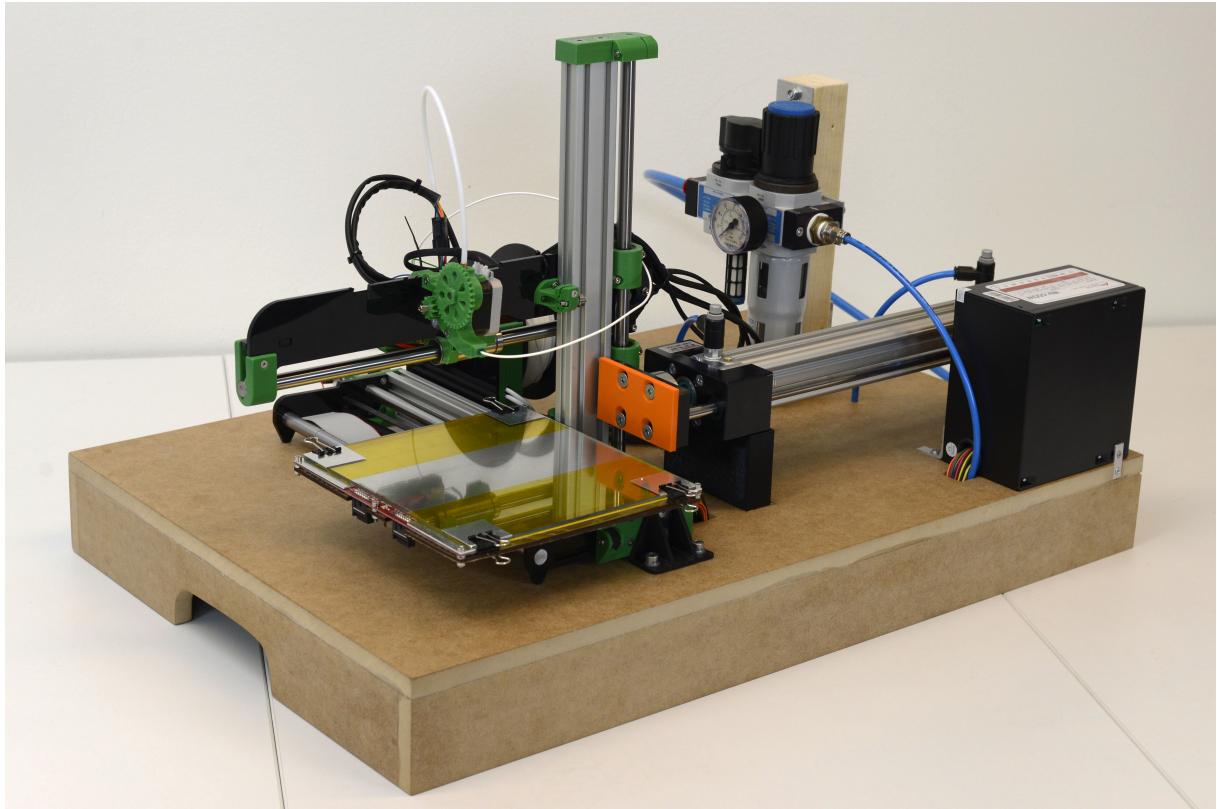




3D-skrivarsystem

*Fjärrstyrning av 3D-skrivare och automatisk utmatning av
utskriften*

KARLSSON, MARC

PERSSON, JOHAN

RINGIUS, HÅKAN

ROSTEDT, MAGNUS

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling

Chalmers Tekniska Högskola

Göteborg, 2014

Kandidatarbete PPUX03-14-16

3D-skrivarsystem

Fjärrstyrning av 3D-skrivare och automatisk utmatning av utskrifter

KARLSSON, MARC

PERSSON, JOHAN

RINGIUS, HÅKAN

ROSTEDT, MAGNUS

© MARC KARLSSON, JOHAN PERSSON, HÅKAN RINGIUS & MAGNUS
ROSTEDT, 2014

Kandidatarbete/Institutionen för produkt- och produktionsutveckling,
Chalmers tekniska högskola 2014:1

Division of Product and Production Development

Chalmers University of Technology

SE-412 96 Göteborg

Sweden

Telephone: +46 (0)31-772 1000

Framsided fotografi:

Hans Sjöberg

Sammandrag

I denna rapport behandlas framtagningen av ett system för 3D-utskrift med automatisk utmatning av färdiga utskrifter. Projektets mål är att göra 3D-skrivare lättare att använda för en större användargrupp, genom implementering av fjärrutskrift med kösystem. Systemet är anpassat att fungera inom utbildningen på Chalmers men kan även anpassas för andra tillämpningsområden. Arbetets slutprodukt är en prototyp som demonstrerar systemets funktionalitet.

Abstract

This report covers the development of a system for 3D-printing with automatic ejection of finished prints. The goal of the project is to make 3D-printers easier to use for a large user base, through the implementation of remote printing with a queue system. The system is designed to work within the Chalmers system, but can also be adapted for other applications. The end product is a prototype that demonstrates the functionality of the system.

Förord

Vi i kandidatgruppen skulle vilja tacka:

Vår handledare Göran Stigler som stöttat och bidragit med kunskap genom arbetets gång. Vi är också tacksamma för de resurser, speciellt den 3D-skrivare, som han ställt till förfogande för arbetet.

Vår examinator Lars Almefelt för hans goda råd inom projektarbeten och rapportskrivning.

Hans Sjöberg för idéer och hjälp vid tillverkningen av systemprototypen.

Creative Tools AB för att de delat med sig av sin kunskap om 3D-skrivarteknik.

Virginia Tech för att de delat med sig av sina erfarenheter av att konstruera automatiska 3D-utskriftssystem.

Alla som deltagit i intresseundersökningen.

Projektmedlem Marc Karlsson för att han använt sin personliga 3D-skrivare för arbetet.

Kandidatgruppen, Göteborg 2014-05-17

Förkortnings- och förklarningslista

I detta avsnitt kommer de förkortningar och beteckningar som används i rapporten att förklaras.

Förkortningar

3D - Tredimensionell

ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene [1], Plast som används i t.ex. Lego.

CAD - Computer Aided Design, datorgenererade modeller.

CDKS - Chalmers Datorkontosystem.

CID - Chalmers ID.

FDM - Fused Deposition Modeling [2], en teknik för 3D-skrivning som använder sig av termoplaster.

G-kod - Maskinkod som styr 3D-skrivare.

GPL - *“General Public License, upphovsrättslig licens för användning, modifiering och spridning av datorprogram ... Licensen innebär att program fritt får användas och studeras. Vidare får man fritt förändra och förbättra program och vidare distribuera resultatet.”* [3].

PLA - Polylactic acid [4], en plast som används i bland annat återvinningsbara plastförpackningar.

Förklarningar

Creative Tools AB - Säljer produkter och tjänster inom 3D-skanning och 3D-prototyping såsom 3D-skrivare och handhållna 3D-skannrar [5].

Duet-kortet - Arduino-baserat kontrollkort för 3D-skrivare.

Stödmaterial - Material som tas bort efter att utskriften är färdig.

Vidhäftning - Indikerar hur hårt två objekt sitter ihop, mäts i N/mm².

Öppen källkod (open source) - *“princip för datorprogram där användaren har fri tillgång till programmets källkod och därför kan förstå, korrigera och modifiera programmet.”* [6].

