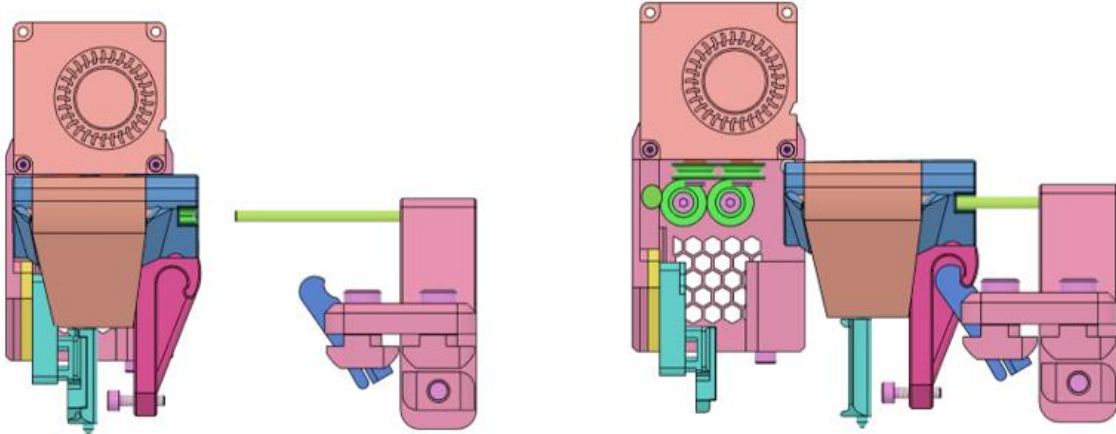


Hybrid_Changer

Stageverslag



Opdrachtgever

FabLab

Henk Buursen

waag@emails.homerun.co

Onderwijsinstelling

Hogeschool van Amsterdam

Begeleider

Rogier Haas

r.d.r.haas@hva.nl

Datum en plaats

25-Jan-24

Nieuwmarkt 4, Amsterdam

Auteur

Sven Dekker

Version

1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbr gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door print-outs, kopieën, of op welke manier dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Hogeschool Amsterdam.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	2
Figuren- en tabellenlijst	4
Begrippenlijst	5
Samenvatting	7
1. Inleiding	8
1.1 Onderzoeksonderwerp	8
1.2 Opdracht.....	8
2. Probleemstelling en hoofd- en deelvragen	9
2.1 Probleemstelling.....	9
2.2 Afbakening/Doelstelling.....	9
2.3 Hoofdvraag.....	10
2.4 Deelvragen	10
3. Onderzoek	11
3.1 Welke specifieke Multi-material 3D printing producten bestaan er?	11
3.2 Welke toolchangemethodes bestaan er bij andere productiemachines?	11
3.3 Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget?	11
3.4 Welke mogelijkheden zijn er tussen de slicer en G-code?	11
3.4.1 Tools for klipper (KTCC – Klipper Tool Changer Code).....	11
3.4.2 ROME	12
3.4.3 Happy Hare	12
3.4.4 ERCF-Software-V3 aka "Happy Hare v1"	12
3.5 Welke technieken kunnen van materiaal wisselen binnen 30 seconden en verspillen geen plastic?	12
4. Programma van eisen	13
4.1 Eisen.....	13
4.2 Succescriteria.....	13
5. Functieanalyse	14
6. Brainstorm	15
6.1 Gedachtegang.....	16
6.1.1 SWOT-analyse.....	16
7. Morfologisch overzicht	17
8. Experimenteren	18
8.1 Koop onderdelen	18
8.1.1 Pogo Pin.....	18
8.1.2 Tapchanger	19
8.1.3 Mini latch	19
8.1.4 V-groef lager.....	19
9. Conceptontwerpen	20
9.1 Leerproces	20
9.2 Nieuwe richting.....	22
9.3 Hybrid_Changer	22

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

9.4	Hybrid_Changer Lite	23
10.	Keuzematrix	24
10.1	Weegfactoren	24
10.2	Keuze matrix	25
10.3	Gekozen concept	25
11.	Detaillering	26
11.1	Samenstellingstekening	26
11.2	Onderdelentekening	27
11.3	Exploded view	29
12.	Bouwverslag	30
12.1	Installatie ERCF	30
12.2	Prototypes	30
12.2.1	Toepassen lineaire verbinding	31
12.2.2	Implementatie van het docking mechanisme	32
12.2.3	Ontwikkeling Dock_Mount.....	32
12.2.4	Ontwerpen Front_Changer	32
12.2.5	Iteraties Tool_Body	33
12.3	Software	34
12.3.1	Slicer.....	34
12.3.2	KTCC.....	34
12.3.3	Macro's.....	35
13.	Evaluatie.....	35
13.1	Programma van eisen	35
13.1.1	Voldoet ons ontwerp aan de Eisen	36
14.	Resultaten	37
14.1.1	Vergelijken.....	37
15.	Conclusie	38
15.1	Aanbevelingen.....	38
16.	Bibliografie.....	39
	Appendix A: Probleemstelling	41
	Appendix B: Welke specifieke Multi-material 3D printing producten bestaan er?	44
	Appendix C: Welke toolchangemethodes bestaan er bij andere productiemachines?	51
	Appendix D: Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget?.....	53
	Appendix E: Macro's.....	55

Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1	9
Figuur 2	9
Figuur 3 Functieboom	14
Figuur 4 Brainstormsessie	15
Figuur 5	18
Figuur 6	18
Figuur 7 Tapchanger	19
Figuur 8 V-groef lagers	19
Figuur 9 Printhead.....	20
Figuur 10 Schets Tapchanger 90° gedraaid	21
Figuur 11 Dimensie 1 = 16,50mm, 2 = A1 Hotend en 3 = Ruimte voor mechaniek	21
Figuur 12 Links verlengde arm	22
Figuur 13 Hybrid_Changer.....	22
Figuur 14 Hybrid_Changer Lite	23
Figuur 15	25
Figuur 16	25
Figuur 17 Samenstellingstekening	26
Figuur 18 Onderdelentekening	27
Figuur 19 Exploded view	29
Figuur 20	30
Figuur 21 Prototypes	31
Figuur 22	31
Figuur 23	32
Figuur 24	33
Figuur 25	34
Figuur 26	35
Figuur 27	36
Figuur 28	37
Figuur 29 MMU	41
Figuur 30 Filament splicing	41
Figuur 31 Dual switching hotend.....	42
Figuur 32 Dual nozzle hotend	42
Figuur 33 IDEX.....	42
Figuur 34 Toolchanger	43
Figuur 35	43
Figuur 36	43
Figuur 37 ERCF	44
Figuur 38 Palette 3.....	44
Figuur 39	45
Figuur 40	46
Figuur 41	46
Figuur 42	46
Figuur 43 3DChameleon	47

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Figuur 44 ROME	47
Figuur 45 Bambu Lab met AMS.....	48
Figuur 46 A1-mini met AMS Lite	48
Figuur 47	49
Figuur 48 E3D Toolchanger.....	49
Figuur 49 The MUTANT V2	49
Figuur 50 XChange	50
Figuur 51	50
Figuur 52 Tapchanger.....	50
Figuur 53	51
Figuur 54	51
Figuur 55	51
Figuur 56	52
Figuur 57	52
Figuur 58	52
Figuur 59 RapidChange Revo	53
Figuur 60	53
Figuur 61	54
Figuur 62	54
Figuur 63	55
Figuur 64	55
Tabel 1 Begrippenlijst.....	5
Tabel 2	11
Tabel 3	12
Tabel 4 Eisen	13
Tabel 5 Succescriteria.....	13
Tabel 6 Morfologisch overzicht	17
Tabel 7	25
Tabel 8 Koop onderdelen.....	28
Tabel 9	35
Tabel 10 Resultaat vergelijking	37

Begrippenlijst

Tabel 1 Begrippenlijst

Begrip	Definitie
A1 Hotend	Een hotend en nozzle in één van de fabrikant Bambu Lab
Bed probe	Een sensor die wordt gebruikt om de hoogte van het printbed te meten voor een nauwkeurige afstelling.
Carriage platform	Het platform waarop de printkop (printhead) zich bevindt en beweegt, vaak deel van een 3D-printer.

Docking en undocking	Het proces van het verbinden (docking) en loskoppelen (undocking) van componenten, in dit geval een tool
Dockingstation	Een station waarin een toolhead wordt bevestigd of aangesloten, vaak gebruikt in toolchanging-systemen.
ERCF	Afkorting Enraged Rabit Carrot Feeder. Een open-source MMU.
Extruder	Het onderdeel van een 3D-printer dat verantwoordelijk is voor het voeren van filament naar de hotend.
Filament	Het materiaal dat wordt gebruikt voor het 3D printen.
Heated inserts	Metalen cilinder die aan de binnenkant schroefdraad heeft en aan de buitenkant is gekarteld. Dit wordt in print onderdelen geplaatst voor bouten en schroeven.
Hotend	Het verwarmingselement van een 3D printer waar het filament wordt gesmolten.
Infill	Het interne patroon of raster van een 3D geprint object, beïnvloedt de stevigheid en het materiaalgebruik.
MMU	Afkorting voor Multi-Material Unit, een apparaat dat wordt gebruikt om meerdere filamenten aan een 3D printer toe te voegen.
Multi-material printing	Het vermogen van een 3D printer om met meerdere materialen tegelijkertijd te printen.
Nozzle	Het mondstuk van een 3D-printer waar het gesmolten filament doorheen wordt geëxtrudeerd.
Oozing	Het ongewenst lekken van gesmolten filament wanneer de printer niet in beweging is.
Plug-ins	Software-extensies die aanvullende functies toevoegen aan in dit geval 3D printersoftware.
Printhead	De printkop van een 3D printer is verantwoordelijk voor het smelten van het filament en het neerleggen van het materiaal.
Prime tower	De prime tower helpt bij het weer doorlopen van materiaal in de nozzle voordat de volgende laag wordt geprint.
Printer	In dit verslag wordt hier "3D printer" mee bedoelt.
Print	Het geproduceerde driedimensionale object door een 3D printer.
PTFE-tube	Een buis gemaakt van polytetrafluorethyleen, vaak gebruikt in 3D-printers voor de geleiding van filament.
Slicer	Software die een 3D model in lagen snijdt en de instructies naar de 3D printer stuurt.
Tool	In dit verslag wordt met "tool" verwezen naar de Tool_Body.
Wipe tower	Een specifieke structuur die wordt geprint om overtollig materiaal uit de nozzle te verwijderen na toolchange voordat het object wordt geprint.

Samenvatting

De opdracht: Ontwikkel een systeem waardoor er met meerdere materialen geprint kan worden bij bestaande printers. Dit komt omdat bestaande technieken op de markt verschillende nadelen hebben. Het is mogelijk om op bestaande technieken te innoveren. De hoofdvraag is als volgt “Hoe kan de multi-material 3D printing add-on ontworpen worden waardoor de kosten en plastic verspilling geminimaliseerd worden?”

Het onderzoek omvatte een gedegen analyse van de bestaande markt en producten. Met de opgedaagde kennis is gebrainstormd en hieruit is het concept Hybrid_Changer ontstaan. Dit concept is gedetailleerd uitgewerkt en vervolgens gerealiseerd door middel van een groot aantal prototypes.

Het resultaat is een werkende add-on. Vergelijkingen werden gemaakt met andere producten, waaronder PrusaXL, ERCF en Bambu Lab AMS. De Hybrid_Changer bleek de laagste verspilling te hebben en met minimale plastic verspilling ook de meest economische optie te zijn.

Het onderzoek beantwoordde de hoofdvraag over het minimaliseren van kosten en plastic verspilling bij multi-material 3D printing. Het Hybrid_Changer concept biedt voordelen zoals het behoud van elektrische componenten, een passieve en onderhoudsarme tool, en een lage prijs.

Verdere aanbevelingen omvatten het toevoegen van een nozzle wiper, het gelijktijdig uitvoeren van verschillende softwareopdrachten voor tijdwinst, en het overwegen van een voorwaartse verbinding voor efficiënter gebruik van ruimte

1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het onderzoeksonderwerp geïntroduceerd en de opdracht die hieraan vasthangt.

1.1 Onderzoeksonderwerp

3D printers zijn tegenwoordig erg toegankelijk en hebben in de afgelopen decennia een enorme ontwikkeling doorgaan. Voor het aanschaffen van een degelijke printer hoef je nog geen 200 euro neer te leggen. Dit is geweldig voor iedereen in het bezit van een printer want zo worden er ook meer 3D bestanden gedeeld en nieuwe print technieken ontwikkeld. Een van de volgende ontwikkeling in deze sector is multi-material printing. Dit biedt namelijk voordelen aan zoals 3D prints waarin verschillende materialen gecombineerd kunnen worden (bijvoorbeeld een print met TPU voor een flexibel scharnier), printen met verschillende nozzle diameters (zodat infill bijvoorbeeld sneller geprint wordt), support printen dat kan oplossen in water en prints met meerdere kleuren.

Om deze redenen zijn er al meerdere oplossingen op de markt. Deze oplossingen bevatten allemaal voor- en nadelen, echter bij veel producten zijn de nadelen groter dan de voordelen. Daarom is het plan een product te ontwerpen waarin de voordelen de nadelen uitwegen.

1.2 Opdracht

“Ontwikkel een systeem waardoor er met meerdere materialen geprint kan worden bij bestaande printers”

De opdracht heeft de volgende randvoorwaarde:

- Twee of meer materialen printen
- Toepasbaar op twee of meer printers waarin deze specifieke printers in maat kunnen verschillen
- Kosten zijn minder dan €350
- Veranderen van materiaal duurt minder dan 30 sec
- Maakbaar voor iedereen met een 3D printer

2. Probleemstelling en hoofd- en deelvragen

Er is nog geen perfecte oplossing voor multi-material printing, elk product momenteel op de markt heeft zijn nadelen. In dit hoofdstuk worden de nadelen/probleemstellingen beschreven. Hieruit wordt de hoofd- en deelvragen gehaald.

2.1 Probleemstelling

Om de probleemstelling te duiden zal er in "Appendix A" uitgelegd worden wat er momenteel al op de markt is. Deze producten lossen multi-material printing op verschillende manieren op. De voordelen zijn weggelaten, omdat het bij elk product uiteindelijk neerkomt op het vermogen om met meerdere materialen te kunnen printen, waardoor de nadruk meer op de nadelen komt te liggen.

2.2 Afbakening/Doelstelling

Het project is om een open-source product te creëren waar mogelijk geïnnoveerd wordt op bestaande producten om multi-material printing mogelijk te maken bij bestaande 3D printers. Hierbij wordt het bestaande platform niet of zo min mogelijk aangepast en gaat het echt om een toevoeging.

Voor welke 3D printers:

De basis open-source 3D print platform om dat te doen is Ratrig V-core 3.1 (Figuur 1) en open-source 3d print platform Voron Trident of Voron 2 (Figuur 2).



Figuur 1



Figuur 2

Periode:

Binnen 6 maanden.

Oplever product:

Een fysiek product met openbare documentatie. Hierbij hoort ook de elektronische aansluitingen en de software- en firmwareconfiguraties.

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

2.3 Hoofdvraag

Hoe kan de multi-material 3D printing add-on ontworpen worden waardoor de kosten en plastic verspilling geminimaliseerd worden?

2.4 Deelvragen

Om antwoord te geven op de hoofdvraag zijn de volgende deelvragen opgesteld.

- 1. Welke specifieke multi-material 3D printing producten bestaan er?**
Bij probleemstelling zijn alle overkoepelende methodes belicht. Onder deze overkoepelende methodes zijn er ook specifieke producten waarnaar gekeken kan worden.
- 2. Welke toolchangemethodes bestaan er bij andere productiemachines?**
3D printers zijn niet de eerste machines waarbij er van gereedschap gewisseld wilt worden tijdens een productie. Wellicht kan hiervan geleerd worden.
- 3. Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget?**
Er zijn veel verschillende soorten extruders, hotends en nozzles op de markt tegenwoordig. De ontwikkeling bij 3D printers ligt erg hoog. Zijn er koop onderdelen die nieuwe mogelijkheden creëren, opties verbeteren of methodes goedkoper kan maken.
- 4. Welke mogelijkheden zijn er tussen de slicer en G-code?**
De slicer creëert de G-code. Wat zijn de mogelijkheden om extra informatie te sturen via de G-code en hoe kan ervoor gezorgd worden dat de computer van de 3D printer dit kan lezen.
- 5. Welke technieken kunnen van materiaal wisselen binnen 30 seconden en verspillen geen plastic?**
Een tabel maken met een overzicht van welke producten binnen 30 seconden van materiaal kunnen switchen en geen plastic verspillen.

3. Onderzoek

In het onderzoek worden de onderzoeksvragen (deelvragen) één voor één beantwoord met een onderbouwing. Hiervoor zal worden verwezen naar de gebruikte bronnen via de APA-methode.

3.1 Welke specifieke Multi-material 3D printing producten bestaan er?

In hoofdstuk 2.1 kopje "Probleemstelling", worden zes verschillende methoden besproken voor het 3D printen met meerdere materialen: MMU, filament splicing, dual extruder printhead, IDEX, toolchanger en CNC nozzle changing. Voordat er specifieke producten worden onderzocht, is het belangrijk om te bepalen welke van deze methoden niet geschikt zijn voor de opdracht, binnen de afgebakende scope en in lijn met de doelstellingen.

In "Appendix B" is er een afbakening gedaan van de methodes. Het resultaat hiervan is verdieping in de volgende methodes: MMU, Toolchangers en CNC nozzle changing. In "Appendix B" staat ook de informatie en kennis wat opgedaan is van de producten.

Een overzicht van de producten waarin verdiept is als gevolg van de afbakening:

Tabel 2

MMU	Toolchangers	CNC nozzle changing
Prusa MMU	E3D Toolchanger	The Swapper3D
ERCF	The MUTANT V2	
3DChameleon	Xchange	
ROME	Tapchanger	
Bambu Lab		

3.2 Welke toolchangemethodes bestaan er bij andere productiemachines?

3D printers zijn niet de eerste machines waarbij er van gereedschap gewisseld wordt tijdens een productie. Wellicht kan er inspiratie gehaald worden uit bestaande manieren. In "Appendix C" zijn carousel automatic tool changer, linear automatic tool changer en push to release mechanisms bestudeerd.

3.3 Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget?

In "Appendix D" wordt er gekeken naar koop onderdelen die nieuwe mogelijkheden creëren, opties verbeteren of methodes goedkoper kunnen maken. In "Appendix D" worden de volgende producten nader bestudeerd: RapidChange Revo, Bambu Lab A1 hotend, QuickSwap en Ultimaker print core.

3.4 Welke mogelijkheden zijn er tussen de slicer en G-code?

Klipper heeft een redelijk basis interrogatie voor multiple printheads. Om elke printhead zijn eigen variabelen mee te geven moet de gebruiker zelf macro's maken. Voor klipper zijn er verschillende plug-ins om dit te versimpelen. Deze plug-ins zijn allemaal open-source.

3.4.1 Tools for klipper (KTCC – Klipper Tool Changer Code)

TypQxQ heeft een plugin gemaakt om een goeie basis configuratie te maken om printers met toolchangers aan te sturen. Dit heet (KTCC – Klipper Tool Changer Code).

