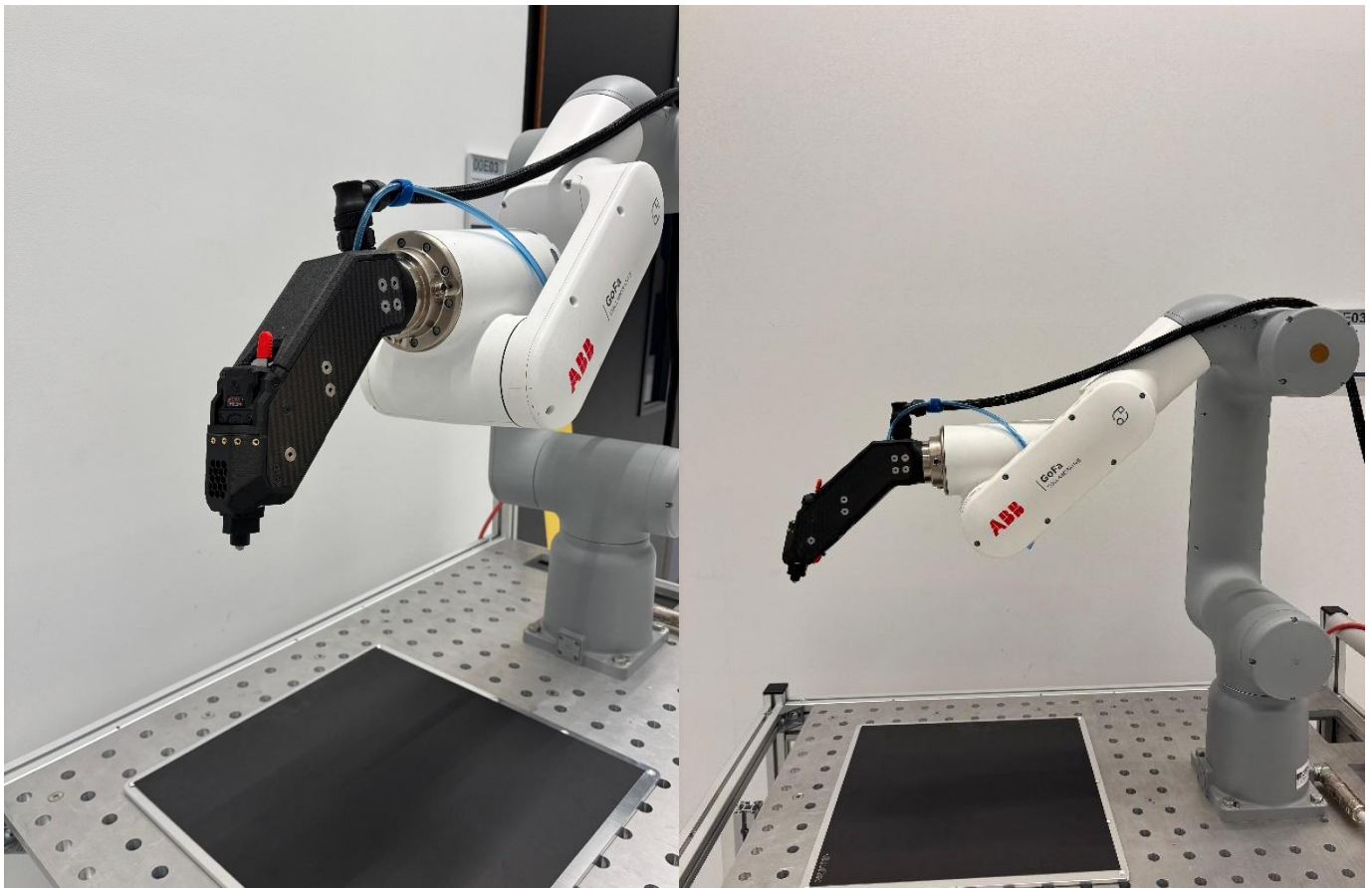
```

8. Resultaten

In de afgelopen periode is het projectteam erin geslaagd een 3D-geprinte end effector te ontwikkelen die samenwerkt met een ABB-cobot. Dit resultaat is bereikt door een samenwerking tussen studenten elektrotechniek (ET) en werktuigbouwkunde (WTB), waarbij zij hun expertise hebben gebundeld tot een succesvol beroepsproduct.

De ontwikkelde end effector is in staat tot multi-axis en non-planar printen, dankzij de geavanceerde toolpaden die gegenereerd zijn met Grasshopper. In Bijlage A wordt dit weergegeven.

Het projectteam heeft met CoboPrint v2 (figuur 11 toont het opgeleverde eindresultaat) een betrouwbare, veilige en intuïtieve 3D-printopstelling ontwikkeld voor collaboratieve robots. De technische doelstellingen zijn grotendeels behaald en de opstelling is klaar voor demonstratie en inzet in educatieve omgevingen. Verdere ontwikkeling zou zich kunnen richten op optimalisatie van koeling en gebruiksvriendelijkheid bij kleur- of materiaalwissels.



Figuur 11

Bibliografie

Cuevas, D. G. (sd). *Advanced 3D printing with grasshopper*.

Keije Roozendaal, Sven Dekker, Mats van der Vliet, Miguel Chacon Jimenez, Gijs de Jongh. (2025). *Integraalprojectverslag 3D-Printing with Co-Bots [WTB]*. Amsterdam: HvA.

Marschall, M. S. (2022). *EVA*. Opgehaald van main.eva-3d: <https://main.eva-3d.page/>

MDAC1 3D Printing Cell Kit - ABB GoFa Cobot. (sd). Opgehaald van Massive Dimension: https://massivedimension.com/products/mdac1-3d-printing-cell-kit?pr_prod_strat=e5_desc&pr_rec_id=f3525dd62&pr_rec_pid=7257257050160&pr_ref_pid=7204153065520&pr_seq=uniform

BIJLAGE A

In de projectmap is het bestand *Voorbeeldprint.mp4* te vinden, waarin de CoboPrint v2 wordt onderworpen aan een stresstest met een complexe printopdracht.