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Mål	3
1.4	Uppgift	3
1.4.1	3D-skrivarsystemets delsystem	3
1.5	Avgränsningar	5
1.6	Disposition	6
2	Teori	7
2.1	Generellt om 3D-skrivarteknik	7
2.1.1	Skapa digital modell	7
2.1.2	Bearbetning av digital modell	7
2.1.3	3D-utskrivning av digital modell	8
2.2	Tidigare arbeten	8
2.3	Övriga kunskapsområden	9
2.4	Diskussion	9
3	Metod	11
3.1	Metodik	11
3.2	Informationsinsamling	12
3.3	Undersökningar	13
3.3.1	Intresseundersökning	13
3.3.2	Materialundersökning för skrivplattform	14
3.3.3	Vidhäftningsundersökning för skrivplattform	14
3.3.4	Kompabilitetsundersökning	15
4	Genomförande och resultat	17
4.1	Intresseundersökning	17
4.2	Delsystem	17
4.2.1	Automatisk utmatning och skrivplattform	18
4.2.2	Mjukvara och nätverk	25

4.2.3	3D-skrivare	27
5	Resultat och diskussion	33
5.1	Intresseundersökning	33
5.2	Verifiering av system	33
5.2.1	Vidhäftningsundersökning	34
5.2.2	Kompabilitetstest	34
5.3	Slutlig konstruktion	34
5.3.1	Delsystem: Automatisk utmatning och skrivplattform . .	34
5.3.2	Delsystem: Mjukvara	35
5.3.3	Delsystem: 3D-skrivare	38
5.4	Användarvänlighet	38
5.5	Tillgänglighet	39
5.6	Diskussion om uppgift och dess genomförande	39
6	Slutsats och rekommendationer	41
7	Slutord	43
	Referenser	49
	Bilaga A Intervjufrågor	49
	Bilaga B Resultat materialundersökning	51
	Bilaga C Utmatningskoncept	53
C.1	Rullband	53
C.2	Plog	54
C.3	Knuff underifrån	54
C.4	Glödtråd	54
C.5	Plog med skärblad	55
C.6	Avtagbara plattor	56
C.7	Engångsplattform	56
	Bilaga D Krav och önskemål	57
D.1	Automatisk utmatning och skrivplattform	57

D.2	3D-skrivaren	58
Bilaga E	Pugh-matriser	59
E.1	Automatiskutmatning och skrivplattform	59
E.2	Mjukvara och nätverk	60
Bilaga F	Jämförelse av 3D-skrivare	61

1 Inledning

Avsnittet presenterar vad projektet går ut på, vad det siktar mot att uppnå samt vilka systemuppdelningar som görs.

1.1 Bakgrund

Utskrift i tre dimensioner, så kallad 3D-utskrift, är ett mycket aktuellt ämnesområde då tillverkningstekniken erbjuder unika möjligheter för snabb specialtillverkning till ett lågt pris. Småskalig produktion som specialtillverkade produkter, prototyper och demonstrationsobjekt kan därmed tas fram snabbt och billigt.

I och med teknologins flexibilitet och precision har den enorm potential i konstruktionssammanhang. På mikroskopisk nivå kan tekniken användas för utskrift av biologiska material såsom stamceller. Detta ger möjlighet att till exempel ersätta skadad hud hos brännskadade eller skriva ut hela organ [7].

På centimeter- till decimeternivå används 3D-skrivartekniken för konceptutvärdering och tillverkning i mindre volymer. Inom produktutveckling spelar tekniken en kritisk roll för snabb utveckling och klar kommunikation. Här är 3D-skrivartekniken dominant då det inte finns någon annan konstruktionsmetod som erbjuder lika detaljerat resultat, från idé till produkt, på samma tid.

I större skala, på meternivå och uppåt, finns 3D-skrivare som kan skriva ut hela hus [8]. Tekniken är under utveckling, men har redan använts för att skriva ut hela hus i Kina.

Tekniken är särskilt användbar inom områden där leveransmöjligheter är begränsade. Detta gäller till exempel på oljeriggar eller rymdstationer, där det är mycket dyrt att ersätta skadade komponenter. Här kan 3D-utskrift användas för att snabbt tillverka reservdelar.

NASA utforskar 3D-utskrift i gravitationslös miljö. Detta skulle öppna möjligheter för reparationer på rymdstationer med egentillverkade reservdelar [9].

I undervisningssammanhang kan modeller av produkter skrivas ut, exempelvis växellådor, för att demonstrera och kontrollera hur de fungerar. Detta kan hjälpa till i förståelse och inläring för studenterna.

Tekniken gör det möjligt att fysiskt undersöka konstruktioner efter eventu-

ella brister och svagheter. Detta kan vara mycket gynnsamt för inlärningsprocessen, då studenter på ett mycket konkret sätt utvecklar förståelsen för hur modellering bör göras samt vad som ska undvikas [10].

Indirekta positiva effekter av att använda 3D-skrivarteknik är exempelvis att behovet av att specialbeställda produkter, reservdelar med mera från tredje part minskar. Detta medför fördelar såsom att tiden det tar att erhålla produkten minskar samt att antalet transporter minskas, vilket gynnar miljön samt eliminerar fraktkostnader.

Till skillnad från traditionell tillverkningsteknik där material avlägsnas från ett större stycke, utnyttjar 3D-utskrift materialet maximalt och lämnar i stort sett inga restprodukter. Tekniken har dock en del brister. De enklare 3D-utskriftsteknikerna, exempelvis Fused Deposition Modelling (FDM), kräver ofta en del modifiering av modeller för att de ska kunna skrivas ut. Till exempel kan stödmaterial behöva läggas till explicit för att utskriften ska gå att utföra.

Tekniken är extra viktig på en teknisk högskola, då det i dagens samhälle finns trender som indikerar att när de teoretiska kunskapernas vikt ökar i utbildningen och arbetslivet minskar den praktiska kompetensen [11]. Detta sker samtidigt som produkter och komponenter blir allt mer komplexa. Att kunna se ett objekt framför sig är viktigt för förståelsen av konstruktioner. 3D-skrivartekniken erbjuder möjligheten att, utan djupare praktisk färdighet i tillverkningsteknik, konstruera detaljerade föremål i form av prototyper, modeller och reservdelar.

På Chalmers finns idag ett antal 3D-skrivare. Dessa är dock inte menade att användas av alla studenter, utan de måste gå via en anställd för att kunna skriva ut i 3D. Dessutom känner många studenter inte till 3D-skrivarnas existens. Vidare krävs att användaren har viss kännedom om tekniken och hur den används.

För att tekniken ska kunna användas av alla studenter på Chalmers behöver den göras lättillgänglig och lättanvänd. I dagsläget finns det inget färdigt kommersiellt system som, för ett rimligt pris, erbjuder ett lättanvänt automatiserat system för 3D-utskrift. Detta ligger till grund för projektet att utveckla ett sådant system.

1.2 Syfte

För att öka möjligheten för Chalmers studenter att göra 3D-utskrifter på ett enkelt sätt ska möjligheterna för ett automatiskt system för 3D-utskrift undersökas. I linje med detta så ska möjligheterna för automatisk utmatning och fjärrutskrift och dessas implementering i en 3D-skrivare undersökas.

1.3 Mål

Målet med kandidatarbetet är att undersöka möjligheterna för fjärrstyrd 3D-utskrift med automatisk utmatning av färdiga utskrifter samt att ta fram en prototyp med följande egenskaper:

- Skrivplattform med automatisk utmatning av 3D-utskrifter.
- Nätverksintegrering av 3D-skrivare med fjärrutskrift och övervakning.

1.4 Uppgift

Ett system för 3D-utskrift ska tas fram och göras tillgängligt för studenter vid Chalmers. Systemet ska vara lättanvänt så att det faktiskt nyttjas. Det är därför viktigt att gränssnittet för interaktion med utskriftssystemet är användarvänligt. Systemet ska inte kräva avancerad kunskap om 3D-utskrift. Det ska dock finnas möjlighet att ändra avancerade inställningar eftersom mer komplexa konstruktioner eventuellt kräver detta. Det kan till exempel vara så att användaren vill höja hållfastheten hos utskrivna objekt, till exempel om de ska belastas, vilket möjliggörs genom de avancerade inställningarna. För att minimera nedtiden mellan utskrifter ska systemet klara att skriva ut flera objekt i följd utan behov av ingripande från användarens sida.