“Dit zijn Python-modules, macro's en voorbeeldconfiguraties voor de Klipper 3D-printerfirmware om te kunnen werken als een toolchanger. In de eenvoudigste vorm moet je voor elke printhead de extruder, ventilator en offset specificeren. Voeg vervolgens je macro's toe voor het ophalen, neerzetten, vergrendelen en ontgrendelen van gereedschap.” (TypQxQ, n.d.)

3.4.2 ROME

De multi-extruder setup ROME van HelgeKeck besproken in hoofdstuk 3.1, heeft zijn eigen klipper plugin gecreëerd. Deze hoeft slechts geïnstalleerd te worden en vereist erg weinig gebruiker input. (HelgeKeck, n.d.)

3.4.3 Happy Hare

Happy Hare is a Universal MMU plugin for Klipper. Het maakt de configuratie en kalibratie van MMU te overzien. Afhankelijk van het specifieke merk van je MMU kan de kalibratie enigszins variëren, hoewel de stappen in wezen hetzelfde zijn voor alle merken. (Moggieuk, n.d.)

3.4.4 ERCF-Software-V3 aka "Happy Hare v1"

Klipper control software for the Enraged Rabbit Carrot Feeder (ERCF v1.1) gebaseerd op Happy Hare. (Moggieuk, n.d.-a)

3.5 Welke technieken kunnen van materiaal wisselen binnen 30 seconden en verspillen geen plastic?

Om een beter beeld te krijgen van de besproken producten, is de belangrijkste informatie in een tabel samengevat. De tijdsindicatie is gebaseerd op YouTube-video's van de producten, Er zijn veel variaties, dus zijn de tijden bij benadering genomen. In de kolom "wipe tower" wordt aangegeven of de wipe tower meer is dan alleen een prime tower. De printers waar "nee" staat maken alleen gebruik van prime tower om ervoor te zorgen dat het plastic weer goed doorstroomt, aangezien oozing ervoor zorgt dat er plastic uit de nozzle stroomt als deze niet gebruikt wordt.

Tabel 3

	Tijd	Wipe tower	Kosten
Prusa MMU	>60 sec	Ja	€ 329,-
PrusaXL	<30 sec	Nee	€ 3699,-*
ERCF	>60 sec	Ja	€ 150,-
3DChameleon	>60 sec	Ja	€ 220,-
A1 mini – AMS Lite	>90 sec	Ja	€ 497,- **
E3D Toolchanger	<30 sec	Nee	€ 2.956,- ***
Tapchanger	<30 sec	Nee	€ 500,-****
Swapper3D	<30 sec	Nee	€ 400,-

* Printer in combinatie met 5x direct drive extruder toolchangers

**Kan alleen aangeschaft worden in combinatie met de printer momenteel

***Printer in combinatie met 4x direct drive extruder toolchangers

****Toevoegen van 4 toolchangers

4. Programma van eisen

Het programma van eisen is een belangrijk hulpmiddel om het creatieve denkproces op gang te brengen en uiteindelijk een definitief ontwerp vast te leggen.

4.1 Eisen

Tabel 4 Eisen

Nr.	Eis	Eenheid	Bron	Datum	Verificatie
Prestatie					
1	Twee of meer materialen 3D printen	Getallen	Sven Dekker	27-09-2023	Prestatie na realisatie
2	Toepasbaar op twee of meer 3D printers waarin deze specifieke printers in maat kunnen verschillen	-	Sven Dekker	27-09-2023	Monteren na realisatie op 2 of meer 3D printers
3	Kosten zijn minder dan €350	Euro	Sven Dekker, gebaseerd op vergelijkbare producten	27-09-2023	Optellen kosten van alleen het opleverproduct
4	Veranderen van materiaal duurt minder dan 30 sec	Seconden	Sven Dekker	27-09-2023	Timen na realisatie
5	Maakbaar voor iedereen met een 3D printer	-	Sven Dekker	27-09-2023	Controleren na realisatie
6	Open-source delen van het project	-	FabLab Waag	27-09-2023	Downloadbaar via GitHub
7	Betrouwbaarheid zodat er geen gebruiker interactie nodig is tijdens 3D printer	-	Sven Dekker	27-09-2023	Interacties nagaan tijdens print
8	3D printer wordt automatisch gekalibreerd als kalibratie nodig is	-	Sven Dekker	27-09-2023	Niet handmatig kalibreren

4.2 Succescriteria

Tabel 5 Succescriteria

Nr. eis	Eis
1	De multi-material toevoeging kan met zo veel mogelijk materialen 3D printen
2	De multi-material toevoeging kan op zoveel mogelijk printers gemonteerd worden
5	De multi-material toevoeging Bestaat uit zo veel mogelijk 3D print onderdelen
7	De multi-material toevoeging moet zo betrouwbaar mogelijk zijn
8	De multi-material toevoeging heeft na het installeren op de printer zo min mogelijk gebruiker interacties nodig

5. Functieanalyse

Hoofdfunctie

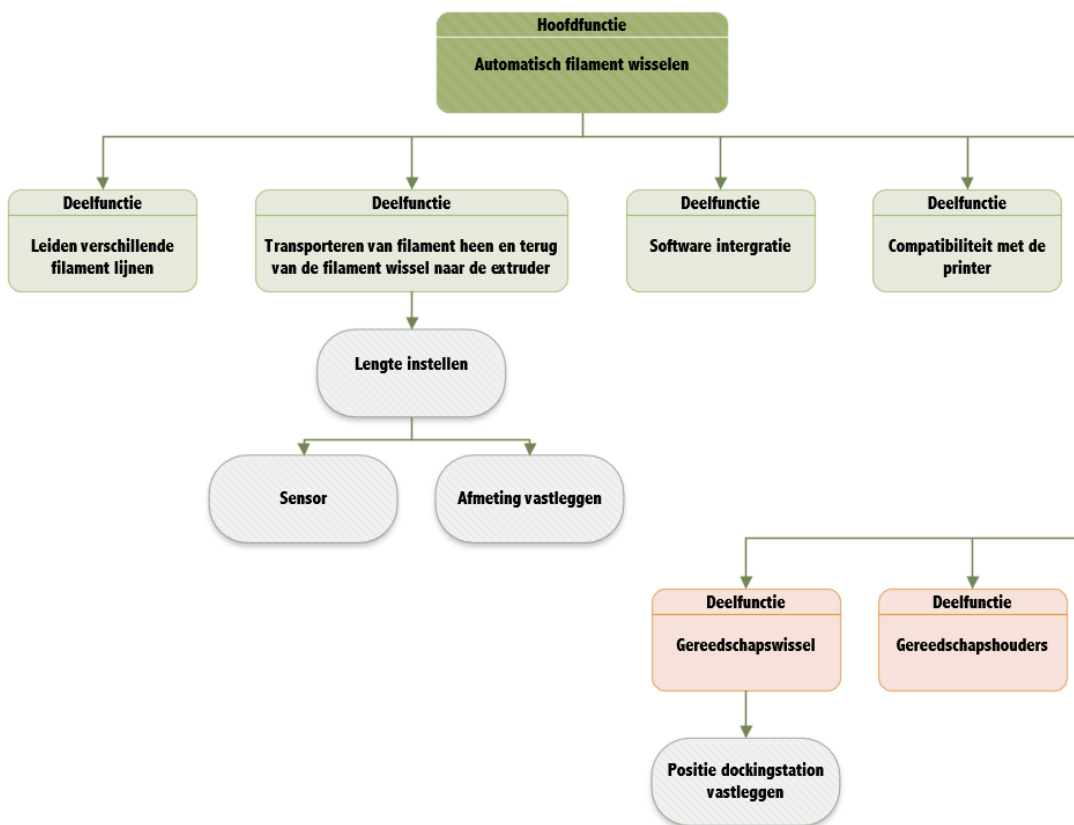
- Automatisch filament wisselen

Deelfunctie

- Leiden verschillende filament lijnen
- Transporteren van filament heen en terug van de filament wissel naar de extruder
 - Lengte instellen
 - Sensor of afmeting vastleggen
- Software integratie
- Compatibiliteit met de printer

Hulpfunctie

- Gereedschapshouders
- Gereedschapswissel
 - Positie dockingstation vastleggen



Figuur 3 Functieboom

6. Brainstorm



Figuur 4 Brainstormsessie

6.1 Gedachtegang

Tijdens het brainstormen ontstond het plan om de drie bestaande methodes te combineren: de toolchanger, MMU en de CNC nozzle swapper. Het plan is om alleen de hotend/nozzle te vervangen met een van de hotends besproken in hoofdstuk 3.3. Op deze manier kan alle bedrading op de printkop behouden blijven en wordt de complexiteit aanzienlijk verminderd. In combinatie met een MMU naar keuze kan filament worden verwisseld met de bijbehorende hotend, waardoor het gebruik van een wipe tower overbodig wordt.

Dit plan is schaalbaar, aangezien je kunt beginnen met twee materialen in combinatie met bijvoorbeeld ROME. De kosten kunnen zo laag mogelijk worden gehouden, met een geschatte prijs van €100. In combinatie met de ERCF kunnen er meer materialen worden geprint, afhankelijk van het aantal gereedschap houders dat in de printer past. Het mooie van schaalbaarheid is dat je niet meteen een definitieve keuze hoeft te maken, en dat een upgrade op een later moment eenvoudig kan worden uitgevoerd.

6.1.1 SWOT-analyse.

Sterke punten: waarin is het idee beter of onderscheidt het zich van andere ideeën?

- Het plan is een hybride van drie bestaande methodes. Dit is iets wat nog niet bestaat op de markt, en ook nog niet eerder gedaan is
- Bespaart kosten vergeleken een toolchanger 3D printer
- Verspild geen plastic aan een wipe tower
- Maak gebruik van open-source producten
- Geen noodzaak voor kalibratie

Zwakke plekken: heeft het idee zwakke plekken dat de uitvoering in gevaar zou kunnen brengen?

- Complexiteit, want er worden drie methodes gecombineerd. Hierdoor zou het op meer plekken fout kunnen gaan. Qua installatie is het plan weer iets minder complex want er hoeven niet meerdere printheads verbonden te worden zoals dat wel gebeurt bij de traditionele toolchange methode.

Mogelijkheden: waar kan nog meer op ingespeeld worden op basis van dit plan?

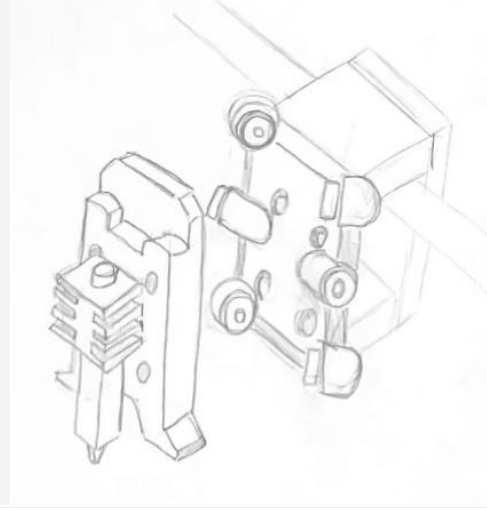
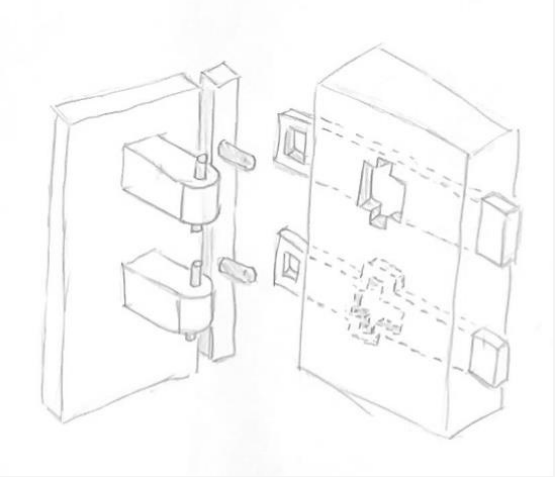
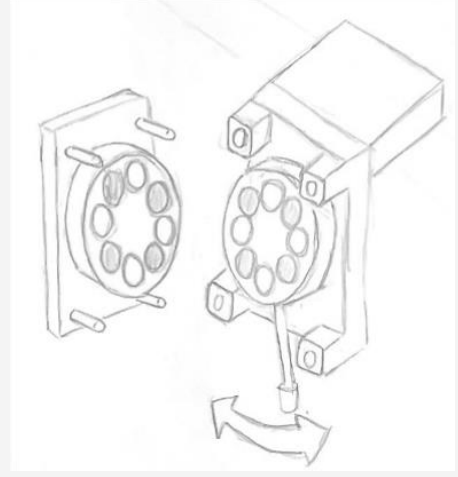
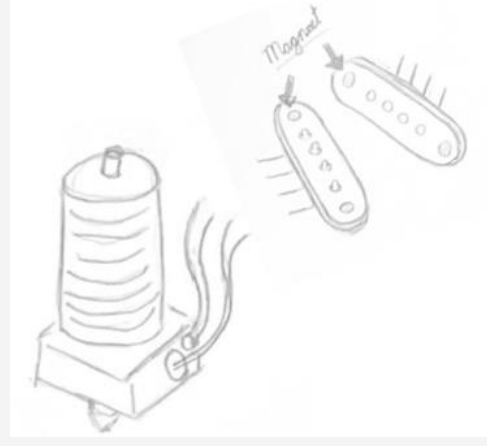
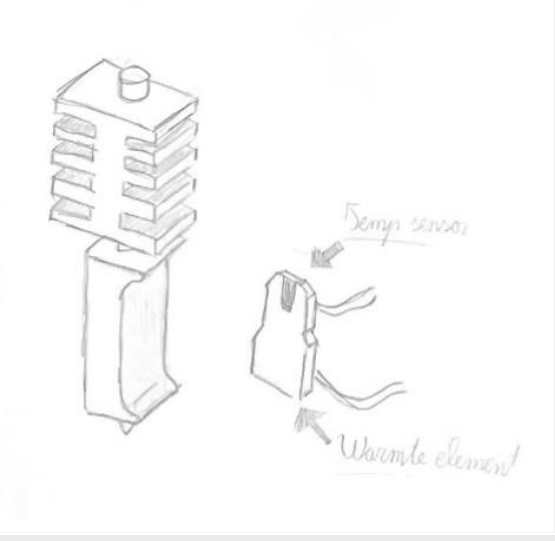
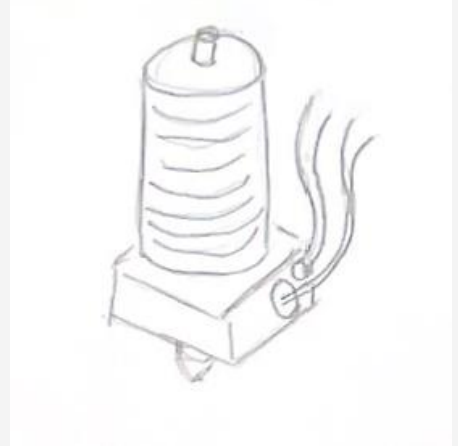
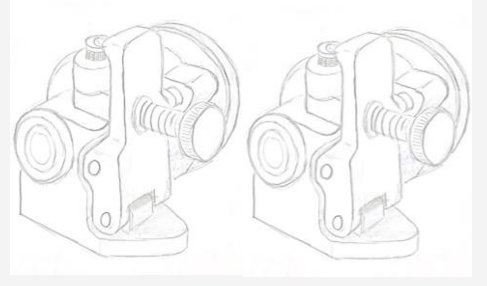
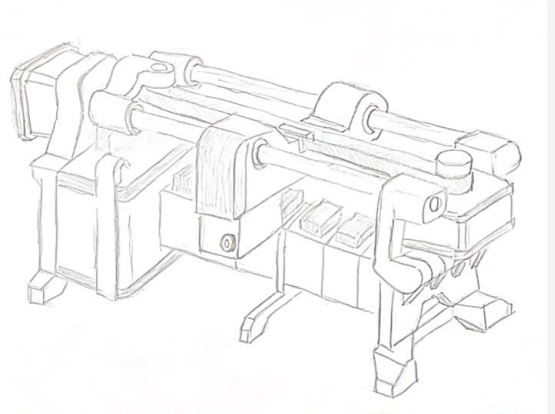
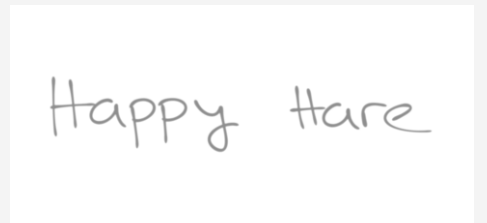
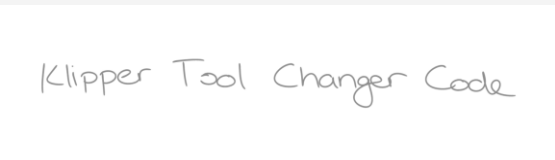

- Of de hotends die opgesteld zijn warm gehouden worden en zo ja, hoe gaat dit in zijn werking?
- Hoe de besturing van elke stap tijdens een materiaal wissel geregeld wordt, kunnen sommige stappen gelijktijdig?

Bedreigingen: wat zijn de potentiële nadelen die kunnen optreden wanneer het plan is gelanceerd?

- Of alle producten wereldwijd wel goed leverbaar zijn
- Of alle kooponderdelen ondersteunt blijven worden
- Dat de kalibratie te veel stappen zijn om het ontwerp gangbaar te maken

7. Morfologisch overzicht

Tabel 6 Morfologisch overzicht

	Oplossing 1	Oplossing 2	Oplossing 3
Gereedschap houder	Tapchanger 	Daksh 	XChange 
Verbinding hotend	Pogo pins 	Bambu Lab warmte element 	Kabels 
Werking met MMU	ROME 	ERCF 	
Software interrogatie	Happy Hare 	Klipper Tool Changer Code 	ROME Plugin 

8. Experimenteren

Om van de deeloplossingen in het morfologisch overzicht een samenhangend concept te maken, zijn er verschillende onderdelen aangeschaft om te visualiseren wat de mogelijkheden zijn. Tijdens het aankoopproces van de onderdelen is al het een en ander duidelijk geworden. Zo is de beschikbaarheid van kleine hoeveelheden onderdelen voor sommige producten erg lastig, of kortweg niet beschikbaar. Daarnaast zijn de kosten hiervan vaak hoog.

8.1 Koop onderdelen

Koop onderdelen die mogelijkheden bieden bij het plan uit de brainstormsessie.

8.1.1 Pogo Pin

Pogo pinnen zijn veerbelaste elektrische connectoren die snel en betrouwbaar tijdelijke elektrische verbindingen mogelijk maken zonder traditionele connectoren.