1.4.1 3D-skrivarsystemets delsystem

För att ge en bättre översikt av systemet som helhet delas det upp i mindre delsystem som presenteras i detta avsnitt. Delsystemen är: Automatisk utmatning och Skrivplattform, Mjukvara och nätverk, 3D-skrivare samt Inkapsling.

1.4.1.1 Automatisk utmatning och skrivplattform

Delsystemets huvuduppgifter är att tillhandahålla utskriftsyta samt automatisk utmatning. Den automatiska utmatningen minskar risken för att användare eller skrivare skadas då systemet kan inkapslas. Detta hindrar även användare från att ändra inställningar på 3D-skrivaren, något som reserveras för systemets driftansvariga. I och med att färdiga utskrifter kan matas ut direkt kan även nya utskrifter påbörjas snabbare.

Plattformen ska på ett säkert och tillförlitligt vis avlägsna utskrifterna utan att skada dem eller 3D-skrivaren. Detta kräver att utskriftsytan har egenskaper som gör att utskrifter fäster väl och sitter kvar på ytan under utskrift, men även att utskrifter på ett tillförlitligt sätt kan avlägsnas efter avslutad utskrift.

1.4.1.2 Mjukvara och Nätverk

Detta delsystem sköter kommunikationen mellan användare och skrivare. 3D-skrivare använder G-kod, en typ av maskinkod, för att styra skrivaren. Användaren använder ett Computer Aided Design (CAD)-program för att konstruera det objekt som ska skrivas ut. Det krävs en översättning från CAD-fil till G-kod, detta kan vara ett hinder för en användare som inte har tidigare erfarenhet av att göra 3D-utskrifter. För att eliminera detta problem ska översättning skötas automatiskt av systemet.

Utöver detta ska utskriftssystemet integreras i Chalmers datornätverk. Detta är en viktig del i att tillgängliggöra systemet för användarna. Denna integrering ska tillhandahålla följande:

- Åtkomst till utskriftssystemet från alla datorer anslutna till Chalmers nätverk.
- Ett kösystem. Det ska finnas möjlighet för användare att köa nya utskrifter även under pågående utskrift. Detta krävs för att systemet ska kunna hantera en stor mängd användare och utskrifter.
- Möjlighet för användare att avbryta en pågående utskrift som denne själv påbörjat, detta är viktigt då tidsåtgången för en utskrift kan vara stor. En misslyckad utskrift kan också skada 3D-skrivaren om den inte avbryts.

- Avisering till användare när dennes utskrift är färdig och redo att hämtas. Användaren slipper på så vis vänta vid skrivaren på att utskriften ska bli färdig.
- Delsystemet ska kunna ge användaren relevant information om utskriftsprocessen, genom videoövervakning, processlog med mera.

1.4.1.3 3D-skrivare

Systemets centrala del är 3D-skrivaren. 3D-skrivaren bör ha en öppen design så att modifieringar lätt kan göras och så att delsystemet för automatisk utmatning kan integreras med denna.

- 3D-skrivaren ska kunna köra oavbrutet i längre perioder utan prestandaminskning.
- 3D-skrivaren behöver klara upprepade utskrifter och utmatning av 3D-utskrifter utan att behöva kalibreras manuellt.
- 3D-skrivaren behöver ha tillräckligt hög upplösning för att utskrifterna ska kunna användas som prototyper.

1.4.1.4 Inkapsling

Med begreppet inkapsling avses ett fysiskt gränssnitt mellan användaren och skrivaren. Inkapslingen ska fylla flera funktioner, varav den första är att innesluta 3D-skrivarsystemet för att förenkla användarinteraktionen och skydda systemet från felaktig användning.

Den andra funktionen inkapslingen ska fylla är att isolera systemet från omvärlden för att förhindra ljud- och värmeläckage. En 3D-skrivare låter en del, och om 3D-skrivaren ska stå lättillgängligt är god ljudisolation väsentligt för en god studiemiljö.

1.5 Avgränsningar

Då projektet utförs som ett kandidatarbete vid Chalmers Tekniska Högskola finns en del begränsande faktorer:

- På grund av projektets begränsade budget väljs en 3D-skrivare för konsumentbruk, ur det lägre prissegmentet.
- På grund av tidsramarna för projektet utvecklas inte ett nytt, specialanpassat mjukvarusystem. Fokus läggs istället på att hitta ett existerande system som kan anpassas efter 3D-skrivarsystemets behov.
- På grund av tidsramarna för projektet behandlas inte utvecklingen och tillverkningen av en inkapsling till 3D-skrivarsystemet.

Vidare görs följande avgränsningar:

- Projektet begränsas till FDM-tekniken. Detta för att FDM är den populäraste tekniken då det är en förhållandevis billig och enkel teknik.
- På grund av skillnaderna i egenskaper för olika plaster behandlar projektet enbart utskrift med en sorts plast.

1.6 Disposition

Arbetet delas upp i Teori, Metod, Genomförande, Resultat och diskussion samt Slutsats och rekommendationer.

I teoriavsnittet beskrivs grundläggande teori samt några tekniker för framställning av 3D-utskrifter. Vidare behandlar avsnittet system med likande syfte samt gruppmedlemmarnas tidigare erfarenheter med tekniken.

Därefter behandlas den metodik som arbetet följer och de metoder och undersökningar som användes för att nå resultatet.

I genomförande presenteras arbetsgången. De resultat, från undersökningar, som anses som viktiga för att fortsätta arbetet presenteras här.

Arbetets slutliga resultat presenteras och diskuteras i avsnittet Resultat och diskussion. Här hittar man större undersökningar och de slutliga resultaten av arbetet.

Därefter sammanställs arbetet och projektgruppen tar upp vad de anser behöver vidareutvecklas i systemet för att det ska bli det system som efterfrågas.

2 Teori

I detta avsnitt behandlas teori runt 3D-utskrift och tidigare arbeten.

2.1 Generellt om 3D-skrivarteknik

3D-utskrift, även känd som Rapid Prototyping (RP), är en process som möjliggör tillverkning av objekt utifrån en digitalt genererad modell. Detta är möjligt genom att den digitala modellen delas upp i tunna tvärsnittslager, så kallad skivning [12]. En 3D-skrivare bygger därefter upp objektet genom att skapa ett lager i taget tills objektet är färdigställt.

Processen för 3D-utskrift kan delas in i tre processteg som presenteras i nästkommande avsnitt.

2.1.1 Skapa digital modell

Det första steget för 3D-tekniken, är att skapa det objekt som ska skrivas ut. Detta kan göras genom ett antal olika tekniker.

Den vanligaste tekniken inom konstruktion och tillverkning är att använda sig av ett CAD-program för att generera modeller. En annan teknik är att scanna in ett fysiskt objekt till en digital representation, detta kan göras med en 3D-skanner. Inom medicin är en vanlig metod att använda den koordinatdata som erhålls genom modifierad diskret cosinustransform (MDCT) eller magnetisk resonanstomografi (MRI) för att bygga upp en digital modell [7].

2.1.2 Bearbetning av digital modell

Den digitala modellen behöver därefter konverteras till maskinkod som skrivaren kan tolka. Detta görs med så kallad skivningsprogramvara som delar upp modellen i tunna skivor och sedan genererar ett rörelsemönster för skrivaren i form av G-kod. G-koden överförs sedan till skrivaren via exempelvis seriell kommunikation eller ett minneskort.

2.1.3 3D-utskrivning av digital modell

3D-utskrift innefattar ett antal etablerade tillverkningstekniker och en del experimentella. Respektive teknik har sina användningsområden och begränsningar. Några etablerade tekniker sammanställs i Tabell 1. Stereolithography (SLA) härdar ljuskänsliga polymerer till ett objekt med hjälp av UV-laser[13]. Selective Laser Sintering (SLS) använder sig av termoplast-, metall-, keram- eller glaspulver som smälts samman med hjälp av en laser[14]. Fused deposition modeling (FDM) använder sig av tråd eller pärlor av termoplaster eller metaller med låg smältpunkt. Materialet värms upp och matas ut som en sträng som smälts samman med lagret under [2]. Electron Beam Melting (EBM) använder metallpulver som smälts samman med en stark elektronstråle [15].

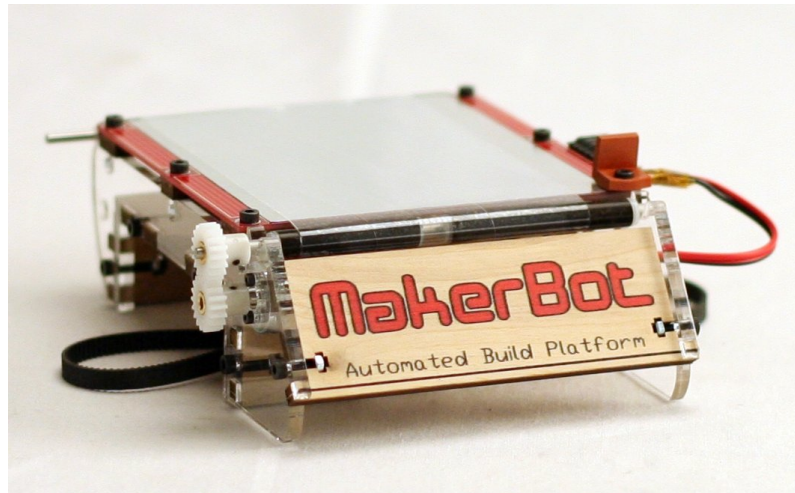
Tabell 1: Jämförelse av 3D-tekniker

	Noggrannhet	Pris	Fördelar	Nackdelar
SLA	++++	- -	Stora utskrifter	Låg Styrka
SLS	++	- - -	Stora utskrifter, god materialvariation, hög styrka	Hög kostnad
FDM	++	-	Låg kostnad, hög styrka	Långsam
EBM	+++	- - - -	Kräver ej stödmaterial	Högt pris

2.2 Tidigare arbeten

En stor inspiration till projektet är DreamVendor, ett system för 3D-utskrift med automatisk utmatning, utvecklat på Virginia Tech i USA [16]. Systemet består av fyra MakerBot Thing-O-Matic inbyggda i en monter. Systemet har dock ingen ytterligare funktionalitet såsom fjärrutskrift, kösystem etcetera.

MakerBots Automated Build Platform, Figur 1, ursprungligen en del av MakerBots Thing-O-Matic, är den enda kommersiella produkten för automatisk utmatning av 3D-utskrifter. Den bygger på ett rullband som kör ut utskrifterna när de är klara. Tekniken patenterades av MakerBot 2010 [17] [18]. MakerBot slutade tillverka och använda sig av rullbandstekniken 2012 [19].



Figur 1: MakerBots Automated Build Platform[24]

Utöver MakerBots Automated Build Platform finns det ett antal metoder för att mata ut 3D-utskrifter. De flesta av dessa är utvecklade för eget bruk av entusiaster inom 3D-teknik. På grund av att de ofta endast används för eget bruk saknas ofta detaljerad och sammanställd information om dem. Mycket information kan dock hittas på diverse internetfora och 3D-skrivarbloggar.

Ett nämnvärt sådant system är ett som använder en plåtbit monterad på 3D-skrivarhuvudet för att knuffa ut utskriften. Detta åstadkoms genom att skriva ut på en upphettad glasskiva som tillåts svalna efter utskrift. När skivan svalnat tillräckligt släpper utskriften helt från glasplattan [20].

Ett annat intressant system är det som presenterades på 2013 Nashville Maker Faire som använder en kil för att lossa och mata ut utskrifter [21].

2.3 Övriga kunskapsområden

En av projektets medlemmar, Marc Karlsson, har tidigare erfarenhet av 3D-skrivare i och med att han har arbetat med andra projekt inom området. Han använder även en 3D-skrivare i hemmet.

2.4 Diskussion

De lösningar som presenterades i teori avsnittet har antingen lagts ner eller inte blivit något av. Det är därmed nödvändigt att undersöka varför lösningarna

misslyckades, och utveckla en ny lösning. Vidare saknar de systemen också en del av funktionerna som har beställts på systemet såsom fjärutskrift och kösystem.

3 Metod

Detta avsnitt tar upp det tillvägagångssätt som tillämpades under projektets gång. Detta inkluderar den metodik som arbetet följde, den informationsinsamlingsteknik som användes och de undersökningar som utfördes.

3.1 Metodik

Arbetet använde Per Lindstedts värdemodell [22] som bas för arbetesgången, med viss anpassning till projektet. Metodiken delades upp i nio sekventiella steg.

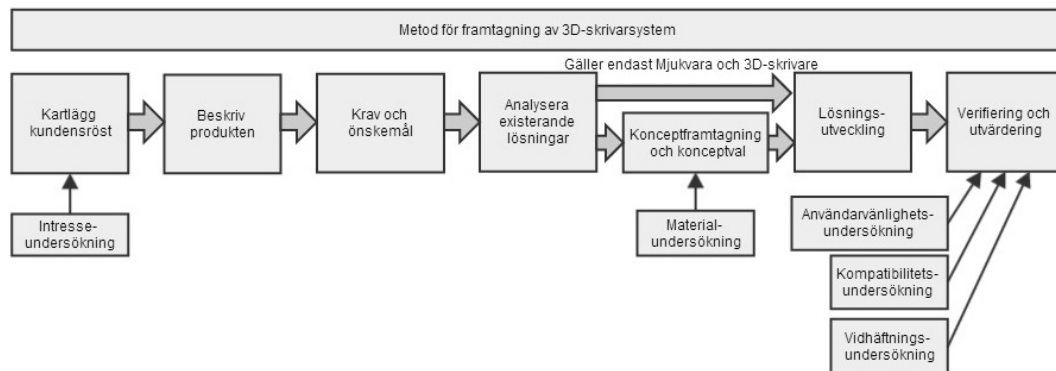
1. Etablera projektet: Här skapades en stabil bas för projektmedlemmarna genom att ställa upp regler och fastställa vad målet och visionen var för projektet. Detta steg behandlas inte i rapporten.
2. Kartlägg kundens röst: Detta steg var att undersöka vad användaren tycker och tänker om produktkategorin. Här undersöktes även vilka outtalade baskrav användaren har på produktkategorin och problemen rangordnades efter vilka som var viktigast att lösa. Detta utfördes genom en intresseundersökning.
3. Beskriv produkten: För att analytiskt granska vad som skulle göras, vilka funktioner och kundvärden som produkten skulle kunna leverera, så kartlades produkten och ställdes upp som funktioner.
4. Krav och önskemål: Här sammanställdes kundvärdena och hur de skulle kunna verifieras undersöktes. Dessa ställdes sedan upp i en kravspecifikation.
5. Analysera alternativa lösningar: Här definierades projektets nollpunkt. Det vill säga, vad var det bästa Chalmers kunde åstadkomma? Detta innefattade även att undersöka och utvärdera existerande lösningar. Därefter analyserades de existerande lösningarna för att finna områden som kunde utvecklas för ökat kundvärde.