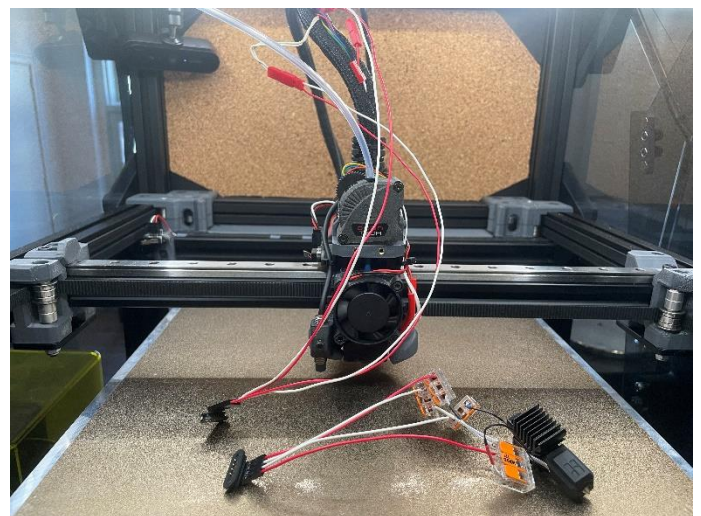
Het is een uitdaging voor hobbyisten om pogo pins te verkrijgen, met name bij grote producenten met uitgebreide datasheets en talloze opties, zoals magnetische, schroefdraad- en montagegatverbindingen. Het is moeilijk om de juiste combinaties van vrouwelijke en mannelijke verbindingen te identificeren. Eenmaal gelukt, heb je te maken met hoge verzendkosten vanuit de Verenigde Staten.

Aliexpress en Amazon hebben opties van generieke producenten maar veel specificaties krijg je niet. Deze producten zijn wereldwijd niet altijd evengoed leverbaar, plus de maximale spanning en stroomsterkte die te vinden zijn is 24 volt 2 amper. Het maximale vermogen die deze pogo pins aankunnen is dan 48W. Dit is op het randje, want vermogen van een verwarmingselement ligt vaak tussen de 40W en 50W.

In Figuur 6 wordt de experimentele opstelling weergegeven. De + en - polen van zowel het verwarmingselement als de temperatuursensor worden via de pogo pins aangesloten. Dit resulteert niet in enig verschil in het functioneren van de 3D printer. Daarom demonstreert dit een potentiële toepassing.



Figuur 5



Figuur 6

8.1.2 Tapchanger

Om een visueel beeld te krijgen bij het concept is er een test print gemaakt om te kijken hoe het mechanisme werkt. Hierbij waren een aantal koop onderdelen nodig: 3mm metalen staven, aantal kleine lagers MR83zz, kleine schroeven en magneten. Al deze onderdelen waren makkelijk te verkrijgen en in grotere hoeveelheden ook betaalbaar.



Figuur 7 Tapchanger

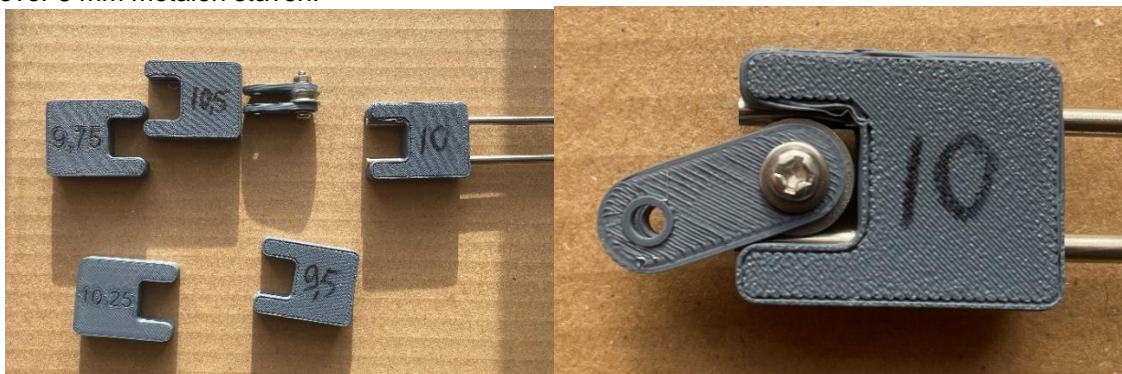
Het klik systeem werkt goed, echter een nadeel is dat het systeem veel ruimte in beslag neemt zie Figuur 7. Dit komt omdat de lagers in een hoek staan om een stugge verbinding te maken.

8.1.3 Mini latch

Aan de hand van de onderzoeksvraag in hoofdstuk 3.2 zijn push and latch mechanismes al bestudeerd. Een voorbeeld van een koop onderdeel hiervan is een mini latch. Deze mini latch kan eventueel gebruikt worden in een dockingstation om een frictieverbinding los te trekken van bijvoorbeeld de Tapchanger. Bij de tweede keer indrukken geeft hij zijn gepakte object weer vrij. Bij aanvang bleek de veer om hem in te drukken sterker dan gedacht. Hier zou wat aan gedaan moeten worden doormiddel van het verlengen van de arm om de kracht te verlagen.

8.1.4 V-groef lager

De v-groef lagers zijn aangeschaft voor een vergelijking met de lagers van de Tapchanger. De Tapchanger-lagers zijn onder een hoek geplaatst om een stugge verbinding te creëren, wat meer ruimte in beslag neemt. Om te onderzoeken of een minder ruimte-innemende verbinding mogelijk is, zijn v-groef lagers aangeschaft om te vergelijken of ze dezelfde stugge verbinding bieden. De v-groef lagers schuiven over 3 mm metalen staven.



Figuur 8 V-groef lagers

De cijfers op de testonderdelen geven de afstand tussen de metalen staven aan. De v-groef lagers schuiven met wrijving over de staven. Uit de test bleek dat de ideale afstand tussen de metalen staven tussen de 10 en 10,25 mm ligt. Deze afstand moet verder worden geoptimaliseerd als deze techniek wordt toegepast. Het is ook vastgesteld dat minimaal twee v-groef lagers naast elkaar moeten worden geplaatst voor een goede verbinding, omdat er anders rotatie kan optreden.

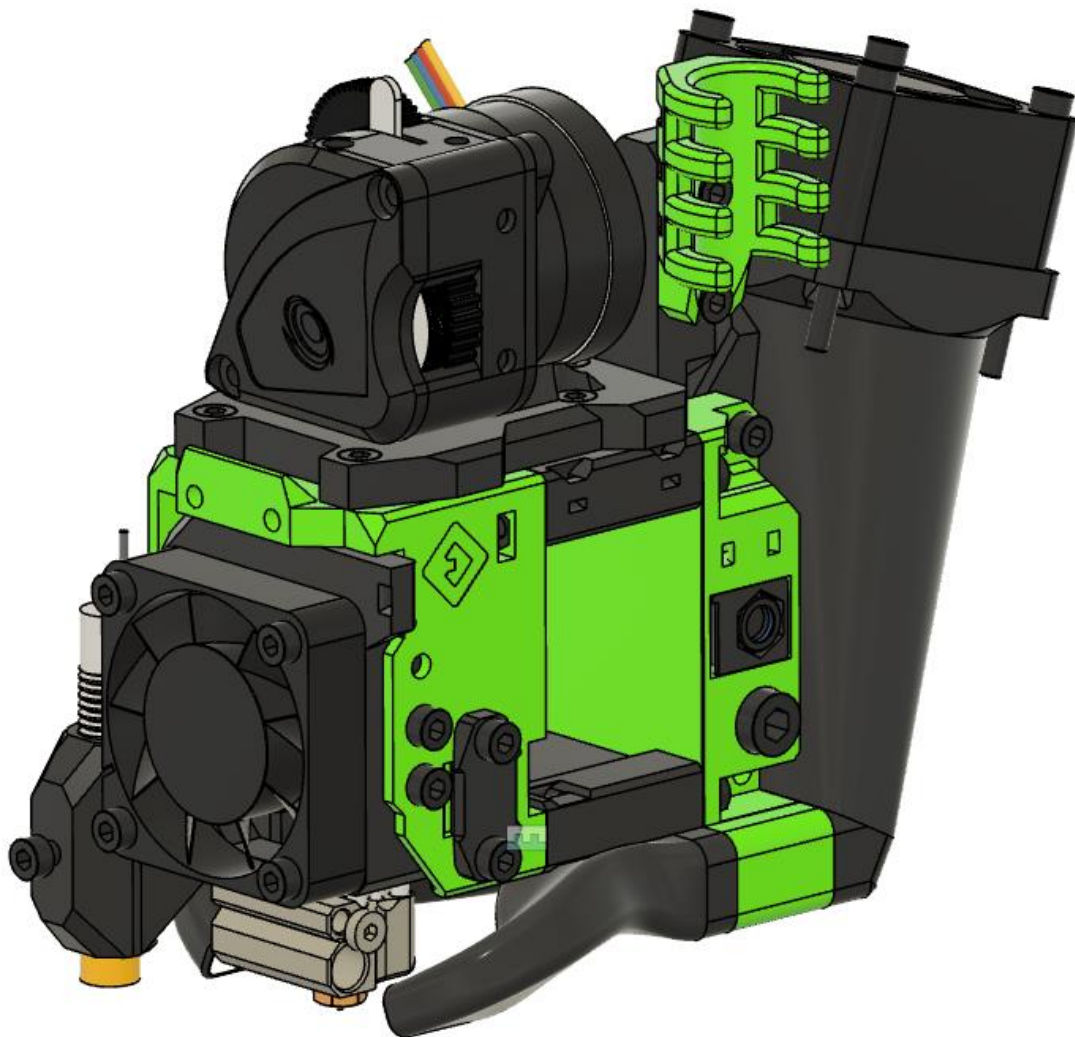
9. Conceptontwerpen

Alle concept ontwerpen zijn gebaseerd en worden toegepast op de Ratrig V-Core 3.1 300. Deze 3D printer staat ter beschikking.

9.1 Leerproces

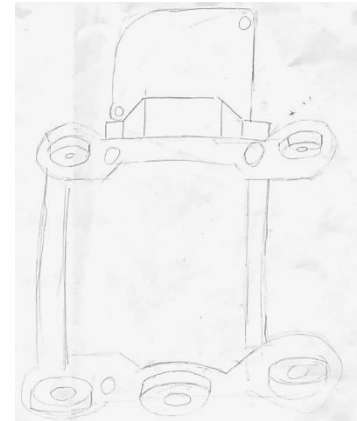
Tijdens het maken van de conceptontwerpen is het duidelijk geworden dat het ontwerpen van een hele carriage platform niet reëel is. Overigens is het ontwikkelen van een nieuwe carriage platform ook niet toegankelijk. Daarom wordt er gebruik gemaakt van de EVA 3 carriage platform. Dit platform is erg toegankelijk en de standaard bij alle Ratrig 3D printers.

Het platform bestaat uit allemaal losse print onderdelen zo kan er gebruik gemaakt worden van veel verschillende soorten hardware en merken, die gecombineerd kunnen worden. Dit is een prachtig systeem die doormiddel van doorontwikkeling gebruikt kan worden voor het plan om hotends uit te wisselingen.



Figuur 9 Printhead

Bij het schetsen van het eerste ontwerp werd duidelijk dat de Ratrig V-Core 3 beperkingen heeft qua beweging in vergelijking met de Voron 2.4. Het verschil zit hem in het vaste printbed van de Voron, waarbij de printhead beweegt op de x-, y- en z-as. De Tapchanger-oplossing uit het morfologisch overzicht maakt gebruik van z beweging, omdat dit ontwerp een opwaartse beweging vereist. Er is overwogen om het mechanisme 90° te draaien (Figuur 10), maar dit neemt te veel ruimte in (Figuur 11) om te combineren met het EVA 3-carriage-platform.



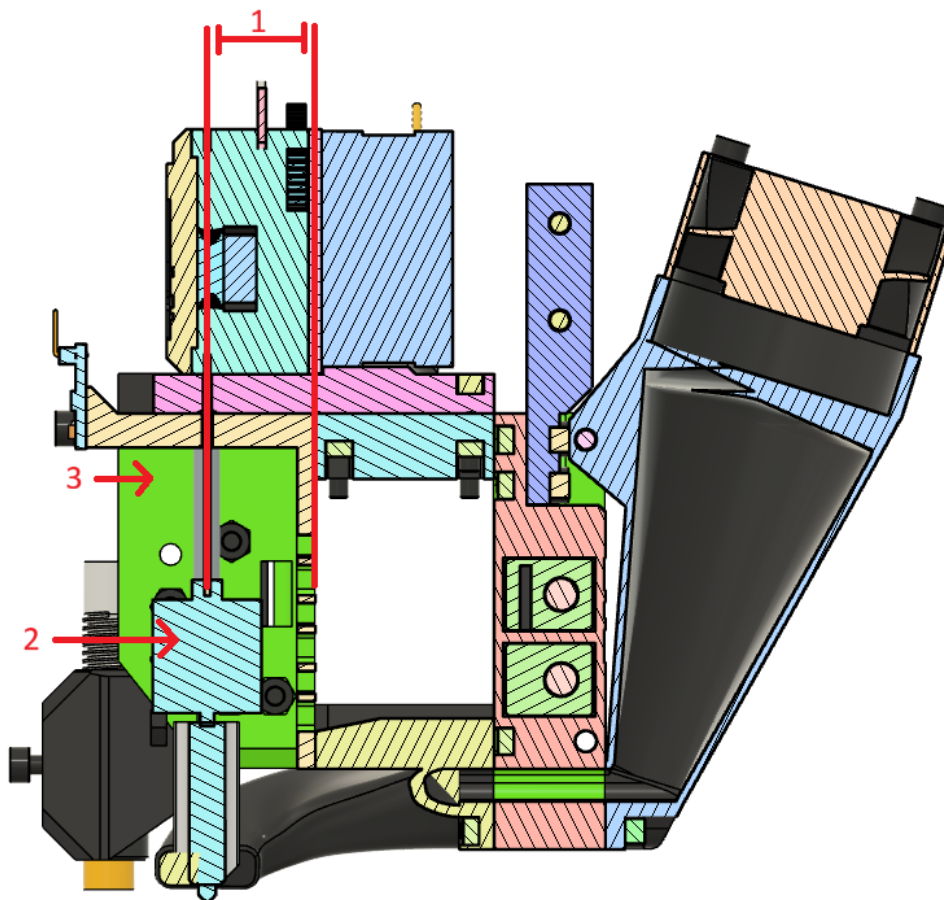
Figuur 10 Schets Tapchanger 90° gedraaid

Deze bevindingen hebben ook gevolgen voor de Daksh -oplossing uit het morfologisch overzicht. Voor het toepassen van dit mechanisme op de Ratrig-printer is een nieuw carriage-platform nodig. Bovendien bevindt dit systeem zich nog steeds in ontwikkeling op moment van schrijven door Ankurv, waarvan de voortgang te volgen is op Discord:

<https://discord.com/channels/1119433664799965186/1119434125447790602>

Voor de XChange gelden vergelijkbare implicaties. Het is moeilijk te integreren met EVA 3, mede doordat er weinig ruimte is achter de filament tube, zoals te zien is in Figuur 10. Bovendien werkt EternalPath aan de ontwikkeling van dit systeem, waarvan de voortgang te volgen is op Discord:

<https://discord.com/channels/582187371529764864/846514894786396160>



Figuur 11 Dimensie 1 = 16,50mm, 2 = A1 Hotend en 3 = Ruimte voor mechaniek

9.2 Nieuwe richting

Omdat geen van de systemen bij het kopje gereedschap uit het morfologisch overzicht gaat werken. Is er opnieuw nagedacht over de mogelijkheden die er zijn. In hoofdstuk 8.1.3 was er al een idee ontstaan om de mini latch te gebruiken voor de dockingstation



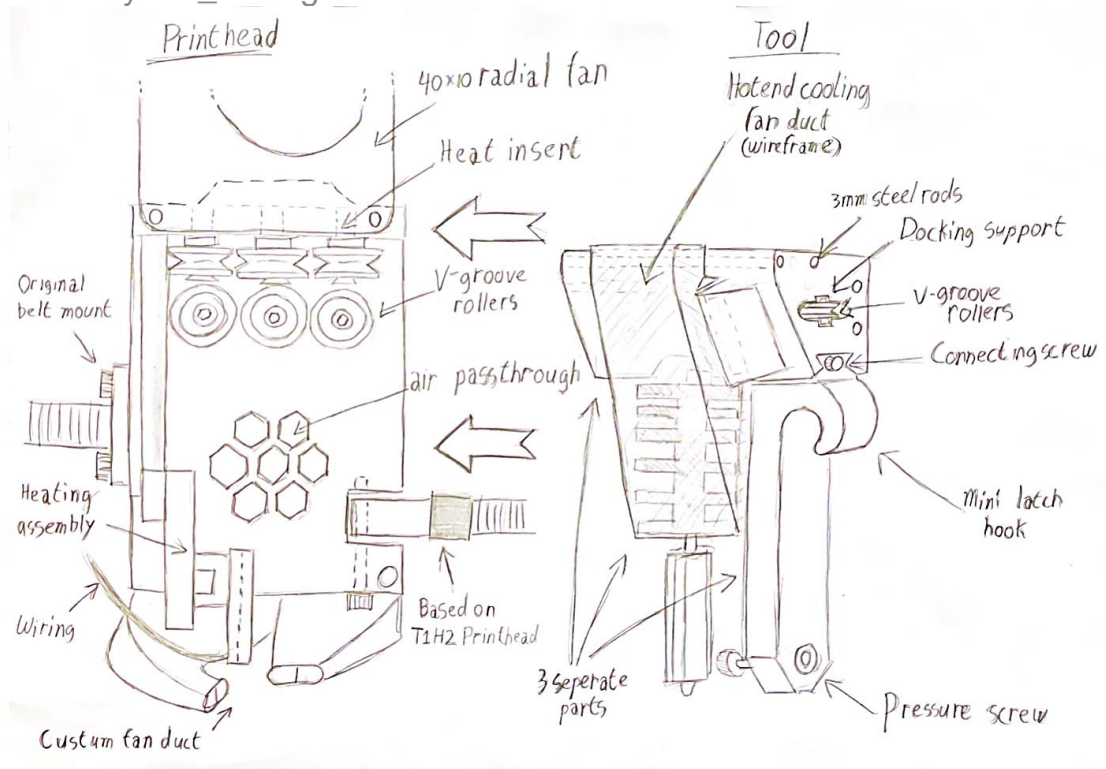
Figuur 12 Links verlengde arm

Om de mini latch te activeren en deactiveren, vereist het stevig duwen en trekken. Deze eigenschap is ideaal voor het nauwkeurig plaatsen of verwijderen van het toolchange-onderdeel. De kracht van de mini latch kan worden aangepast door variabele verlengingen van de arm. Dit biedt de mogelijkheid om lineaire verbindingen te combineren met magneten.

Het gebruik van lineaire rails is niet haalbaar vanwege de aanwezigheid van kogellagers in de wagen, die los kunnen komen bij ontkoppeling van de rail. Deze uitdaging leidde tot het verkennen van alternatieven. De inspiratie werd gevonden in v-groef laggers die over 3 mm metalen staven schuiven. Bovendien zijn deze componenten beter verkrijgbaar en budgetvriendelijker dan traditionele lineaire rails.

In hoofdstuk 8.1.4 is het idee van v-groef laggers getest. De resultaten van deze test vormen de basis voor de twee volgende ontwerpen.

9.3 Hybrid_Changer



Figuur 13 Hybrid_Changer

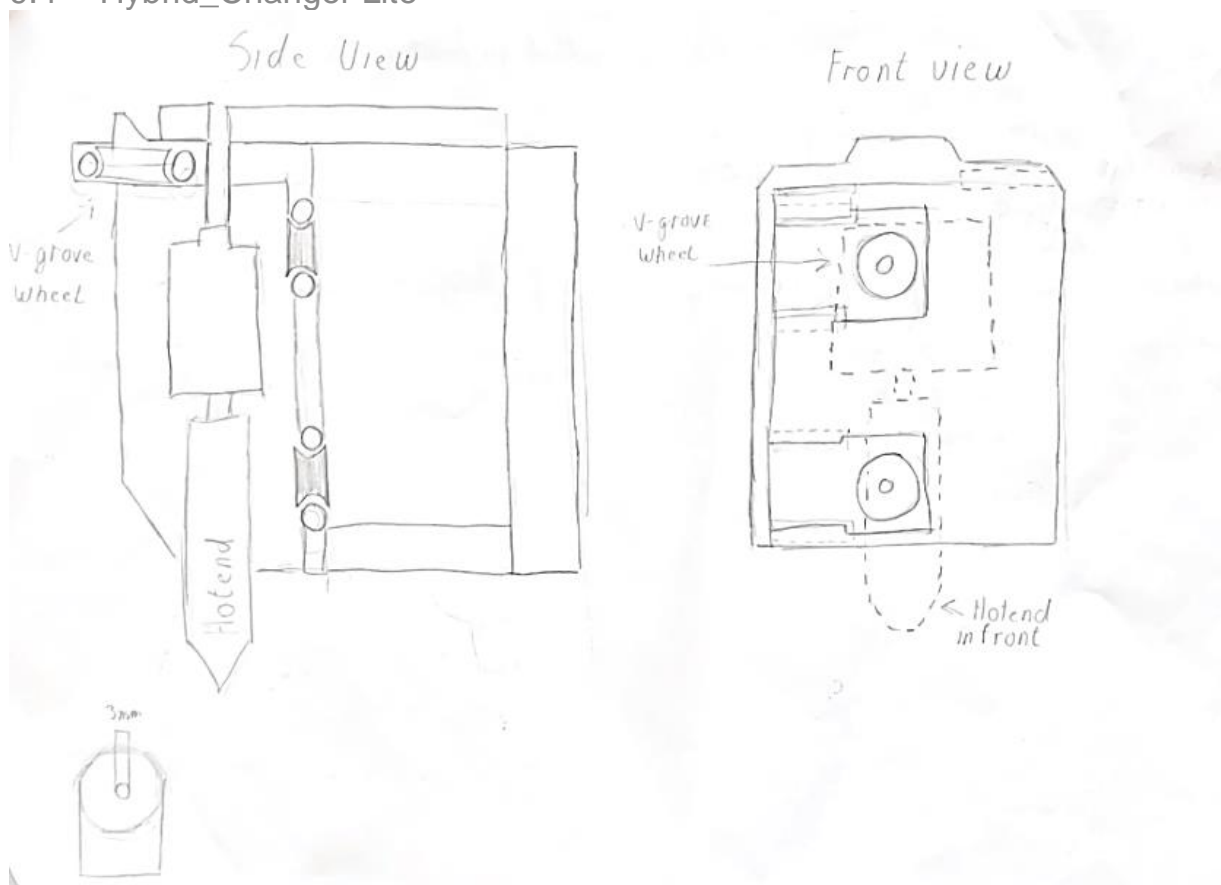
Dit ontwerp maakt gebruik van de v-groef lagers gemonteerd op de printhead. De compacte A1 hotend biedt ruimte erboven, zoals te zien is in Figuur 11. Deze extra ruimte is handig voor toolmontage. Er is ruimte voor 3 rollers naast elkaar, wat zorgt voor meer contactpunten en een stevigere verbinding. Met v-groef lagers op meerdere vlaktes is de verbinding stugger in verschillende richtingen.

Het verwarmingselement is aan de linkerkant gemonteerd om twee redenen: de originele riemverbinding kan behouden blijven en hetzelfde geldt voor de bed probe (zie Figuur 9 en 11). Na onderzoek naar andere open-source printkoppen op de Rat Rig cummity server op Discord is de T1H2 printkop opgevallen vanwege de compacte riemverbinding aan de rechterkant, perfect voor deze toepassing. De standaard hotend koeling fan zit in de weg bij gereedschapswisselingen, daarom is gekozen voor een radiale fan met een fan duct om de lucht langs de hotend vinnen te leiden en via de hexagonen aan de achterkant te laten ontsnappen. In eerste instantie wordt een 40x10 radiale fan gebruikt, maar als dit onvoldoende blijkt, kan een 40x20 radiale fan op dezelfde manier worden gemonteerd.

Normaal gesproken houdt de Bambu Lab heating assembly de hotend vast met een clip. Omdat dit niet mogelijk is, is er een druk schroef gemonteerd om de hotend onder spanning te houden, zodat deze tegen het verwarmingselement drukt wanneer deze eenmaal is verbonden. De mini latch moet worden ingedrukt om los te laten, hieruit wordt de kracht gehaald om de tool goed op zijn plek te positioneren.

Bij de ophanging voor het docken van het gereedschap worden opnieuw 3 mm metalen staven en v-groef lagers gebruikt.

9.4 Hybrid_Changer Lite



Figuur 14 Hybrid_Changer Lite

De “Hybrid_Changer Lite” is de tegenhanger van het “Hybrid_Changer”. Het idee is dat de 3mm metalen staven verwerkt worden in onderdeel 3 van Figuur 11. Hierdoor blijft er meer ruimte over om een ophanging te maken waarin de hotend verwerkt kan worden en waar de rollagers aan gemonteerd kunnen worden. Om de toolchange te maken hoeft de tool ook maar een klein stukje in elkaar te klikken. De afstanden tussen de rollagers is groter dan bij de Hybrid_Changer het idee hierachter is dat er meer nodig is voor torsie. Om de tool nog stugger op zijn plek te houden nadat deze met de printhead is verbonden kan er gebruik gemaakt worden van magneten.

10. Keuzematrix

Tijdens de conceptontwerp fase zijn er zo goed als alle mogelijkheden afgeschreven van het morfologisch overzicht. Vanwege nieuwe inzichten en beperkingen. Dit heeft wel geleid tot de kennis wat er nodig is en wat andere ontwerpen succesvol maken. Hieruit is een de nieuw toolchange techniek uit de twee concepten bedacht, deze techniek is nog niet eerder toegepast bij 3D printers. Dit maakt de verschillen tussen de twee ontwerpen erg klein omdat deze techniek nog geen ontwikkeling heeft ondervonden.

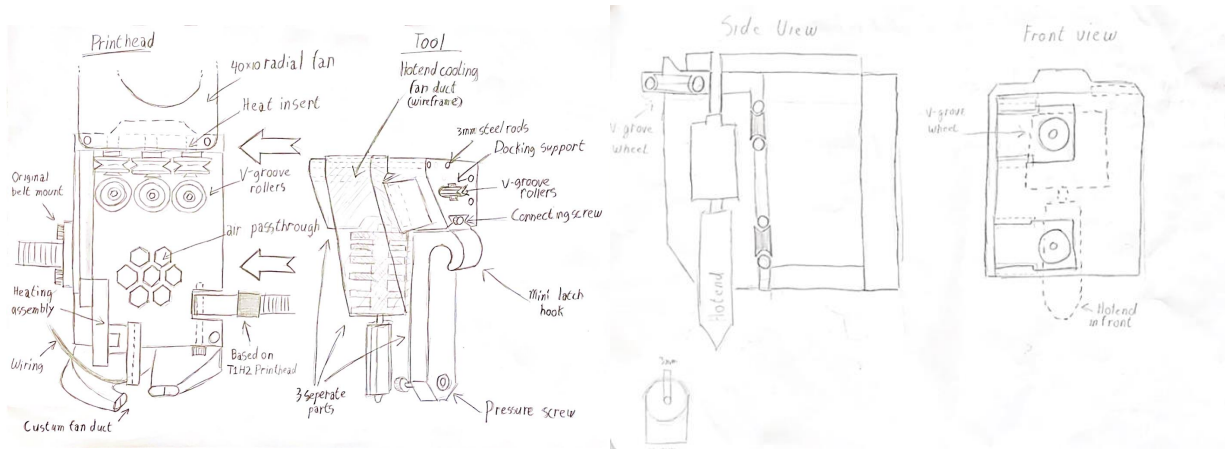
10.1 Weegfactoren

- 10 - Betrouwbaarheid
- 9 -
- 8 - Kalibratie
- 7 - Maakbaarheid
- 6 - Kosten
- 5 -
- 4 - Snelheid filament wissel
- 3 -
- 2 -
- 1 -

De verschillende criteria zijn geordend op de weging. In bovenstaande tabel is te zien welke criteria meer wegen dan anderen.

- Er is voor deze volgorde gekozen omdat betrouwbaarheid het belangrijkste is om te zorgen dat mensen het product willen gebruiken en willen toepassen op hun 3D printer.
- Kalibratie is ook een stukje betrouwbaarheid tijdens het gebruik. Dit moet automatisch gaan of er moet voorkomen worden dat iets gekalibreerd moet worden.
- Met maakbaarheid wordt er rekening gehouden om het product zo toegankelijk mogelijk te maken met zo min mogelijk gereedschap. Ook is het belangrijk dat er rekening gehouden wordt met de hardware toegankelijk en betaalbaarheid rondom de wereld.
- Het product is het liefst zo goedkoop mogelijk en minimaal onder de budget eis van € 350.
- De snelheid van de filament wissel is ook interessant omdat dit nog een extra reden kan zijn om voor dit product te kiezen, maar met de eerste iteratie van dit product komt het op de laatste plaats.

10.2 Keuze matrix



Figuur 15

Figuur 16

Tabel 7

		Hybrid_Changer		Hybrid_Changer Lite	
Criterion	Weging	Score	Gewogen	Score	Gewogen
Kosten	6	5	30	5	30
Snelheid filament wissel	4	3	12	3	12
Betrouwbaarheid	10	4	40	3	30
Kalibratie	8	4	32	2	16
Maakbaarheid	7	5	35	5	35
			149		123

1 = Slecht

2 = Matig

3 = Gemiddeld

4 = Goed

5 = Uitstekend

10.3 Gekozen concept

Er is gekozen voor het concept van de Hybrid_Changer vanwege een iets hogere beoordeling van de punten en het feit dat thermische koppeling nog niet eerder is toegepast bij toolchangers. Dit is een unieke kans om dit uit te proberen met de A1 hotend en de heating assembly. Bij het testen met de v-groef lagere werd duidelijk dat een stugger verbinding ontstaat met meer dan één v-groef lager naast elkaar. Hoewel de arm van de Hybrid_Changer Lite langer is, is het vertrouwen in een stevige verbinding kleiner. Er bestaat ook een risico dat de Hybrid_Changer Lite te veel van zijn structurele integriteit verliest door de inwendige v-groefverbinding. Een nadeel van de Hybrid_Changer is dat het meer bewegingsruimte vereist om de tool te koppelen en te ontkoppelen.

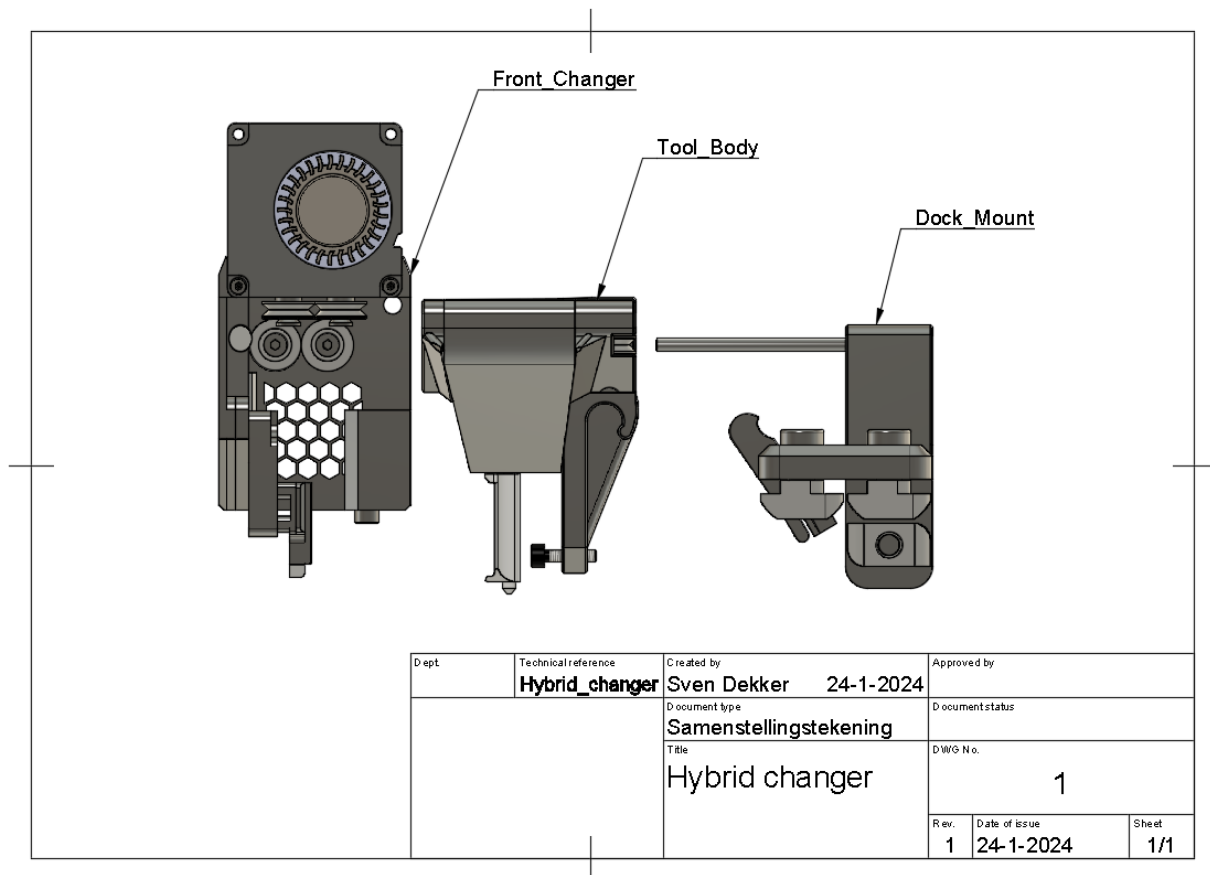
11. Detaillering

Alle details van het ontwerp worden gespecificeerd zoals samenstellingstekening, onderdelentekening en exploded views uit Fusion 360. Van de koop onderdelen worden alle specificaties vastgelegd zodat ze besteld kunnen worden.

Om te beginnen met detaillering is in eerst instantie de Heating assembly en de A1 Hotend in CAD gezet. Dit is eerst globaal gedaan met foto's van de website en daarna de juiste afmetingen in CAD gezet.

Hierdoor kon de hotend direct onder de extruder worden gezet omdat de positie van de extruder onveranderd blijft. De nozzle (hotend) afstand van het bed is ook hetzelfde gebleven. Dit bracht een duidelijk plaatje waar ruimte was voor de verbinding en hoe er om de hotend heen getekend moest worden.

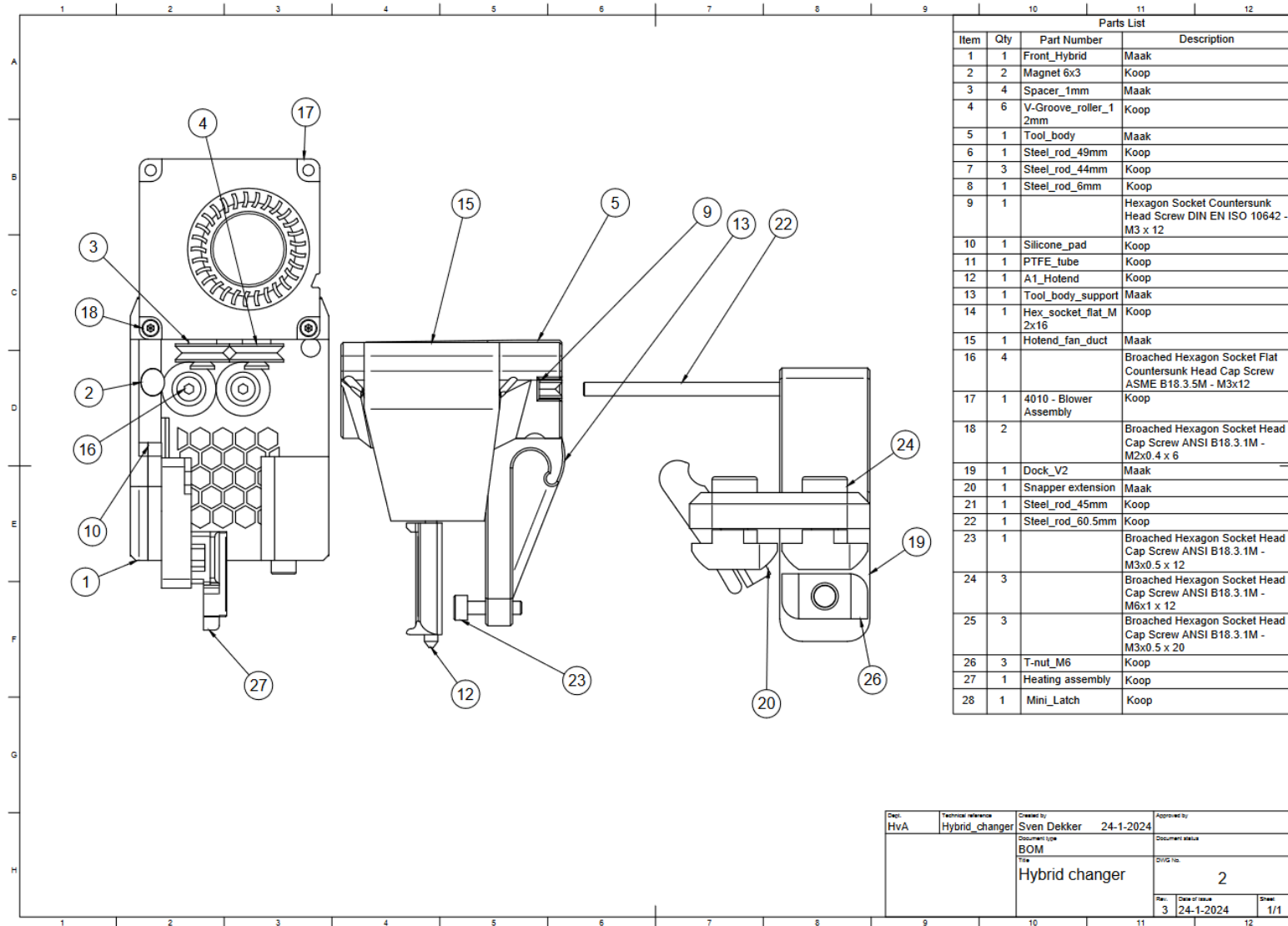
11.1 Samenstellingstekening



Figuur 17 Samenstellingstekening

Het ontwerp is in drie delen opgedeeld. De drie delen zijn: Front_Changer, Tool_Body en Dock_Mount. Aan de detaillering zijn veel prototypes voorafgegaan. Van variaties van het hele ontwerp tot kleine iteraties waar het gaat om zeer kleine toleranties. In hoofdstuk 5 wordt hier diep op ingegaan.