6. Konceptframtagning och konceptval: I detta steg genererades ett antal koncept, dessa vidareutvecklades och kombinerades till ett slutgiltigt koncept. Koncepten utvärderades. Detta steg behandlade endast utveckling av automatisk utmatning och skrivplattform. I och med att delsystemet i sig bestod av ett flertal delar delades det upp i moduler.
7. Konstruera konceptet: Här påbörjades konstruktionen av de utvalda koncepten. Modeller och skisser konstruerades och en grov kostnadsuppskattning gjordes.
8. Verifiera och utvärdera konceptet: I detta steg skapades en prototyp vilken även undersöktes, det vill säga svagheter analyserades för att ta lärdom från konstruktionen.
9. Presentera och dokumentera: Sista steget var att presentera resultatet från arbetet och dokumentera hur projektet gav de slutsatser som det gjorde. Detta steg behandlas inte i rapporten

Metodiken användes tre gånger för respektive delsystem; Automatisk utmatning och skrivplattform, Mjukvara och nätverk samt 3D-skrivare. Den sjätte punkten behandlas endast i avsnittet för automatisk utmatning och skrivplattform och den andra punkten behandlas endast för hela systemet och inte delsystem. Projektets utvecklingsprocess var inte så sekventiell som beskrivet ovan, utan utfördes iterativt. Detta eftersom ingen direkt lösning fanns till problemet, vilket gör att arbetet följde en iterationsstruktur enligt; planera, implementera, testa.

3.2 Informationsinsamling

I och med att tekniken främst drivs av entusiaster inom området, är det svårt att ha säkra källor i arbetet. Information hittas främst på diverse internetfora och på tillverkarens hemsidor. Därmed behövs flera källor och egen testning för att bekräfta informationens pålitlighet.



Figur 2: Metod för framtagning av 3D-skrivarsystem

3.3 Undersökningar

För att ge beslutsunderlag och utvärdera produkten genomfördes ett antal undersökningar under arbetets gång.

Undersökningarna skedde i tre faser. Den första fasen var tiden då inga resurser var tillhandahållna. Den andra fasen använde tillgängliga komponenter och konstruktioner på Chalmers. En 3D-skrivare lånades av Göran Stigler, denna gav en utgångspunkt för fortsatt arbete. Under denna fas undersöktes konceptpotential.

Den tredje fasen började då prototyper tagits fram för respektive delsystem. Här utvärderades konstruktionernas stabilitet och användarvänlighet.

3.3.1 Intresseundersökning

Undersökningen utfördes i två delar, en enkät och en muntlig intervju. Enkäten var till för att ge en bild av hur intresset såg ut hos studenterna på de berörda programmen, medan intervjuerna var till för att ge en bättre bild av förväntningarna på ett sådant system. Enkäten gav de studenter som är intresserade av tekniken möjlighet att tänka över sina svar mer noggrant vilket gynnar en del personlighetstyper. Frågorna som ställdes i intervjuerna och i enkäten återfinns i bilaga A. De muntliga intervjuerna gav en möjlighet att mer detaljerat se intresset hos studenterna på Chalmers genom att hänsyn kunde tas till kroppsspråk samt att det fanns möjlighet att ställa följdfrågor till svaren.

3.3.2 Materialundersökning för skrivplattform

Undersökningen utfördes i tre steg. Steg ett: Skrev ut ett objekt med en bestämd upplösning på respektive material. Detta krävde att objekten och upplösningen hölls konstant. Steg två: Eliminerade de material som objektet lossnar från under utskrift. Steg tre: De material som erhöll ett godkänt resultat betygsattes i en skala på ett till fem, där materialkoncepten började med fem poäng och förlorade poäng om följande reducenter förekom:

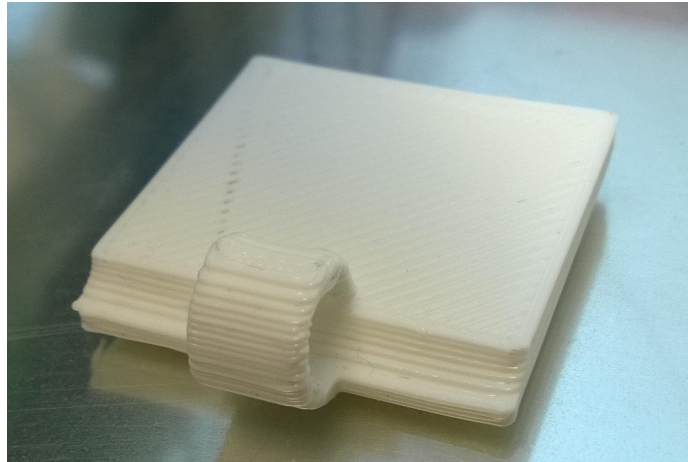
1. Delar av materialet följer med det utskrivna objektet vid lossning: -1 p
2. Lossning av utskrivet objekt kräver verktyg: -1 p
3. Slitage på materialet efter utskrift: -1 p
4. Materialet kräver regelbundet underhåll före utskrift: -2 p
5. Materialet kräver regelbundet underhåll veckovis: -1 p
6. Materielunderhåll inte lämpligt att utföra i 3D-skrivaren: -2 p
7. Materialet behöver ersättas regelbundet: -1 p

För att reducera felkällor utfördes undersökningen iterativt.

3.3.3 Vidhäftningsundersökning för skrivplattform

Vidhäftningen mellan skrivplattformen och det utskrivna objektet mättes i N/cm^2 och undersöktes genom att en utskrift gjordes, se Figur 3. Därefter fästes en bagagevåg i objektet. Detta gjorde det möjligt att beräkna fästkraften och därefter vidhäftningen. Metoden har många felkällor och måste därmed utföras flera gånger för att erhålla ett pålitligt resultat. Genom undersökningen utvärderades några av de funktioner som påverkar vidhäftningen. Funktioner som påverkar vidhäftningen är:

- Fett, damm och restprodukter på plattformen från tidigare utskrifter.
- Temperatur i rum, på plattform och skrivarhuvudet.
- Avstånd mellan skrivplattform och skrivmunstycke.



Figur 3: Testutskrift för vidhäftningsundersökning

3.3.4 Kompabilitetsundersökning

Kompabilitetsundersökningen gick främst ut på att undersöka kompatibilitet mellan mjukvaran och andra system. Mjukvaran måste vara kompatibel med den 3D-skrivare som ska användas. Kompatibilitet med Chalmers existerande inloggningssystem är ett krav vid integrering med högskolans datornätverk.

4 Genomförande och resultat

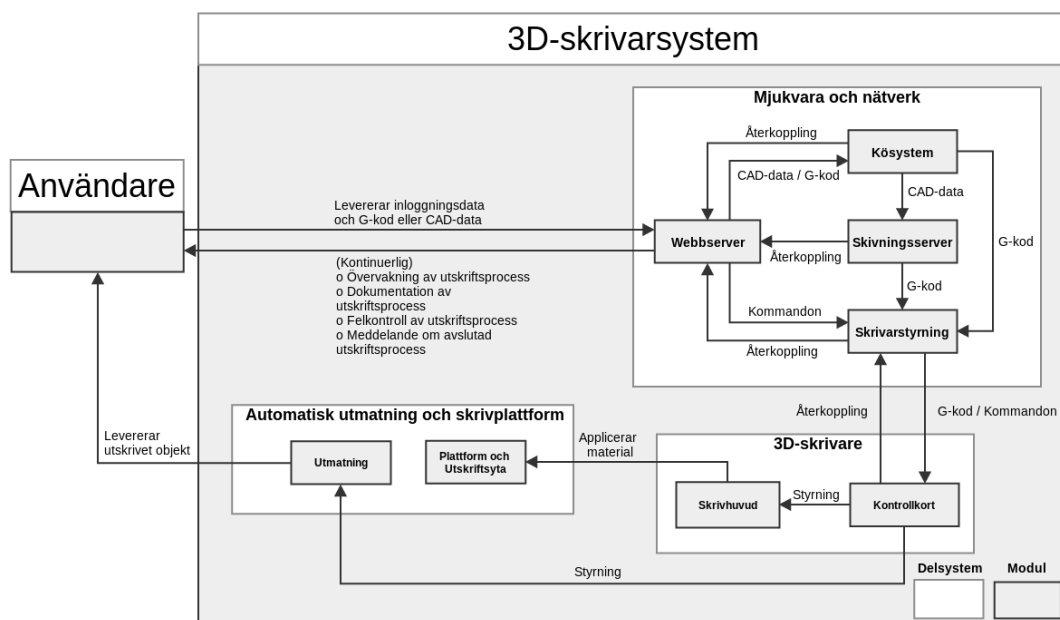
Följande avsnitt går detaljerat genom den praktiska process som ledde arbetet till det slutliga resultatet. De resultat och undersökningar som anses nödvändiga för det fortsatta arbetet redovisas också i detta avsnitt. Resterande resultat redovisas i Avsnitt 5.

4.1 Intresseundersökning

I början av projektet gjordes en intresseundersökning. Denna hjälpte till att finna önskemål utöver de som projektgruppen och beställaren fastställt. Den kan också användas för att ge Chalmers ökad motivering att investera i 3D-skrivarteknik. Totalt intervjuades sex personer och tjugo svarade på enkäten.

4.2 Delsystem

För att göra systemet mer överskådligt delades det upp i ett antal delsystem vars funktioner specificeras i detta avsnitt. Systemet illustreras med hjälp av Figur 4 som visar hur de olika delsystemen hänger samman.



Figur 4: Flödesanalys av systemet.

4.2.1 Automatisk utmatning och skrivplattform

Den automatiska plattformen påverkas av termiska och fysiska påfrestningar. Skrivplattformen behöver därför vara beständig mot termisk distorsion och plastisk deformation för att förlänga dess livslängd. Utöver detta innefattar delsystemet ett system för utmatning av de färdiga objekten efter utskrift.

4.2.1.1 Huvudfunktioner

- Delsystemet utgör skrivyta för 3D-utskrifter.
- Delsystemet ger vidhäftning under utskrift (Skrivplattformen håller utskriften på plats via vidhäftning)

4.2.1.2 Tilläggsfunktioner

- Delsystemet ger möjlighet till automatisk utmatning.
- Delsystemet ger möjlighet till underhåll (Delsystemet är öppet nog för underhåll)

4.2.1.3 Stödfunktioner

- Delsystemet kan monteras i 3D-skrivaren

4.2.1.4 Önskade funktioner

- Delsystemet kvarhåller vidhäftning efter utskrift (Skrivplattformen håller kvar objektet även efter utskrift, vilket leder till försvårad utmatning)
- Delsystemet kräver fettfri yta (Skrivplattformen måste avfettas för att utskrifter ska fästa)
- Delsystemet deformeras vid användning (Skrivplattformen böjs eller slits vid användning)

4.2.1.5 Mätbarhet hos funktioner

Endast ett fåtal av funktionerna är mätbara och många av funktionerna är därmed svåra att verifiera objektivt om förbättring har skett gentemot referens. Flertalet funktioner bedömdes därmed subjektivt.

Huvudfunktionen "delsystemet ger vidhäftning under utskrift" verifierades som "godkänd" eller "icke godkänd". Detta då det är mycket svårt att beräkna vidhäftningen under utskrift eftersom den är beroende av allt för många parametrar.

4.2.1.6 Krav och önskemål

Kraven och önskemålen på delsystemet baserades på projektgruppens bedömningar av vad som är viktigt, se Bilaga D.1. Detta då delsystemens funktioner kan ses som stödfunktioner i systemet och kommer i sig inte att öka produktvärdet för användaren.

4.2.1.7 Referenslösning

Det finns idag ingen bra lösning på skrivplattformar. Det finns däremot många hemgjorda lösningar som är långt ifrån hållbara för ett automatiserat system. De lösningar som ger de bästa resultaten är ofta beroende av snabbförbrukade tillägg så som kemikalier eller andra ytbeläggningar.

Den vanligaste lösningen för skrivplattformar är att ha den stationär med en glasplatta som bas på vilken man använder någon form av ytbehandling. Ytbehandlingar kan bestå av till exempel blå maskeringstejp, kaptontejp, hårsprej eller en ABS-lösning. Ytbehandlingar används för att förbättra vidhäftningen på skrivplattformarna.

För utvecklingsarbetet valdes användning av en glasplatta med blå maskeringstejp på som referenslösning. Att använda blå maskeringstejp som skrivyta är en av de vanligaste lösningarna i dagsläget. Tejpen behöver dock bytas ut regelbundet då den slits eller lossnar med utskriften. Den ger heller inte en tillräckligt pålitlig yta att skriva ut på. Vidhäftningen för skrivplattformen kan variera från att det utskrivna objektet lossnar under utskrift till att det är mycket svårt att lossa från skrivplattformen efter utskrift.

4.2.1.8 Konceptframtagning och konceptval

För att göra utvecklingen av delsystemet “Utmatning och skrivplattform” mer lättförståeligt delades det upp i tre moduler där respektive modul fokuseras på att tillhandahålla en specifik funktion.

4.2.1.8.1 Modul: Plattform

Denna modul behandlar den önskade funktionen “Delsystemet deformeras vid användning”, se avsnitt 4.2.1.4.

Materialvalet för plattformen baserades på information från datablad för att finna material med låg längdutvidgningskoefficient (ϵ). Detta eftersom den plast som skrivaren använder sig av vid utskrift har högt ϵ . Skillnaden i ϵ mellan materialen gör att plasten vid kylning drar ihop sig snabbare än underlaget, vilket minskar vidhäftningen efter utskrift.

Det är även viktigt att plattformen består av ett material som är resistent mot termisk distorsion. Det vill säga att materialet inte termiskt deformeras ojämnt på grund av låg värmeledningsförmåga vilket kan orsaka ojämnheter i plattformen.

Det är också viktigt att plattformen är resistent mot mekanisk deformation. Plattformen måste alltså bestå av ett material med hög elasticitetsmodul för att undvika plastisk deformation vid lossning av utskrifter.

4.2.1.8.2 Modul: Utmatning

Denna modul är systemets utmatningskonstruktion. Modulen har som uppgift att tillhandahålla tilläggsfunktionen “Delsystemet ger möjlighet för automatisk utmatning”, se avsnitt 4.2.1.2. Vid utvärdering undersöktes ett antal existerande lösningar som publicerats av företag eller entusiaster inom området. För att statistiskt öka sannolikheten att hitta en lämplig lösning användes flera redskap för att generera ett antal koncept. Redskapen resulterade i koncept såsom:

- Rullband
- Bändning

- Skjuvning
- Tryckbelastning
- Glödtråd
- Utbytbara plattor
- Engångsplattor

I detta kapitel presenteras de mest lovande lösningarna. För mer information om övriga koncept se bilaga C.

4.2.1.8.2.1 Rullband

Utskrift sker på ett rullband som transporterar ut utskriften när den är färdig. Bandet är uppspönt mellan två rullar, varav en har motordrivning. Utskriften lossnar när den åker över den främre rullen, och trillar ner i en behållare som användaren kan komma åt. För att utskrift ska kunna ske på bandet behöver det vara helt plant, detta skulle kunna uppnås med en platta under ett tillräckligt spänt band. För att förbättra bandets vidhäftningsförmåga kan det behöva tejpas med blå maskeringstejp eller kaptontejp. Under bandet kan en värmeplatta användas om detta behövs för att det ska gå att göra utskrift på bandet. En automatisk skrivplattform som använder sig av ett rullband är en teknik som utvecklades, patenterades och lanserades av MakerBot hösten 2010 [17][18].

4.2.1.8.2.2 Plog

En plog trycker bort utskriften från plattan med kraft. Metoden används framgångsrikt av andra utvecklare och särskiljer sig genom sin enkla konstruktion. En eventuell nackdel med metoden är att fina detaljer kan förstöras av trycket från plogen. Att använda en plog som skär och föser ut utskriften ställer krav på att skrivplattformen inte tar skada när detta sker och att den är tillräckligt stabil för att inte behöva kalibreras mellan utskrifter. Förskjuts plattformen från sin nollpunkt finns risken att nästkommande utskrift inte fäster på plattformen vilket skulle leda till en misslyckad utskrift.