11.2 Onderdelentekening



Figuur 18 Onderdelentekening

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

De vijf maak onderdelen kunnen geproduceerd worden doormiddel van het 3D printen van de bestanden. De bestanden worden in .stl formaat gedeeld. De materiaalkeuze hiervoor is ABS of ASA vanwege de hoge vloeigrens.

De koop onderdelen zijn goed beschikbaar en veel 3D print hobbyisten zullen de hex schroeven, heat inserts, PTFE-tube en t-nuts al ter beschikking hebben. De BOM is voor 1xFront_Changer 1xTool_Body en 1xDock_Mount. De links verwijzen naar de hoeveelheid onderdelen voor 1xFront_Changer 3xTool_Body en 3xDock_Mount. Alleen de A1 Hotend moet 3x besteld worden.

Alle onderdelen zijn via Aliexpress of Amazon beschikbaar. Hieronder is een lijst met links:

Tabel 8 Koop onderdelen

Item	Part Number	Link	Cost
2	Magnet 6x3	(Magnet 6x3, n.d.)	€2,-
4	V-groove roller 12mm	(V-Groove roller)	€3,-
6,7,8,21,22	Steel rod	(Steel rod 3mm)	€5,-
10	Silicone pad	(Thermal insulation pad)	€9, -
11	PTFE-tube	(PTFE tube)	€2, -
12	A1 Hotend	(A1 Hotend)	€11, -
24	M6x12	(M6x12)	€2, -
26	T-nut M6	(T-nut M6)	€3,50
27	Heating assembly	(Hotend heating assembly)	€21,50
29	Heat inserts	(Set heat insert assortment)	Advise to get a kit
9,14,16,18,23,25	Hex socket screws	(Flat hex socket) (Round hex socket)	Advise to get a kit
	FYSETC ERCF	(ERCF)	€122, -

Totale kosten voor de Hybrid_Changer toegepast zoals hierboven aangegeven is:

$$2 + 3 + 5 + 9 + 2 + (3 \times 11) + 2 + 3,50 + 21,50 + ? + 122 = €203$$

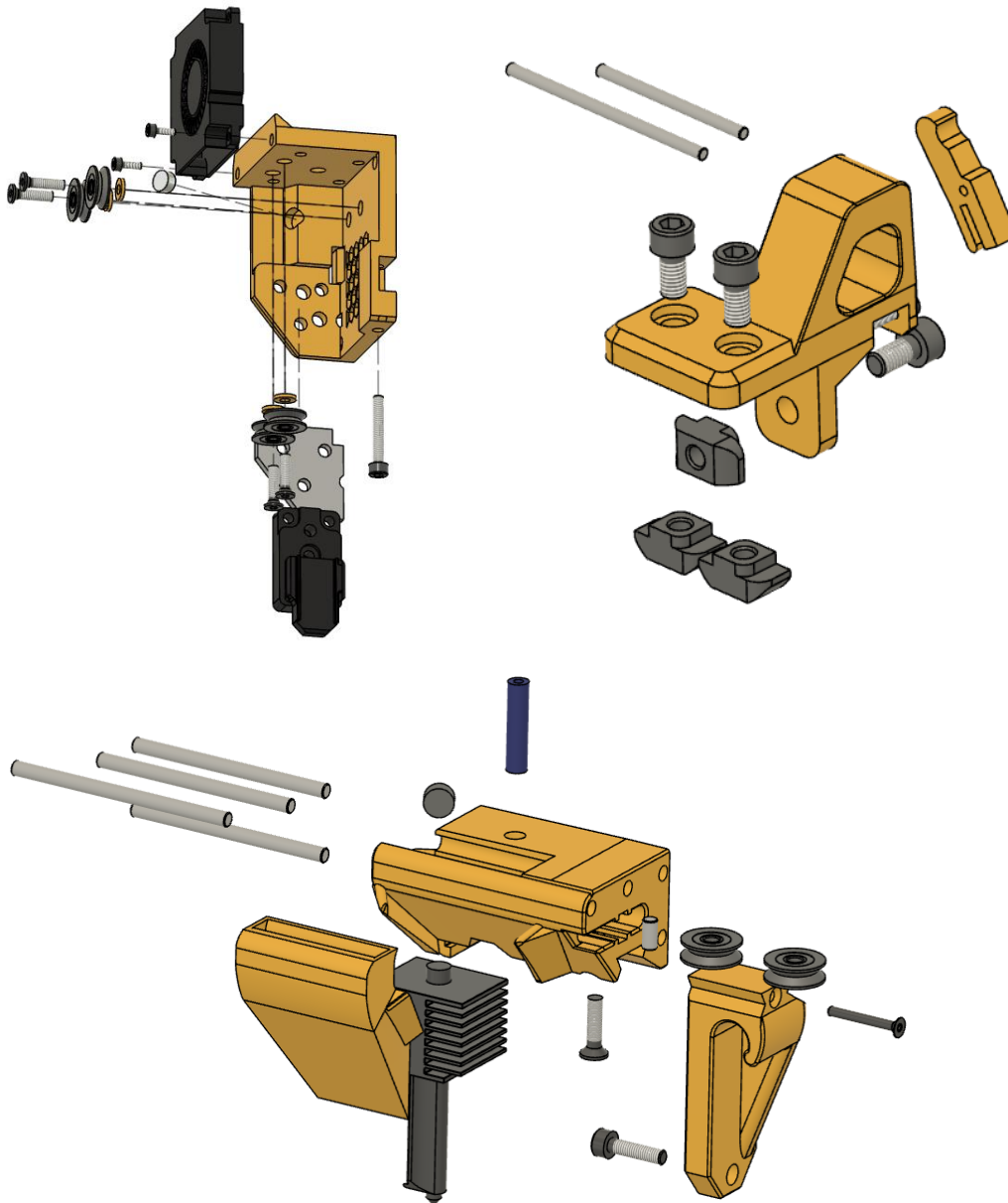
Het vraagteken (?) staat in de formule omdat de kosten voor de benodigde schroeven en heat inserts nodig minder dan €10 kost, maar het is voor de gebruiker interessanter om kits aan te schaffen voor toekomstig gebruik.

Om het filament heen en terug naar de printkop te sturen is gebruik gemaakt van de ERCF. Er kan ook gekozen worden voor meerdere extruders om het filament heen en terug te sturen. Dat is aan de gebruiker.

11.3 Exploded view

In de onderdelentekening is het lastig alle onderdelen te zien omdat er verschillende onderdelen inwendig zitten. De exploded view helpt om alle onderdelen bloot te leggen.

Wat er mist in deze aanzichten is de mini latch en de heat inserts. De heat inserts zitten op de plekken waar schroeven in het plastic gaan. Dit wordt gedaan voor een sterke verbinding. Thomas Sanlanderer van het YouTube kanaal Made With Layers heeft de toevoeging van heated inserts aangetoond in de video "Do you even need threaded inserts? Strength tested!" (Sanlanderer, 2024).



Figuur 19 Exploded view

12. Bouwverslag

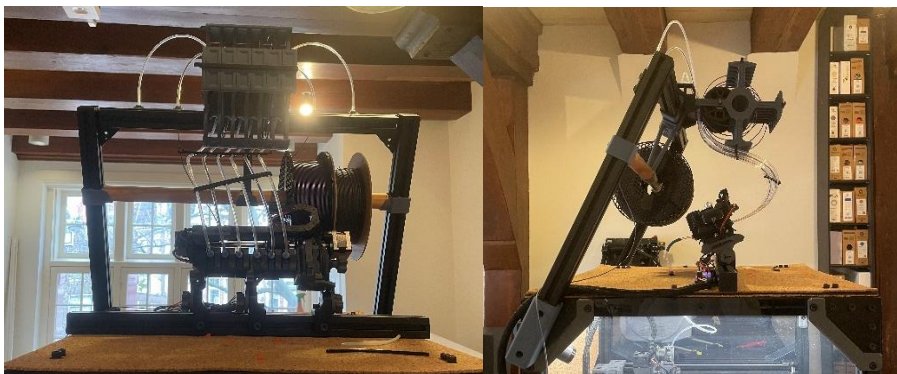
In dit hoofdstuk wordt het bouwproces vastgelegd. Het bouwproces is een proces geweest met veel prototypes. Het globale werkingsprincipe was duidelijk voor de bouw maar de precieze uitwerking kreeg gaandeweg vorm.

12.1 Installatie ERCF

Het concept is gebaseerd op 3 methodes, het resultaat uit brainstormsessie in hoofdstuk 6. Voor de MMU is gekozen voor de ERCF. Dit is gedeeltelijk een financiële keuze, omdat de hardware kit via Aliexpress voor €120 aangeschaft kan worden inclusief verzending. Zes materialen kan inladen en het is een open-source project met zeer gedetailleerde documentatie. Een andere optie zou zijn om de filamenten direct te aan voeren door gebruik te maken van ROME. Met een groter budget is dit een betrouwbaardere keuze. Bovendien heeft dit systeem ook het voordeel dat het filament maar een klein stukje teruggetrokken hoeft te worden. Dit is ondervonden in hoofdstuk 3.1.

In eerste instantie was de ERCF gemonteerd aan de achterkant zoals te zien in is dit filmpje van de eerste print met de ERCF: <https://youtu.be/WXjJ0xpD1Kg>. Het probleem was dat het laden en terugtrekken te lang duurde omdat het filament door 100cm lang PTFE-tube moest. Om deze afstand in te korten is de ERCF boven op de printer geplaatst. Het resultaat van de verplaatsing was een PTFE-tube met een lengte van 56 cm. De tijd om te laden is nu bijna gehalveerd.

Om de ERCF te ondersteunen zijn er wat zelfontworpen prints toegevoegd. Hierdoor kunnen er 6 rollen filament hangen boven de printer met 6 filament buffers (de buffers zijn nodig voor de ~60cm teruggetrokken filament). Hierbij is gebruik gemaakt van de 4x3030 extrusie die over zijn gebleven van de RatRig enclosure upgrade kit (een kit om de basis printer te behuizen). Het resultaat is te zien in Figuur 20.



Figuur 20

12.2 Prototypes

Alle prototypes zijn geprint met PLA omdat dit materiaal het eenvoudigst is om te printen. Alle hele prototypes zijn bewaard gebleven. Figuur 21 geven een duidelijk beeld van de iteraties die gemaakt zijn door de loop van het proces.



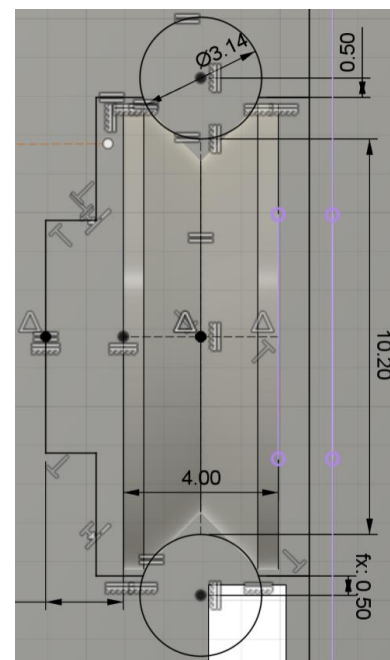
Figuur 21 Prototypes

12.2.1 Toepassen lineaire verbinding

Het ontwerp van de prototypes volgt een stapsgewijze benadering, vanwege de vereiste precisie tot achter de komma van millimeters. De focus lag aanvankelijk op het verbinden van de Front_Changer en de Tool_Body. Dit werd gerealiseerd door de plaatsing van V-groef lagers en 3 mm metalen staven. Het experiment in hoofdstuk 8.1.4 gaf aan waar gezocht moest worden voor de ideale afstand tussen de metalen staven. Na wat experimenteren werd de definitieve afstand vastgesteld op 10.2 mm.

In Figuur 22 is ook te zien dat de 3 mm metalen staven in een gat gedrukt worden met een diameter van 3.14 mm. Deze tolerantie is verkregen door de Fusion files van de Tapchanger waar dezelfde techniek eveneens wordt toegepast.

In het volgend filmpje is het eerst werkende prototype v9 te zien:
https://youtu.be/FkGhIPvIQ_g



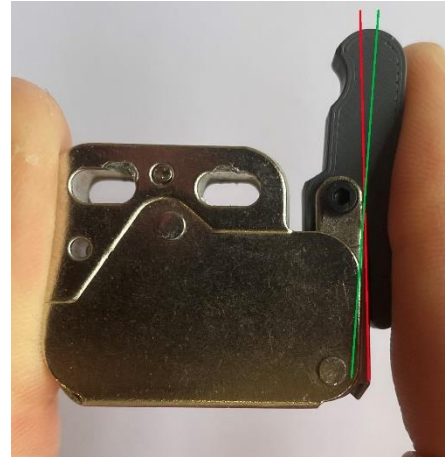
Figuur 22

12.2.2 Implementatie van het docking mechanisme

Het volgende cruciale aspect van de ontwikkeling was het integreren van het docking systeem, zoals beschreven in hoofdstuk 14.1.2. Aangezien de arm van de mini latch verlengd moest worden, kon de oorspronkelijke verbinding niet meer worden gebruikt, zoals geconstateerd in hoofdstuk 8.1.3. Via de ontwikkeling van 9 prototypes (zie Figuur 21) werd de optimale hoek gevonden (groene lijn in Figuur 23), omdat de hoek in volledig ingedrukte stand (rode lijn in Figuur 23) groter was dan 90°.

Om de Tool_Body effectief vast te houden, werd een inkeping gecreëerd die tijdens de heenweg langs de haak beweegt en op de terugweg blijft haken. Het eerste werkende prototype is ook gedemonstreerd in het filmpje van hoofdstuk 12.2.1.

Dit mechanisme is gecombineerd met Tool_Body_Support (zie Figuur 17) om de Hotend/Nozzle goed tegen het verwarmingselement te drukken. Dit onderdeel is verbonden aan de Tool_Body middels een dovetail en een schroef. Deze geïntegreerde aanpak draagt bij aan de nauwkeurige positionering en stabiliteit van het gehele Tool_Body.



Figuur 23

12.2.3 Ontwikkeling Dock_Mount

De ontwikkeling van de Dock_Mount verliep vlotter. De eerste stap omvatte het bepalen van de positie van de mini latch, wat succesvol werd gerealiseerd door de combinatie met de Tool_Body_Support. Vervolgens werd overgegaan tot de montage op een 3030 extrusieprofiel. Iteratie vijf omvatte het gebruik van een schroef en t-nut, de zesde iteratie werd verbeterd met twee schroeven en t-nuts. Bij de elfde iteratie werd duidelijk dat rotatieproblemen optraden na meerdere cycli van docking en undocking. Dit is verholpen door ook op de verticale vlak ook een schroef en t-nut toe te passen (Figuur 19).

12.2.4 Ontwerpen Front_Changer

In Hoofdstuk 9.1 en 12.2.1 zijn de limieten en diverse toepassingen van de Front_Changer uitvoerig besproken. Eenmaal de lineaire verbinding was ontwikkeld, vereiste de Front_Changer eigenlijk minimale aanpassingen. Vervolgens zijn de conceptuele ontwerp-toepassingen uit Hoofdstuk 9.3 geïmplementeerd:

- De riemverbinding T1H2
- Luchtventilatiegaten voor de hotend
- Bevestiging van de radiale ventilator

Twee specifieke aspecten vergden verdere ontwikkeling. Ten eerste was er de positionering van de magneet. Tijdens het undocken bleef een V-groef lager aangetrokken tot de magneet, wat is opgelost door de magneetpositie te verlagen. Deze aanpassing wordt gedemonstreerd in het volgende filmpje: <https://youtu.be/49wXWuEo0EQ>.

Het tweede aspect was de noodzaak van isolatie bij de bevestiging van de Heating assembly, aangezien deze in eerste instantie direct contact maakte met het plastic. Dit leidde tot variaties in de afstand van de bed probe tot het bed (Een bed probe is een sensor die wordt gebruikt in 3D-printers om de hoogte van het printbed te meten). Dit probleem is opgelost door het gebruik van een stuk hittebestendig silicone, geïnspireerd op de silicone nozzle sokken, zoals te zien in Figuur 19.

12.2.5 Iteraties Tool_Body

De Tool_Body onderging het grootste aantal iteraties, voornamelijk vanwege zijn compacte vorm en complexe functies. Enkele van deze iteraties zijn reeds genoemd, zoals de ontwikkeling van de lineaire verbinding en de herpositionering van de magneet. Een cruciaal leermoment was de ontdekking dat twee V-groef lagers naast elkaar een stabielere verbinding opleveren dan drie naast elkaar. Dit inzicht kwam voort uit de uitdaging dat de 3 mm metalen staven niet goed recht konden worden gehouden met drie lagers. Door één V-groef lager op zowel de horizontale als verticale vlakken weg te laten, ontstond er meer lengte om de staven recht te houden. Dit principe wordt overdreven geïllustreerd in Figuur 24. Deze aanpassingen hebben geleid tot een verbeterde stabiliteit en functionaliteit van de Tool_Body.



Figuur 24

Hierna is er gewerkt aan de interactie van de Dock_Mount met de Tool_Body. In eerste instantie is er een ontwerp gemaakt met 2 gaten waar 2 metalen staven in konden. De gaten waren te groot voor een stevige verbinding maar al werden ze kleiner zou de wrijving en precisie nodig te groot zijn. Dit is opgelost met wat we net geleerd hebben van v-groef lagers. Er zijn 2 v-groef lagers achter elkaar verwerkt in de Tool_Body resulterend in een stevige verbinding. Dit is te zien in het volgende filmpje <https://youtu.be/iwx9ur088xk> en in de exploded view (Figuur 19).

De fan duct zit aan de Tool_Body doormiddel van een dovetail. Er is gekozen om dit onderdeel apart te printen vanwege de printrichting, omdat er anders interne overhangingen gecreëerd worden die niet ondersteunt kunnen worden

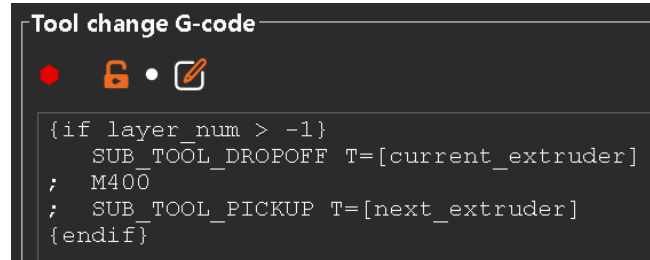
12.3 Software

Hier gaat het om de communicatie tussen de slicer en de printer. De instructies die meegegeven worden en wat de printer met deze instructies moet doen. Dit was een proces van leren van anderen, vragen stellen en trial and error.

12.3.1 Slicer

Een van de beste open-source slicer op het moment is Prusaslicer. Dit is dan ook de reden dat ervoor gekozen is om met deze slicer te werken. Om de Hybrid-Changer te laten werken moeten er in de slicer een aantal eenmalig aangepast worden. Zo is het standaard bed van de printer 300x300 nu na de toevoeging 300x245. Moeten er 3 extruders geselecteerd

worden. Als dit geselecteerd is wordt er bij multi-material prints met elke toolchange een command Tx (x voor het cijfer van de extruder optellend vanaf 0) meegegeven. Voor prints zonder toolchanges, dus met een extruder moeten er twee extra variabelen mee gegeven worden bij de optie "Printer Settings" kopje "Custom G-code" in het vak gelabeld "Start G-code" T=[initial_tool] en C=[total_toolchanges]. Alleen als variable C=0 dan wordt er aan de start de variable T=[initial_tool] gebruikt om een van de drie extruders te selecteren. Als variable C groter is dan 0 worden er niks met de variabelen gedaan. In hetzelfde kopje "Custom G-code" moet er in het vak "End G-code" de variabele "SUB_TOOL_DROPOFF T=[current_extruder]" komen te staan. De variabele T geeft de extruder aan die op het laatste moment gebruikt is en dus weer teruggezet moet worden. In het vak "Tool Change G-code" moet de tekst uit Figuur 25 komen. De "if" functie zorgt ervoor dat de printer de eerste Tx command niet aanziet als een toolchange. Anders wordt de tool na het oppakken meteen weer afgezet. Dit is alles wat er in de slicer aangepast moet worden om de Hybrid_Changer te laten werken. Nu moet de printer de variabelen lezen en de juiste handelingen uitvoeren.



```
Tool change G-code
{if layer_num > -1}
  SUB_TOOL_DROPOFF T=[current_extruder]
; M400
; SUB_TOOL_PICKUP T=[next_extruder]
{endif}
```

Figuur 25

12.3.2 KTCC

Op aanraden van mede-hobbyisten is er gestart met het aansturen van de printer via de KTCC-plugin, zoals eerder besproken in hoofdstuk 3.4.1. Na een week was het echter niet gelukt om de printer operationeel te krijgen met behulp van deze plugin. Gedurende deze week is er wel aanzienlijk veel kennis vergaard. Inmiddels was er voldoende inzicht verworven om de noodzakelijke macro's te schrijven en zo de printer operationeel te maken.

12.3.3 Macro's

Nu de kennis er was om macro's op te bouwen is er een nieuw .cfg aangemaakt, genaamd tools.cfg. In deze file zijn twee macro's gecreëerd een voor de tool drop off genaamd SUB_TOOL_DROPOFF en een macro voor tool pick-up genaamd SUB_TOOL_PICKUP. Deze macro's zijn gebaseerd op die van KTCC.

Om de macro's te gebruiken moet er in de printer.cfg wat de main file is verwezen worden naar de tools.cfg file. Dit gebeurt met [include tools.cfg]. Het begin van beide SUB_TOOL macro's is te zien in Figuur 26.

In de macro wordt gezocht naar parameter T die geven wordt zoals te zien in Figuur 25. Aan de hand van de T die is meegegeven gebruikt de printer die specifieke coördinaten om de tool te docken en undocken. De volledige macro's zijn weer gegeven in Appendix E. De toepassing van de Hybrid_Changer in de config files is dus ontzettend makkelijk zoals te zien. Het vergt slecht het downloaden van de tools.cfg file en naar deze te verwijzen in de printer.cfg file.

```
[gcode_macro SUB_TOOL_PICKUP]
description: Internal subroutine. Do not use!
gcode:
  {% set tool = params.T|default(0)|int %}

  {% if tool == 0 %}
    # Tool 0
    {% set zone_coords = [306, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [306, 308, 15] %}
  {% elif tool == 1 %}
    # Tool 1
    {% set zone_coords = [178, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [178, 308, 15] %}
  {% elif tool == 2 %}
    # Tool 2
    {% set zone_coords = [52, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [52, 308, 15] %}
  {% endif %}
```

Figuur 26

13. Evaluatie

13.1 Programma van eisen

Terugkijken naar het programma van eisen hoofdstuk 4.

Tabel 9

Nr.	Eis	Eenheid	Bron	Datum	Verificatie
Prestatie					
1	Twee of meer materialen 3D printen	Getallen	Sven Dekker	27-09-2023	Prestatie na realisatie
2	Toepasbaar op twee of meer 3D printers waarin deze specifieke printers in maat kunnen verschillen	-	Sven Dekker	27-09-2023	Monteren na realisatie op 2 of meer 3D printers
3	Kosten zijn minder dan €350	Euro	Sven Dekker, gebaseerd op vergelijkbare producten	27-09-2023	Optellen kosten van alleen het opleverproduct
4	Veranderen van materiaal duurt minder dan 30 sec	Seconden	Sven Dekker	27-09-2023	Timen na realisatie
5	Maakbaar voor iedereen met een 3D printer	-	Sven Dekker	27-09-2023	Controleren na realisatie
6	Open-source delen van het project	-	FabLab Waag	27-09-2023	Downloadbaar via GitHub
7	Betrouwbaarheid zodat er geen gebruiker interactie nodig is tijdens 3D printer	-	Sven Dekker	27-09-2023	Interacties nagaan tijdens print
8	3D printer wordt automatisch gekalibreerd als kalibratie nodig is	-	Sven Dekker	27-09-2023	Niet handmatig kalibreren

13.1.1 Voldoet ons ontwerp aan de Eisen

De eerste eis: Voldoet aan de verificatie, omdat het eindresultaat is dat de Hybrid_Changer aan het einde van de stage in staat is om met meer dan drie materialen in één afdruk te printen. De geteste materialen zijn PLA, ABS en ASA.

Eis twee: Voldoet niet aan de verificatie. Uiteindelijk is besloten om het project te vereenvoudigen door gebruik te maken van het open-source EVA 3-carriage platform.

Eis drie: Voldoet aan de verificatie. In hoofdstuk 11.2 staat een BOM met een kostenberekening.

Eis vier: Voldoet niet aan de verificatie. Momenteel duurt een toolchange 90 seconden. Er zijn verschillende verbeteringen mogelijk waardoor er aanzienlijk tijd kan worden bespaard (zie aanbevelingen), maar het concurreren met de ouderwetse toolchangers lijkt voorlopig nog niet haalbaar.

Eis vijf: Voldoet aan de verificatie. Alle maak onderdelen kunnen worden geprint, en de kooponderdelen zijn gemakkelijk verkrijgbaar.

Eis zes: Voldoet binnenkort. Alle kennis, informatie en bestanden zijn beschikbaar. Er moet echter nog worden gewerkt aan een handleiding om het toevoegen van de add-on gemakkelijk te maken.

Eis zeven: Voldoet na een testopgave van drie prints. Om deze eis goed te verifiëren, moet de kwantiteit van de testopgave en de totale printtijd aanzienlijk worden verhoogd.

Eis acht: Voldoet aan de verificatie. Door de mechanische verbinding zit de nozzle altijd op dezelfde plek, het resultaat is te zien in Figuur 27 geprint met 3 extruders.



Figuur 27

14. Resultaten

Het resultaat is een werkende add-on voor RatRig V-Core 3D printers. Zoals gedemonstreerd in dit filmpje: <https://youtu.be/Vkmg2BmYqe8>.

14.1.1 Vergelijken

Om het resultaat van de Hybrid_Changer in perspectief te plaatsen, is er een vergelijking gemaakt tussen vier producten: PrusaXL, Hybrid_Changer, ERCF en Bambu Lab AMS.

De keuze voor de PrusaXL is gebaseerd op het feit dat dit de commercieel verkrijgbare toolchanger is.

ERCF is geselecteerd omdat deze MMU fysiek beschikbaar is.

Bambu Lab AMS staat bekend als de benchmark in de markt voor multi-material 3D printen en is veruit de populairste optie.



Figuur 28

Het resultaat voor zowel de PrusaXL als Bambu Lab AMS zijn uit hun eigen slicer (prusaslicer en bambu studio) gehaald met de standaard instellingen. Zowel de Hybrid_Changer als ERCF zijn daadwerkelijk getest. In Figuur 28 is het verschil tussen deze twee producten goed te zien met de Hybrid_Changer bovenaan. De Hybrid_Changer maakt, net als de PrusaXL, alleen gebruik van een prime tower dit is de minimale verspilling nodig bij toolchangers.

Massa testprint: 4,38 g

Tabel 10 Resultaat vergelijking

	Print tijd (min)	Plastic verspilling (gram)	Percentage t.o.v. massa testprint (%)	Prijs 3x extruders (€)
PrusaXL	29	0,93	21,2	1600*
Hybrid_Changer	88	0,65	14,8	210
ERCF	93	8,06	184	120
Bambu Lab AMS	106	21,34	487	365

*Dit is de prijs voor 5x printheads. 3x open-source printhead (DIY) ~€600

Als de printers met minimale verspilling met elkaar worden vergeleken, blijkt de Hybrid_Changer de meest economische optie te zijn.

15. Conclusie

In dit project is antwoord gezocht op de vraag: "Hoe kan de multi-material 3D printing add-on ontworpen worden om kosten en plastic verspilling te minimaliseren?" Het onderzoek omvatte een gedegen analyse van de bestaande markt en producten.

Er zijn verschillende technieken om met meerdere materialen te 3D printen. Uit de probleemstelling is gebleken dat alle technieken nadelen hebben waardoor er ruimte is voor verbetering.

Momenteel zijn er al een hoop producten op de markt om van te leren. Er is een afbakening gemaakt om de producten van de drie meest potentiële technieken te analyseren. Dit zijn MMU, toolchangers en CNC nozzle swapper. Uiteindelijk heeft de afbakening gezorgd voor de combinatie van deze drie technieken voor de Hybrid_Changer concept. De voordelen van dit concept omvatten het behoud van elektrische componenten op de printhead, een passieve en onderhoudsarme tool, minimalisatie van plastic verspilling en een lage prijs.

Uit de vergelijking kwam naar voren dat de Hybrid_Changer de laagste percentuele verspilling had in vergelijking met de massa van het testobject. Hoewel PrusaXL, als vertegenwoordiger van toolchangers, ook minimale plastic verspilling heeft, blijkt de Hybrid_Changer een meer kostenefficiënte keuze te zijn.

Met een prijs van €210 weet de Hybrid_Changer add-on zich te onderscheiden in de multi-material 3D printing markt door kosten en plastic verspilling te minimaliseren. Het unieke concept heeft na één iteratie nog veel potentieel voor verdere ontwikkeling. Door het project open-source te delen, is de hoop dat hobbyisten en bedrijven de mogelijkheden van dit concept inzien en door ontwikkelen. Dit concept/product bevordert de verduurzaming en maakt de multi-material 3D printingmarkt toegankelijker met lagere instapkosten.

15.1 Aanbevelingen

- Een nozzle wiper toevoegen. De nozzle wiper maakt de nozzle schoon na het oppakken van een tool, omdat er vaak nog plastic achterblijft door oozing
- In de software het gelijktijdig uitvoeren van verschillende opdrachten om tijdswinst te realiseren, aangezien meerdere opdrachten parallel kunnen worden uitgevoerd.
- Voorwaartse verbinding in plaats van een zijwaartse verbinding. De zijwaartse beweging neemt veel ruimte in beslag; een voorwaartse beweging maakt efficiënter gebruik van de beschikbare ruimte en maakt plaats voor meer naast elkaar geplaatste tools.

Steel rod 3mm. (sd). Opgehaald van Aliexpress:

https://www.aliexpress.com/item/1005003594895025.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.465c605eSONb9Z&algo_pvid=07f782b6-fa76-440c-af77-735dec515741&algo_exp_id=07f782b6-fa76-440c-af77-735dec515741-0&pdp_npi=4%40dis%21EUR%215.01%212.70%21%21%2138.10%2120.57%2

Thermal insulation pad. (sd). Opgehaald van Aliexpress:

https://www.aliexpress.com/item/1005004595565029.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.3e3055c30784CD&algo_pvid=1f7e1405-40a0-4eb9-ba3f-3f4232fa048c&algo_exp_id=1f7e1405-40a0-4eb9-ba3f-3f4232fa048c-0&pdp_npi=4%40dis%21EUR%2111.26%218.78%21%21%2111.97%219.34%2

T-nut M6. (sd). Opgehaald van Aliexpress:

https://www.aliexpress.com/item/1005005751429865.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.99.19861802888WqO

V-Groove roller. (sd). Opgehaald van Aliexpress:

https://www.aliexpress.com/item/32868287386.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.3bd671d35hlXyx&algo_pvid=4db0f75b-3724-445d-b2cd-a91ef63a9b55&algo_exp_id=4db0f75b-3724-445d-b2cd-a91ef63a9b55-0&pdp_npi=4%40dis%21EUR%213.51%213.09%21%21%213.73%213.28%21%40210

Bambu Lab EU. (n.d.). *Hotend Heating Assembly - A1 mini.* <https://eu.store.bambulab.com/nl-nl/collections/accessories-for-a1-mini/products/hotend-heating-assembly-a1-mini>

BigBrain3D – Every 3D model in MultiColor. (n.d.). <https://www.bigbrain3d.com/>

DDoxle. (n.d.). *Reddit - Dive into anything.*

https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/15k3kia/mmu3_review/

HelgeKeck. (n.d.). *GitHub - HelgeKeck/rome: Multi extruder to direct extruder setup.* GitHub.

<https://github.com/HelgeKeck/rome>

Home of the 3DChameleon. (n.d.). 3D Chameleon. <https://www.3dchameleon.com/>

Moggieuk. (n.d.-a). *GitHub - moggieuk/ERCF-Software-V3: New software driver for ERCF control under Klipper.* GitHub. <https://github.com/moggieuk/ERCF-Software-V3>

Moggieuk. (n.d.-b). *GitHub - moggieuk/Happy-Hare: MMU software driver for Klipper (ERCF, Tradrack, Prusa).* GitHub. <https://github.com/moggieuk/Happy-Hare#---important-concepts-and-features>

Mueller, R. K. (2019, September 22). *3D Printing: Dual Nozzle Printhead | XYZ dims **.

<https://xyzdims.com/2019/09/22/3d-printing-dual-nozzle-printhead/>

Mueller, R. K. (2021, January 31). *3D Printing: Multiple Switching Extrusions (MSE) – Draft | XYZ dims **.

<https://xyzdims.com/2021/01/31/3d-printing-multiple-switching-extrusions-mse/>

NERO 3D. (2022, February 12). *The Enraged Rabbit Carrot Feed - The open source customizable MMU* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ccwiylrg7KM>

Pinkhatpug. (n.d.). *Reddit - Dive into anything.*

https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/qmg3eu/is_mosaic_palette_3_worth_it_any_users_feedback_i/

TypQxQ. (n.d.). *GitHub - TypQxQ/Klipper_ToolChanger: A Klipper plugin and macros for controlling a Toolchanging 3D printer.* GitHub. https://github.com/TypQxQ/Klipper_ToolChanger

Viesturz. (n.d.). *GitHub - viesturz/tapchanger: Voron TapChanger.* GitHub.

<https://github.com/viesturz/tapchanger>

Appendix A: Probleemstelling

MMU (multi-material unit)

Het is een toevoeging aan single-extruder printers om met meerdere materialen te printen. In de unit wordt het filament uitgewisseld, waarbij filamenten tijdens het printen uit de extruder kan worden teruggetrokken en voor een ander kan worden vervangen.

Nadelen:

- **Tijd- en materiaalverspilling:** Elke wisselen van materiaal kost meer dan 30 sec en er moet ook materiaal gepurged worden. Dat betekent dat er tientallen mm materiaal door de nozzle wordt geduwd om de kleur en materiaal puur te krijgen. In de slicer proberen ze dit op slimme manieren op te lossen door de purge tower (toren voor de purge materiaal) als invul te gebruiken van de print zelf, maar dit is niet ideaal.
- **Complexiteit:** Het bouwen en van een MMU zoals de open source ERCF (Enraged Rabbit Carrot Feeder) is erg complex de assembly manual heeft dan ook meer dan 130 pagina's.



Figuur 29 MMU

Filament splicing

Filament splicing is een techniek die wordt gebruikt in 3D printen om twee filamentsegmenten aan elkaar te hechten om een ononderbroken filamentdraad te creëren. Dit wordt gebruikt om met meerdere filamentkleuren of -materialen te printen. De slicer geeft op het juiste moment aan wanneer het filamenten moet worden gecombineerd om de gewenste kleureffecten of materiaalwisselingen in je 3D prints te creëren.



Figuur 30 Filament splicing

Nadelen:

- **Kalibreren:** Je moet de lengte van de splicer naar de printhead goed instellen zodat de verandering van het filament op het juiste moment gebeurt
- **Purge tower:** Filament splicing vereist ook de aanwezigheid van een purge tower.

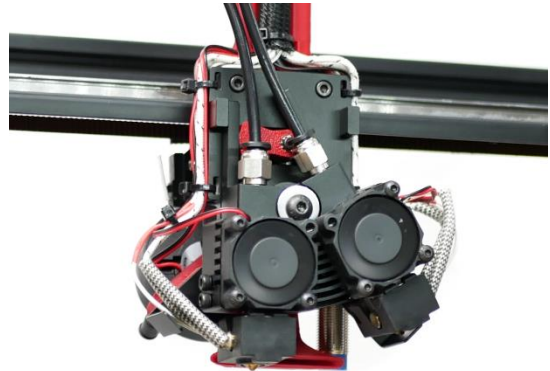
Dual extruder printhead

Dual hotend

Dual hotends zijn beschikbaar in verschillende configuraties. Sommige modellen zijn uitgerust met twee naast elkaar geplaatste printkoppen (Figuur 32), terwijl andere modellen gebruikmaken van een systeem waarbij tussen de ene hotend en andere wordt geschakeld (Figuur 31).

Nadelen “Dual Switching Hotend” (Figuur 31):

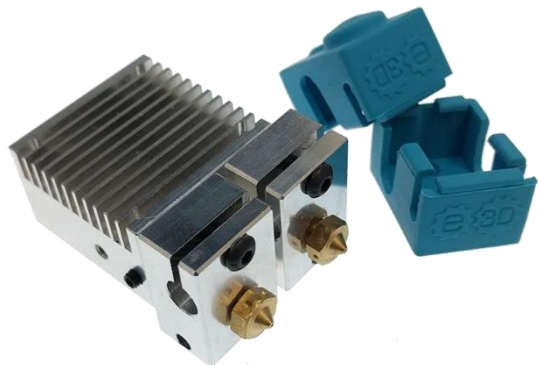
- **Bowden extruder:** Bowden extruder is een component van een 3D printer waarbij de extruder (de motor die het filament voert) zich op afstand van de printkop bevindt en het filament via een buis naar de printkop transporteert. Bowden extruders zijn minder geschikt voor flexibele filamenten, **Retractie-instellingen zijn kritisch en nauwkeurigheid op lange afstand is moeilijk omdat filament druk buiging van de buis beïnvloed.**



Figuur 31 Dual switching hotend

Nadelen “Dual Nozzle Hotend” (Figuur 32):

- **Oozing:** Oozing is het ongewenst lekken van gesmolten filament uit de printkop wanneer in dit geval de andere printkop print. Dit lekken resulteert in druppels of dunne filamentstrengen die zich afzetten op plaatsen waar ze niet horen te zijn of zelf het printobject van het bed kunnen duwen.



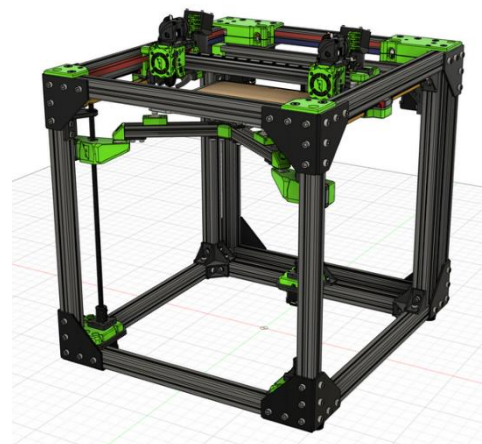
Figuur 32 Dual nozzle hotend

IDEX (Independent Dual Extruder) 3D printing

IDEX is een type 3D printer dat twee onafhankelijke printkoppen heeft, de printkoppen kunnen onafhankelijk van elkaar verplaatsen op de x-as. Een voordeel dat geen enkel andere 3D printer heeft is dat je twee print tegelijkertijd kan printen.