4.2.1.8.2.3 Avtagbara plattor

Objekt skrivs ut på lösa plattformar som matas ut när utskriften är färdig. Tomma plattformar finns redo att matas in i skrivaren så fort en annan matas ut. Inmatning av plattformar sker helt automatiskt, men använda plattformar behöver rengöras och matas in i skrivaren av användaren.

4.2.1.8.3 Modul: Plattformsyta

Denna moduls uppgift är att minimera den oönskade funktionen “Delsystemet kvarhåller vidhäftning efter utskrift”. Detta står i konflikt med huvudfunktionen, “Delsystemet ger vidhäftning under utskrift”, då denna kräver pålitlig vidhäftning. Huvudfunktionen utvärderas då till att ha en “tillräckligt” hög vidhäftning. Detta innebär att objekt med liten fästytta inte ska lossna under utskrift.

4.2.1.8.3.1 Värmeplatta

Utskriftsytan testas både då den är kall och då den är varm. Detta för att en uppvärmd plattform har en del fördelar vid utskrift. Temperaturen på plattformen påverkar vidhäftningen av de utskrivna objekten. Vid högre temperaturer är vidhäftningen större. Det kan dock uppstå problem om plattan värms upp för mycket, då ett utskrivet lager måste hinna stelna innan nästa lager skrivs ut ovanpå. Annars finns risk att det undre lagret deformeras.

4.2.1.8.3.2 Materialundersökning

För att finna ett lämpligt material med tillräckligt hög vidhäftning för att använda som plattformsyta, testades materialens vidhäftningsförmåga. De material som testades valdes grundat på popularitet bland 3D-skrivarentusiaster samt kostnadseffektivitet för användandet i existerande koncept. Undersökningen utfördes som en elimineringsprocess av material som inte går att använda.

De material som undersöktes är: glas, kapton, blå målartejp, trä, plexiglas och aluminium. Blå målartejp, som till stor del är en standard för tekniken, användes som referens. Vissa material testades med diverse ytbehandlingsmetoder för

att undersöka om dessa förbättrar vidhäftningsförmågan. De ytbehandlingar som användes är; fint samt grovt sandpapper, smärgelduk samt avfettning.

4.2.1.8.3.3 Utvärdering

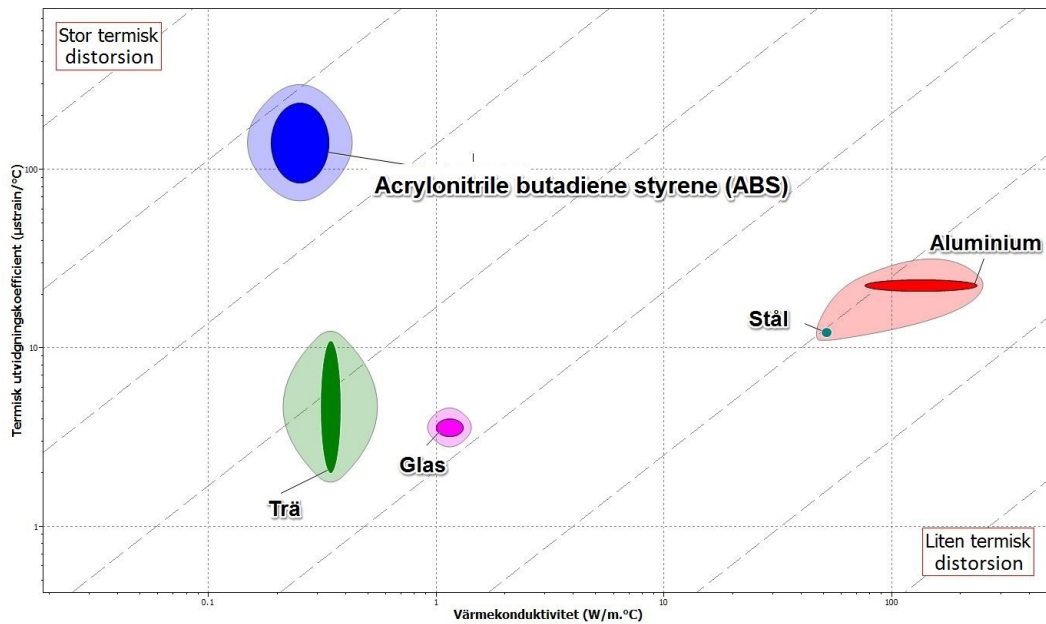
De olika utmatningskonceptens korrelation med materialen undersöktes genom uppställning i en tabell, se Tabell 2.

Tabell 2: Materiallämplighetstabell för skrivplattform.

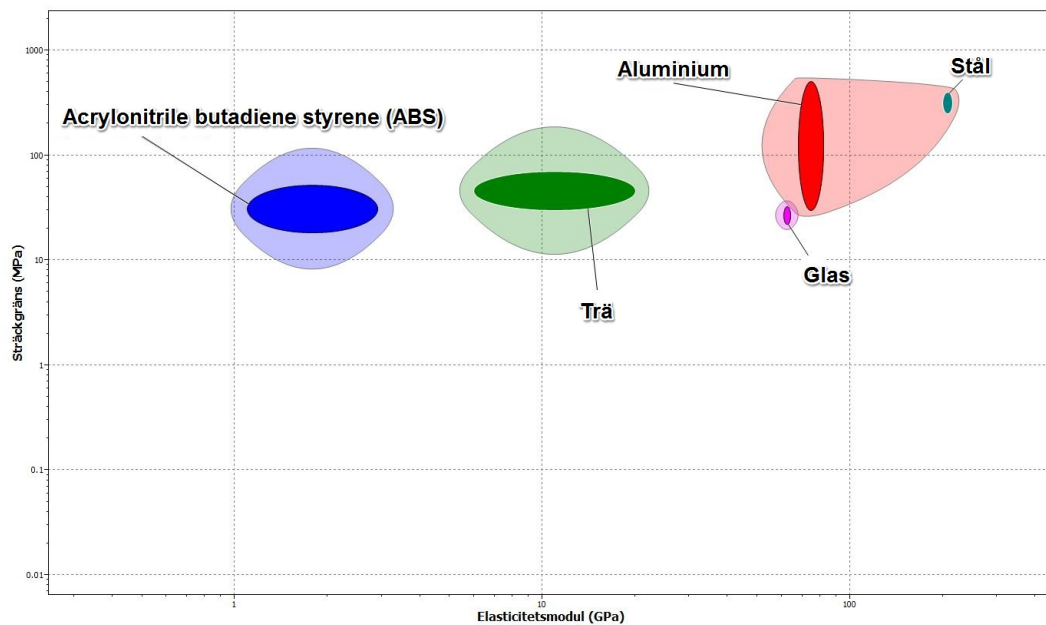
		Kapton	Glas		Blåmålartejp	Plexiglas	Papper	Solitt trä	Plywood	Masonit
Förbehandling	Hårsprej		Regelbunden							
	Avfettning		Regelbunden		Regelbunden					
Underutskrift	Värmeplatta	Önskad	Krav							
	Betyg materialyta	3	1	3	2	2	2	1	1	1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rullplatta Knuff underifrån Plog Glödtråd Skär med plog Avtagbara plattor Engångsplattform	rad #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	2	+	-	-	+	0	0	0	0	-
	3	+	+	+	+	+	-	0	0	0
	4	+	+	+	+	+	-	0	0	0
	5	+	+	+	+	+	-	0	0	0
	6	0	+	+	0	+	0	+	+	+
	7	0	-	-	0	0	+	0	0	0
		rad #								
			+	Lämpligt						
			0	Mindre lämpligt						
			-	Inte lämpligt						

Pugh-matriser [23] användes för att förtydliga vilka koncept som hade högst potential, se Bilaga E.1. De lösningar som ansågs minst lämpliga sällades bort. En andra jämförelse visade att framförallt två koncept var lovande för fortsatt utveckling.