Nadelen:

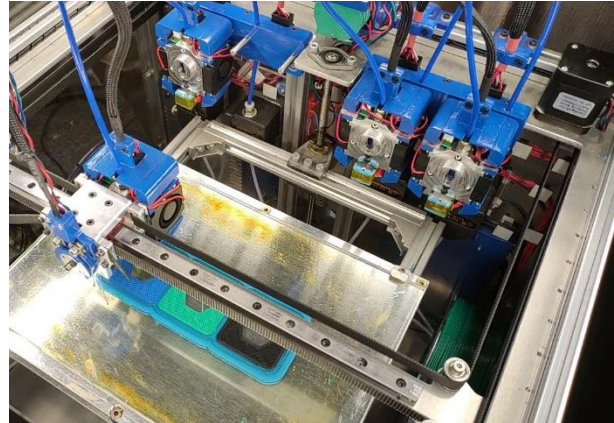
- **Verliest print oppervlakte:** Door een printkop toe te voegen bij een bestaande 3d printer verlies je print oppervlakte op het printbed



Figuur 33 IDEX

Toolchanger

Een toolchanger, is een component of systeem dat gebruikt wordt in geavanceerde 3D printers om verschillende gereedschappen, zoals printkoppen, lasergraveerders, snijplotter en meer, automatisch te verwisselen tijdens het printproces. Het belangrijkste doel van een toolchanger is om de veelzijdigheid van een 3D printer te vergroten door verschillende functies te bieden zonder dat de gebruiker handmatig gereedschap hoeft te verwisselen.



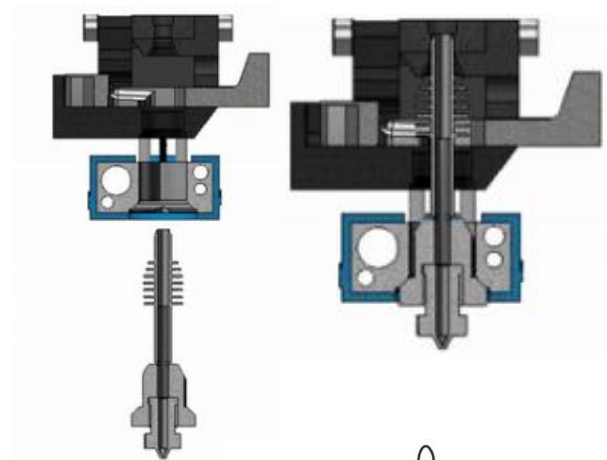
Figuur 34 Toolchanger

Nadelen:

- **Kosten:** Voor elk materiaal wat je in een print meer wilt gebruiken heb je extra printhoofd nodig. De componenten die je dan extra moet aanschaffen zijn extruder, hotend, extruder cooling fan, part cooling fan, printkop. De kosten hiervan lopen snel op.
- **Complexiteit:** Een toolchanger vereist complexe software- en firmwareconfiguraties om de juiste gereedschapskeuzes en bewegingen te coördineren. Dit gaat gepaard met het kalibreren van de ophaal en afzet plek van de printhoofd. Dit is een behoorlijke leerdrempel.
- **Betrouwbaarheid:** Het wordt steeds uitdagender om betrouwbaarheid te behouden naarmate het aantal bewegende onderdelen toeneemt. Er kunnen problemen optreden met betrekking tot uitlijning, slijtage van componenten en kalibratie, wat kan resulteren in verminderde betrouwbaarheid en onverwachte uitval.

CNC nozzle changing

De Swapper3D van BigBrain3D (Figuur 36) is de enige op de markt die een nozzle change doet die lijkt op een CNC toolchanger. Dit doen ze met veel bewegende onderdelen en hun eigen extruder en nozzles. De nozzle komt ervan onder de hotend in en wordt vastgezet met een pin bovenin (Figuur 35).
(*The Swapper3DTM: No more purge blocks!* – BigBrain3D, z.d.)



Figuur 35

Nadelen:

- **Complexe:** Komt neer op wat bij toolchanging ook gezegd is. Dit ontwerp heb je alleen nog meer bewegende onderdelen.

Bezitsrecht: De hotend en de nozzle zijn van BigBrain3D en niet opensource verkrijgbaar en de kosten van de producten liggen erg hoog.



Figuur 36

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Appendix B: Welke specifieke Multi-material 3D printing producten bestaan er?

Nader analyseren:

MMU

Het is interessant dat er met een extruder meerdere materialen geprint kunnen worden. Daarentegen is het zonden dat het plastic in de hotend gepurged moet worden. Zou dit opgelost kunnen worden is dit een interessante oplossing.

Verdiepen = ✓



Figuur 37 ERCF

Filament splicing

De markt voor bestaande producten is beperkt. Momenteel is er slechts één bekend product dat deze technologie toepast, namelijk de Palette 3 van Mosaic \$599 (Figuur 38). Als we op "Duck Duck Go" zoeken naar "review Palette 3", verschijnt de eerste link naar een Reddit-discussie (Pinkhatpug, n.d.). In de discussie zijn de meningen over het algemeen negatief, en bovendien heeft deze technologie al geruime tijd geen innovatieve of ontwikkelingen doorgemaakt.

Verdiepen = ✗



Figuur 38 Palette 3

Dual extruder printhead

Het kalibreren van een "Dual nozzle hotend" kan uitdagend zijn omdat je twee punten op het printbed nauwkeurig moet instellen op hetzelfde niveau. Als deze punten niet gelijk zijn, kan het moeilijk zijn om de twee printkoppen correct op elkaar af te stemmen, aangezien er beperkt of geen aanpassingsmogelijkheden zijn. Dit wordt ook belicht in een artikel op xyzdims.com (Mueller, 2019).

Verdiepen = ✗

De eerste indruk van de "Dual Switching Hotend" lijkt op een redelijke oplossing voor het printen met twee materialen. Het toevoegen van meer printkoppen lijkt echter geen geschikt idee vanwege de mogelijke problemen met betrekking tot gewicht, precisie en complexiteit. Dit is op te halen uit het project Multiple Switching Extrusions (Mueller, 2021).

Verdiepen = ✗

IDEX

Voor multi-material 3D-printing met twee materialen lijkt de IDEX-technologie een van de meest geschikte methodes te zijn. Deze aanpak heeft uitgebreide online documentatie. Het innoveren van deze techniek kan echter uitdagend zijn, en bovendien is deze beperkt tot het gebruik van slechts twee materialen.

Verdiepen = ✗

Toolchanger

De toolchange methode wordt het meest gebruikt in de professionele industrie. Dit komt omdat het veel mogelijkheden biedt qua materialen, diameter van de nozzles en eventueel ander gereedschap. De kosten hiervan zijn dan minder belangrijk voor grote bedrijven. Ingeval de kosten beperkt kunnen blijven is deze methode ook interessant.

Verdiepen = ✓

CNC nozzle changing

De Swapper3D van BigBrain3D, zoals beschreven in (*BigBrain3D – Every 3D Model in MultiColor*, n.d.), is momenteel de enige op de markt die een nozzlewissel uitvoert die lijkt op een CNC-gereedschapswisselaar. Dit concept biedt de mogelijkheid om verschillende varianten te creëren en er is nog veel ruimte voor innovatie op dit gebied.

Verdiepen = ✓

Het verdiepende onderzoek zal in meer detail ingaan op de volgende methoden: MMU, Toolchanger en CNC-gereedschapswisselaar.

MMU:

In dit hoofdstuk worden verschillende MMU's onderzocht en geëvalueerd.

Prusa MMU (Specifiek MMU2)

Bij Waag FabLab hebben ze een Prusa mk3 met een MMU2. Om ervaring op te doen voor dit project is er een kalibratie kubus geprint met twee kleuren om de complexiteit laag te houden. Twee dagen lang heeft het geduurd om een semi-succesvolle print te krijgen (Figuur 39). Op verschillende lagen is de filament switch niet goed gelukt en heeft de printer niks geprint. Voor dit resultaat zijn er meer dan 6 ingrepen nodig geweest, voornamelijk in het begin. Deze print met 1 kleur duurt 1 uur en 15min en met 2 kleuren duurt dit 4uur en 34 min ook een groot nadeel.



Figuur 39

Na 5 onsuccesvolle en 1 semi-succesvolle print te hebben kan er geconcludeerd worden dat deze MMU niet betrouwbaar is en hier geen voorbeeld aan genomen moet worden.

Inmiddels heeft Prusa een MMU3 uitgebracht met een prijs van €329 waarbij de reviews beter zijn. Het grootste minpunt dat genoemd wordt in de review is "The problems start when trying to use mixed materials or PETG" (DDoxle, n.d., p. 57). Met verschillende materialen printen is juist het doel.

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

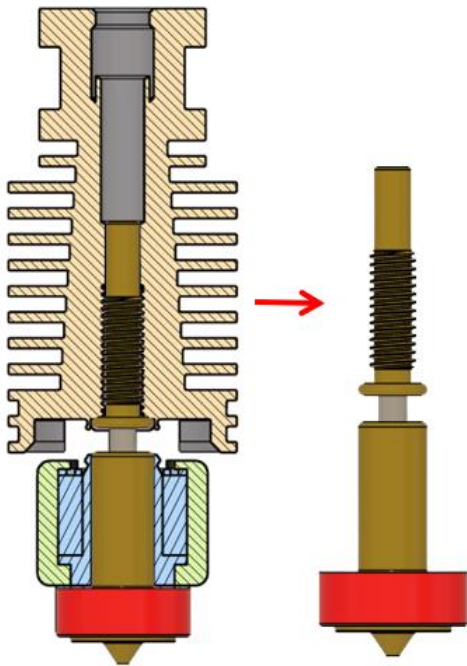
Enraged Rabbit Carrot Feeder (ERCF)

Dit is een opensource MMU waarbij alle documentatie op GitHub is gezet. In deze documentatie is ook een link te vinden naar de BOM waarbij verschillende linken staan naar websites waar de onderdelen gekocht kunnen worden. Hierbij is ook netjes aangegeven dat dit affiliatie links zijn. Via andere leveranciers zijn ook kits te koop rond €150.

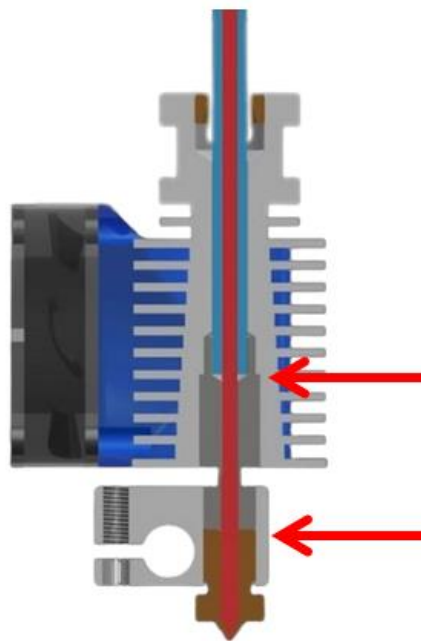
De videoreview van NERO 3D (NERO 3D, 2022) bespreekt zowel de sterke punten als zwakke punten, evenals enkele problemen en successen. Een van de grootste problemen die de reviewer ondervond, was het onjuist vormgegeven uiteinde bij het terugtrekken van het filament (Figuur 40). Later bleek dit te wijten te zijn aan een ongeschikte combinatie van het hotend en de nozzle. Het oude hotend bestaat uit meerdere onderdelen, wat kan leiden tot het vastlopen van plastic op verschillende plaatsen (Figuur 42). De nieuwe hotend, de RapidChange Revo, heeft echter een nozzle waarin de heatbreak is geïntegreerd. Dit heeft als voordeel dat de gladde binnenkant nergens kan blijven haken (Figuur 41). Daarnaast merkte de reviewer op dat zelfs als je niet met 6 materialen print, je toch altijd 6 materialen beschikbaar hebt zonder telkens van filamentrol te hoeven wisselen.



Figuur 40



Figuur 41



Figuur 42

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

3DChameleon

De 3DChameleon mk3 kost \$179,- met verzendkosten €220,- en kan schakelen tussen vier kleuren. Op hun website wordt uitgelegd hoe dit systeem werkt. Ze beschrijven het als volgt: "De 3D Chameleon werkt door gebruik te maken van de bestaande mechanische hardware op je 3D-printer om automatisch de filamenten te verwijderen en opnieuw in te voeren wanneer er een kleur- (of materiaal) wijziging nodig is. Door gebruik te maken van je bestaande elektronica kunnen we standaard G-Code commando's gebruiken om de 3D Chameleon te vertellen welke kleur geselecteerd moet worden" (Home of the 3DChameleon, n.d.).



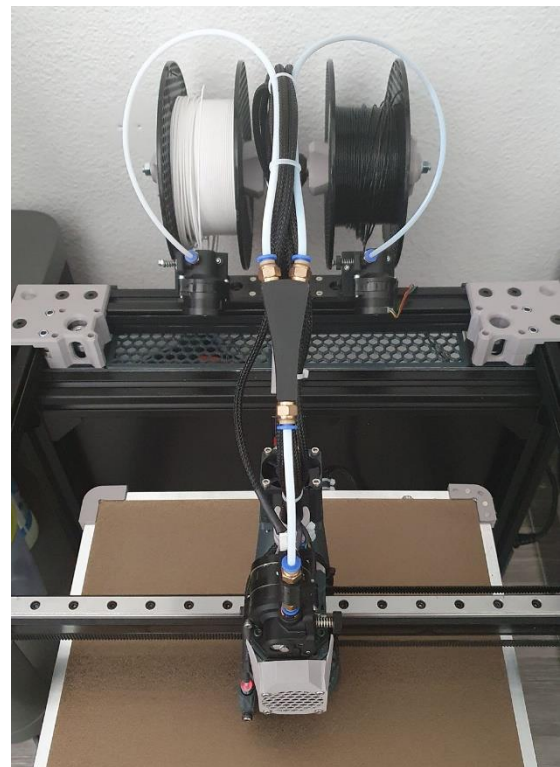
Figuur 43 3DChameleon

Om deze uitleg te vereenvoudigen, maakt de 3DChameleon gebruik van een eigen microcontroller en een drukknop. Bij een filamentwissel wordt in de G-code opgenomen om de knop een bepaald aantal keer in te drukken voor de ingestelde kleur, zodat de microcontroller weet welke kleur geladen moet worden. Er is dus geen integratie tussen de printer en de 3DChameleon. Dit maakt het een geschikt product voor goedkopere printers zoals de Ender 3 V2 en andere vergelijkbare modellen.

ROME

De uitleg van ROME op HelgeKeck GitHub repository ROME (HelgeKeck, n.d.-b) is veel sneller dan een reguliere MMU- of ERCF-opstelling. Het volledige proces van het laden en ontladen van filament verloopt meerdere malen sneller, niet alleen omdat ROME het filament gewoon achter de Y-splitsing hoeft te parkeren. In zijn eigen modus behandelt ROME het laden en lossen van filament en slaat het de door de slicer gecontroleerde fase over. Dit proces is sterk geoptimaliseerd voor een specifieke Hotend/ Filament-combinatie.

Een grote tijdbesparing zoals HelgeKeck al had uitgelegd is dat het filament maar tot achter y-splitsing geparkeerd hoeft te worden. Voor elke filament verandering is dit misschien maar een paar seconden maar met al snel meer dan honderden filament veranderingen telt dit snel op. Dit geldt overigens ook voor de 3DChameleon.



Figuur 44 ROME

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Bambu Lab

Bambu Lab is een vooraanstaande speler in de 3D-printindustrie, vooral op het gebied van multi-material printing. Hun printers, de P1P (€1015,80 incl. AMS) en de X1-Carbon (€1524,19 incl. AMS), hebben zich bewezen als grote successen, vooral in combinatie met hun Automatische Materiaalsysteem (AMS) van €365,03. Het AMS is echter specifiek ontworpen voor gebruik met hun eigen printers en is niet compatibel met andere merken.

Recentelijk heeft Bambu Lab op de dag van schrijven een nieuw systeem gelanceerd, de A1-mini (€497,21 incl. AMS Lite), in combinatie met de AMS Lite.

De AMS Lite is een doorontwikkeling van het AMS-systeem. Enkele opvallende verbeteringen zijn onder andere dat de filamentrollen nu in het midden worden geplaatst in plaats van aan de buitenkant, wat handig is voor het gebruik van kartonnen rollen. Daarnaast is de splitter, waar het filament naar toe wordt teruggetrokken, nu direct boven de extruder geplaatst in plaats van in een kist erboven, wat eerder ook al als een positieve verandering werd gezien. Bovendien is de hoeveelheid plastic die moet worden gepurged bij dit systeem verminderd.

Hoewel de producten van Bambu Lab niet open source zijn, bieden ze momenteel een breed scala aan losse reserveonderdelen aan op hun website. Dit biedt wellicht mogelijkheden voor de ontwikkeling van een open source multi-material unit, dit wordt opgenomen in de onderzoeksvraag "Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget". Het is moeilijk te zeggen hoelang ze reserveonderdelen zullen blijven aanbieden.



Figuur 45 Bambu Lab met AMS



Figuur 46 A1-mini met AMS Lite

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

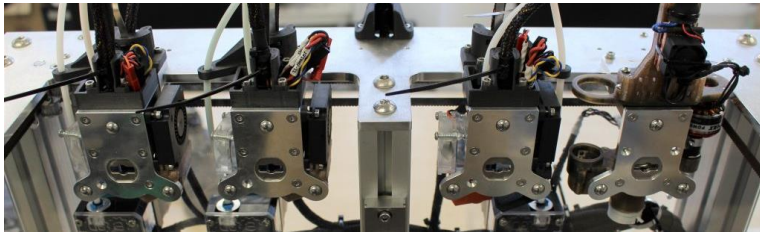
Toolchanger:

In dit hoofdstuk worden verschillende toolchangers onderzocht en geëvalueerd

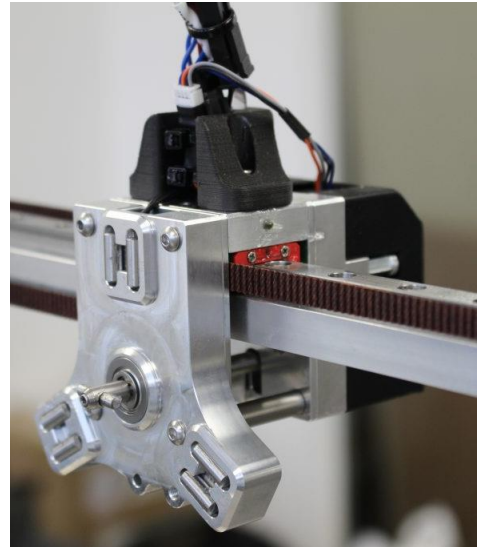
E3D Toolchanger

E3D, wat staat voor "Engineering 3D Printing Solutions," was in 2019 een van de eerste toonaangevende fabrikanten die het Toolchanger-systeem introduceerde, dit was een belangrijke doorbraak. Veel opensource toolchanger zijn nog steeds gebaseerd op hun technologie.

De toolchanger mechanisme heeft drie raakpunten die redelijk ver uit elkaar liggen aan de buitenkant voor de stabiliteit. Om de tool stevig vast te houden wordt er gebruik gemaakt van een sleutel die een kwartslag draait. In Figuur 47 zie je de printkop en in Figuur 48 het gereedschap (tools).



Figuur 48 E3D Toolchanger



Figuur 47

Wham Bam: The MUTANT V2

De MUTANT V2 is een universeel gereedschapswisselsysteem dat de mogelijkheid biedt om je FDM-printer veelzijdiger te maken. Zo kan er eenvoudig de hotend gewisseld worden voor gereedschappen, zoals bijvoorbeeld: lasersnijders, penplotters, vinylsniijders en meer. Dit systeem is alleen niet bedoelt om in een 3D print proces van gereedschap te wisselen.

Het elegante van dit ontwerp is dat de 2 platen eenvoudig in elkaar schuiven met behulp van een zwaluwstaartverbinding en stevig worden vergrendeld op hun plaats met een hendel. Het elektrisch contact wordt geregeld met een reeks pogo-pinnen, ook wel een veercontactpin of drukveerpin genoemd. Dit is ideaal voor toolchangers.



Figuur 49 The MUTANT V2

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

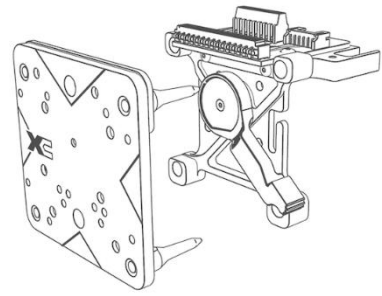
© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

XChange

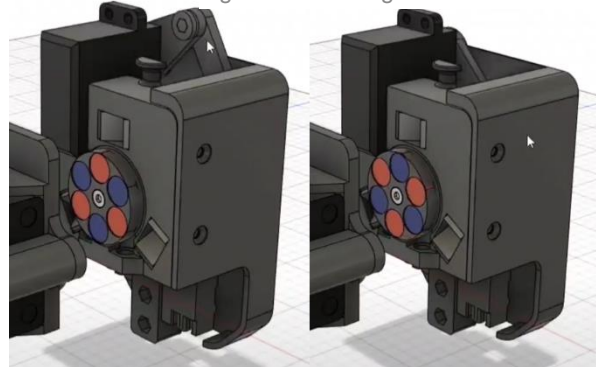
XChange van PrinterMods is een snel wissel gereedschapskop voor elke 3D-printer. Dit is nog geen bestaand product maar staat live op Kickstarter waar nog wordt gezocht naar financiers.

Dit product heeft veel weg van de MUTANT V2. Bij beide producten is het niet mogelijk om tijdens de print van gereedschap te wisselen, maar de XChange pakt de koppeling wel anders aan wat potentiële mogelijkheden biedt. XChange maakt namelijk gebruik van magneten en van pins, waardoor de koppeling alleen naar voor en naar achter hoeft en niet omhoog en omlaag zoals bij de MUTANT V2.

Het loskoppelen wordt gedaan met behulp van de polariteit van de magneten. Door de hendel naar boven te bewegen draaien de magneten zo dat ze elkaar afstoten. Dit is goed te zien in Figuur 50, dit is een ander ontwerp maar hetzelfde principe.



Figuur 50 XChange



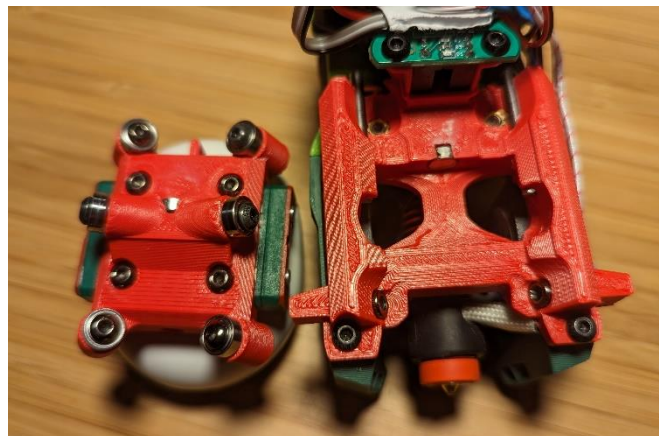
Figuur 51

Tapchanger

Tapchanger is een opensource project van viesturz (Viesturz, n.d.).

Het idee achter zijn ontwerp is dat je geen servomotoren nodig hebt of andere bewegende onderdelen om hem te koppelen en te ontkoppelen. Met een sensor wordt gecheckt of de koppeling en ontkoppeling succesvol is.

Viesturz heeft in een GitHub repository de CAD files gedeeld met een BOM en andere documentatie. Ook is hij actief in een discord channel "Voron Toolchangers Discord".



Figuur 52 Tapchanger

CNC nozzle changing:

In hoofdstuk 2 van het "Plan van Aanpak," onder de sectie "Probleemstelling," hebben we al uitgebreid gesproken over The Swapper3D. Momenteel zijn er geen andere producten op de markt die dezelfde methode toepassen. Het concept van elk materiaal of kleur met zijn eigen nozzle combineren is buitengewoon inspirerend. Wat interessant is, is dat er de afgelopen jaren en zelfs maanden nieuwe producten op de markt zijn verschenen die innovatie binnen dit concept mogelijk maken. Dit wordt verder onderzocht in onderzoeksvraag 3.

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Appendix C: Welke toolchangemethodes bestaan er bij andere productiemachines?

Carousel automatic tool changer

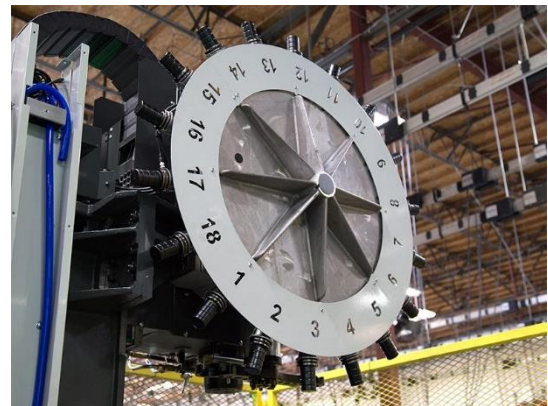
Ook wel een Carrousel Automatische Gereedschapswisselaar genoemd is een essentieel onderdeel dat vaak wordt aangetroffen in CNC-machines. Het primaire doel ervan is om het proces van het wisselen van gereedschappen tijdens bewerkingsoperaties te automatiseren, waardoor de efficiëntie wordt verbeterd en de stilstand tijd wordt verminderd.

Nadelen:

- Complexiteit is hoog met meer bewegende onderdelen
- De onderdelen voor 3D printers zijn hier niet voor ontwikkeld
- Bestaande printers zoals de Ratrig Vcore-3.1 en Voron printers vereisen veel modificaties om ruimte te creëren voor een carrousel. Side Mount Carousel Automatic Tool Changer (Figuur 54) zou hierbij kunnen helpen zoals gezien bij de Swapper3D (Figuur 36) maar de complexiteit wordt behouden.



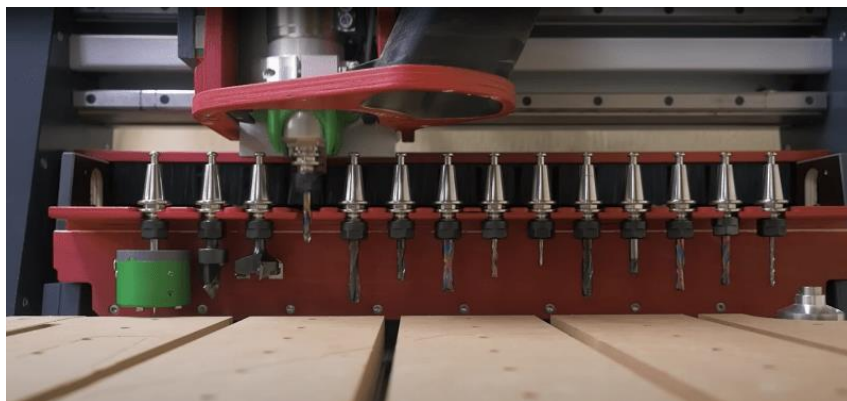
Figuur 53



Figuur 54

Linear automatic tool changer

Ook wel een Lineaire Automatische Gereedschapswisselaar is een apparaat dat vaak wordt gebruikt in bewerkingscentra en CNC-machines om het proces van het wisselen van snijgereedschappen tijdens verschillende bewerkingsoperaties te automatiseren. In tegenstelling tot de Carousel automatic tool changer, die een roterende gereedschapsofslagcarrousel gebruikt, maakt een lineaire automatische gereedschapswisselaar gebruik van een lineair bewegingsmechanisme om gereedschapswisselingen te realiseren. deze techniek zie je ook terug in de huidige tool change 3D printers.



Figuur 55

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

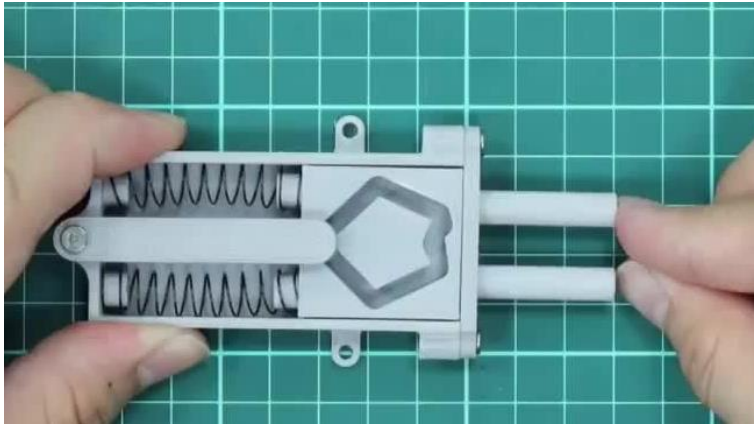
Push to release mechanism

In het geval dat er gebruik gemaakt gaat worden van de tool change methode zijn er verschillende opties om de tool mechanisch vast te houden zonder dat er gebruik gemaakt hoeft te worden van motoren. Hierdoor worden de kosten laag gehouden en complexiteit van de ophanging is lager, omdat er geen motor aangesloten hoeft te worden en geprogrammeerd.

De beste voorbeelden zijn van ladevergrendelingen. Er zijn drie afbeeldingen van drie verschillende technische mechanismen.



Figuur 56



Figuur 57



Figuur 58

Appendix D: Welke koop onderdelen bieden mogelijkheden binnen het budget?

RapidChange Revo

In tegenstelling tot andere spuitmonden kan de Revo hotend €26,99 gemakkelijk worden verwisseld door de gebruiker. Dit komt doordat de warmteonderbreker (heatbreak) en de spuitmond één object vormen. Bovendien kan de hotend worden vastgepakt bij de siliconen hoes en met de hand worden vastgedraaid.



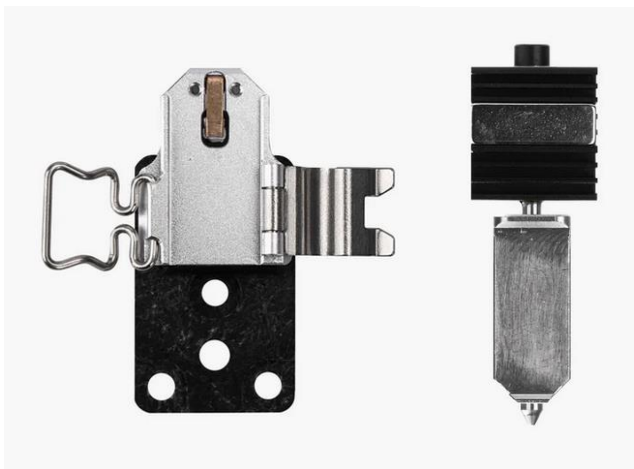
Figuur 59 RapidChange Revo

Om de Revo vast te draaien zijn er zowat 15 revoluties nodig. Dit zou geautomatiseerd worden doormiddel van een stepper motor en dezelfde softwaretechnologie van sensorless homing. Sensorless homing maakt gebruik van de motor en de lading die het verplaatst om vast te stellen wanneer het onderdeel zijn eindpositie heeft bereikt.

Bambu Lab hotend

Bambu Lab heeft een printer A1 mini waarvoor ze groot aantal reserveonderdelen en accessoires voor aanbieden. Ook hun hotend-verwarmingconstrustie (Figuur 60) en hotends met nozzle (Figuur 60). “De Hotend-verwarmingsconstructie is speciaal ontworpen om het snelle verwisselbare ontwerp van de hotend te ondersteunen. Een snel klemmechanisme wordt gebruikt om het verwarmingsblok en de verwarmingsbasis vast te zetten, waardoor een gemakkelijke scheiding van de thermische en elektronische componenten van de hotend mogelijk wordt.” (Bambu Lab EU, n.d.)

Er is dus een eenmalige aankoop nodig van de hotend-verwarmingconstrustie €21,34 en voor elke extra hotend met nozzle zijn de kosten €13,21. Deze producten maken het mogelijk om alleen de hotend met nozzle te verwisselen. Met dit concept worden alle kabels op de printkop gehouden en is er niet nog een extruder, hotend fan en partcooling fan nodig. Dit kan flink schelen in de kosten en complexiteit.



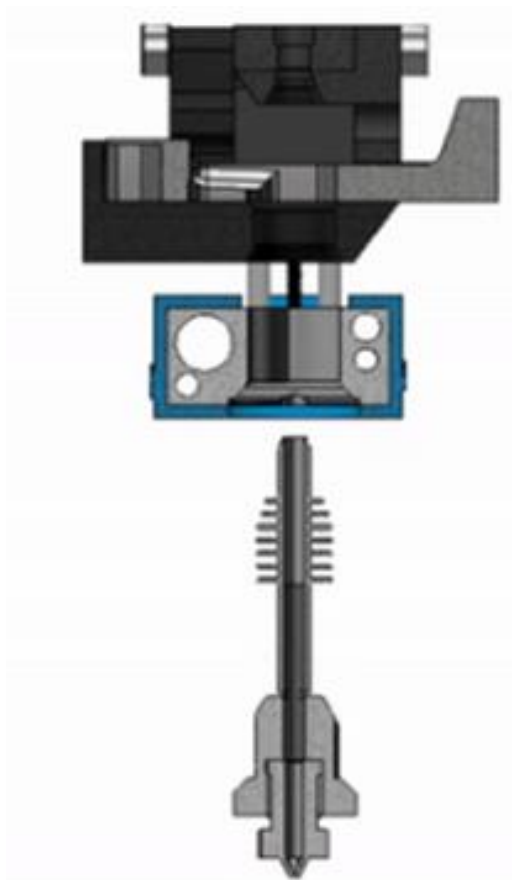
Figuur 60

QuickSwap – Hotend and Insert

BigBrain3D biedt ook los hun QuickSwap Hotend (Figuur 62) aan voor \$99,-. De Inserts verkopen ze los voor \$24,99 hierbij moet je nog wel je eigen nozzle toevoegen. Deze producten bieden ook mogelijkheden. Alleen zijn ze momenteel niet op voorraad. BigBrain3D is ook geen grote naam in de 3D print wereld, dit biedt ook geen zekerheid in de toekomst.

Ultimaker print core

UltiMaker biedt snel verwisselbare printkernen aan voor hun S-serie tegen een prijs van \$114,95. De kosten voor een hotend met een nozzle zijn echter te hoog om te integreren in een open-source multi-material 3D-printer. Het bevestigingsmechanisme is echter zeer stevig, zoals te zien is in de gif op de MatterHackers-website (<https://www.matterhackers.com/store//ultimaker-print-core-aa/sk/M7YUTWSY>). Hieruit kan inspiratie worden gehaald.



Figuur 62



Figuur 61

Hybrid_Changer

FabLab – version 1.0

© 2020 Copyright Hogeschool Amsterdam

Appendix E: Macro's

```
[gcode_macro SUB_TOOL_PICKUP]
description: Internal subroutine. Do not use!
gcode:
  #{% set myself = printer['tool ' ~ params.T] %}
  {% set tool = params.T|default(0)|int %}

  {% if tool == 0 %}
    # Tool 0
    {% set zone_coords = [306, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [306, 308, 15] %}
  {% elif tool == 1 %}
    # Tool 1
    {% set zone_coords = [178, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [178, 308, 15] %}
  {% elif tool == 2 %}
    # Tool 2
    {% set zone_coords = [52, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [52, 308, 15] %}
  {% endif %}

  SAVE_ACCELERATION
  M204 S8000
  G90

  ##### Move in to zone #####
  G0 X306 F20000
  G0 Y{ zone_coords[1] } F10000

  ##### Move in to parking spot #####
  G0 X{ park_coords[0] } F20000
  G0 Y{ park_coords[1] } F3000

  ##### Lock Tool #####
  M400
  G91
  G1 X-33.5 F3000
  G90
  G91
  G1 X+33.5 F3000
  G90
  M400

  ##### Wait for heater #####

  ##### Move out to zone #####
  G0 Y{ zone_coords[1] } F3000
  G0 X{ zone_coords[0] } F20000

  ##### Move out to Safe position #####
  G0 X306 F20000

  ##### Change tool #####
  ERCF_CHANGE_TOOL TOOL={ tool } STANDALONE=1

  ##### Finnish up #####
  M400
  RESTORE_ACCELERATION

[gcode_macro SUB_TOOL_DROPOFF]
description: Internal subroutine. Do not use!
# Tnnn: Tool to pickup
gcode:
  #{% set myself = printer['tool ' ~ params.T] %}
  {% set tool = params.T|default(0)|int %}

  {% if tool == 0 %}
    # Tool 0
    {% set zone_coords = [306, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [306, 308, 15] %}
  {% elif tool == 1 %}
    # Tool 1
    {% set zone_coords = [178, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [178, 308, 15] %}
  {% elif tool == 2 %}
    # Tool 2
    {% set zone_coords = [52, 258, 15] %}
    {% set park_coords = [52, 308, 15] %}
  {% endif %}

  SAVE_ACCELERATION
  M204 S8000
  G90

  ##### Move in to zone #####
  G91
  G1 Z+5 F6000
  G90
  G0 X306 F20000
  G0 Y{zone_coords[1]} F10000

  ##### Filament eject #####
  ERCF_EJECT

  ##### Move in to parking spot #####
  G0 X{park_coords[0]} F20000
  G0 Y{park_coords[1]} F3000

  ##### Lock Tool #####
  M400
  #TOOL_LOCK
  G91
  G1 X-33.5 F3000
  G90
  G91
  G1 X+33.5 F3000
  G90
  M400

  ##### Wait for heater #####

  ##### Move out to zone #####
  G0 Y{zone_coords[1]} F3000
  G0 X{zone_coords[0]} F20000

  ##### Move out to Safe position #####
  G0 X306 F20000

  ##### Finnish up #####
  M400
  RESTORE_ACCELERATION # Restore save
```

Figuur 63

Figuur 64