De bäst lämpade koncepten var rullplattformen samt plogen, som var projektets mest respektive minst komplexa lösningar. Enligt Materiallämplighetsmatrisen, Tabell 2, termisk distorsionsdiagrammet, Figur 5, och deformationsdiagrammet, Figur 6, saknade rullplattformen bas med hög deformationsbeständighet. Detta kan leda till att rullbandet frekvent behöver bytas eftersom bandet kan deformeras eller gå sönder.



Figur 5: Diagram över termisk distorsion



Figur 6: Diagram över deformation

Projektgruppens beslut att överge konceptet rullplattform grundades till viss del på information från 3D-skrivarforum samt kontakt med Creative Tools AB,

där användande av tekniken avråddes ifrån. Enligt VD:n på Creative Tools AB är tekniken inte pålitlig.

“Jag skulle varmt avråda från den tekniken då den inte är tillförlitlig och därmed inte längre används.”

- VD, Creative Tools AB

Ett slutgiltigt koncept togs fram genom att kombinera de högst rankade alternativen för modulerna. Detta gav plog som utmatningssystem. Som utskriftsyta valdes en glasplattform uppvärmd av en värmeplatta.

4.2.2 Mjukvara och nätverk

Systemet som helhet består av flera fysiskt separerade delsystem. För att dessa ska fungera och kunna kommunicera med varandra krävs anpassad mjukvara. I detta avsnitt beskrivs de funktioner som specificerats för mjukvaran, vilka koncept för mjukvaran som varit aktuella samt motivering till det konceptval som gjorts inom projektet.

4.2.2.1 Huvudfunktion

- Fjärrutskrift av 3D-objekt

4.2.2.2 Tilläggsfunktioner

- Övervakning av utskriftsprocess
- Dokumentation av utskriftsprocess
- Felkontroll av utskriftsprocess
- Meddelande om avslutad utskriftsprocess
- Inloggningssystem för användare
- Grafiskt gränssnitt för användare samt administratörer
- Utskriftskvot för användare

4.2.2.3 Stödfunktioner

- Loggning av system
- Kösystem för utskrifter
- Konvertering av ritningar till utskriftskommandon

4.2.2.4 Önskade funktioner

- Full åtkomst för alla användare
- Åtkomst till systemet utanför Chalmers nätverk

4.2.2.5 Referenslösning

Mjukvarusystemets referens var ett helt lokalt system som består av en 3D-skrivare kopplad direkt via USB till en dator. På datorn körs specialiserad programvara som sköter kommunikationen med skrivaren.

4.2.2.6 Koncept

Som tidigare nämnts i avsnitt 1.5 uteslöts konceptet att utveckla ett helt nytt mjukvarusystem då det inte fanns utrymme för detta i projektet. De koncept som då kvarstod var referensen lokal utskrivning via USB eller användning av existerande programvaror. De programvaror som ansågs lämpliga för projektet var OctoPrint, BotQueue eller MakerBot MakerWare, som alla hittades genom sökningar på Internet.

4.2.2.7 Konceptval

Koncepten jämfördes med varandra utifrån de önskemål som fanns på mjukvaran. Jämförelsen finns uppställd i Pugh-matris i Bilaga E.1. Ur matrisen kan utläsas att det koncept som bäst lämpade sig för projektet var användning av den öppna programvaran BotQueue.

4.2.3 3D-skrivare

3D-skrivaren är den centrala komponenten i systemet och är därför viktig för systemets värde. Delsystemet, 3D-skrivaren, användes som grund för systemens andra delsystem att monteras på.

De tre huvudsakliga möjligheterna för att få tillgång till 3D-skrivare var att konstruera en från grunden, köpa en färdig byggsats eller att köpa en komplett skrivare. I och med att projektets system skulle vara lätt att reproducera byggdes inte skrivaren från grunden. Dessutom fanns inget som talade för att projektgruppen skulle kunna konstruera en skrivare som var bättre eller billigare än de som redan existerande under tiden för projektet. 3D-skrivarsystemet gjordes mer prisvärt genom att köpa in en byggsats istället för att köpa in en färdig 3D-skrivare.

Som nämnts i Avsnitt 1.5 användes endast FDM-tekniken, som skriver ut i plast. Detta för att det är en av de billigaste och enklaste 3D-utskriftsmetoderna.

Vidare avgränsades projektet till att endast använda plasten Polylaktid (PLA). PLA valdes därför att den är en av de vanligaste platserna vid 3D-utskrift. Den avger heller inte några farliga eller irriterade ångor. Detta gör den lämplig för miljöer där människor regelbundet befinner sig. Den är också billig, lättillgänglig, biologiskt nedbrytbar och har god återvinnbarhet. Den andra vanliga plasten vid 3D-utskrift är Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) som har mycket liknade egenskaper som PLA. Dock så är ABS inte biologiskt nedbrytbar och kan avge irriterande ångor vid utskrift. Även VD:n vid Creative Tools AB rekommenderade att använda PLA-plast inom projektet.

“Jag rekommenderar även att ni kör utskrifter med PLA plast, ej ABS.”

- VD, Creative Tools AB

4.2.3.1 Huvudfunktion

- Skriva ut i 3D

4.2.3.2 Tilläggfunktioner

- Vara bas för delsystem Automatisk utmatning och skrivplattform

4.2.3.3 Öönskade funktioner

- Felaktiga utskrifter

4.2.3.4 Referenslösning

3D-skrivarens referens var en MakerBot Replicator 2.

4.2.3.5 Krav och öönskemål

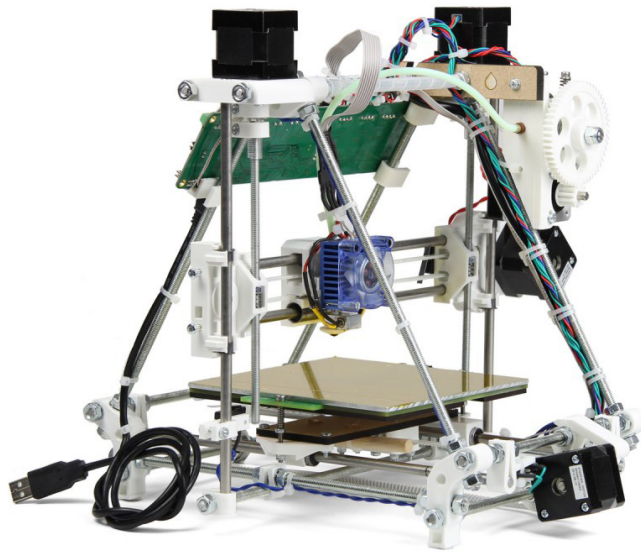
De krav och öönskemål, se Bilaga D.2, som sattes på 3D-skrivaren användes för att sälla fram lämpliga 3D-skrivare. Krav ställdes för att se till att de koncept som togs fram var kompatibla med 3D-skrivaren. Efter sällningen återstod tre lämpliga 3D-skrivare.

4.2.3.6 Lämpliga 3D-skrivare

I detta avsnitt beskrivs de 3D-skrivare som bäst passade behoven. Det fanns fler skrivare som klarade kraven men som sällades bort på grund av lång leveranstid.

4.2.3.6.1 RepRapPro Huxley

Huxley, se Figur 7, är en 3D-skrivare utvecklad inom RepRap-projektet där hälften av komponenterna är 3D-utskrivna. Huvudkonstruktionen består av gängstänger som är sammankopplade med utskrivna plastelement. Huxley är en liten skrivare och tar endast upp en yta av 260 x 280 x 280 mm (längd x djup x höjd) men har ändå en utskriftsvolym på 140 x 140 x 110 mm, vilket är stort i förhållande till dess storlek. Skrivaren använder sig av 1,75 mm rund plasttråd, vilket är en av standarderna vid FDM-tekniken. Utskriftsytan består av en plexiglasskiva som kan värmas vilket gör den lämplig för utskrift i både ABS och PLA. Huxleys design och programvara är fri under GPL 2.0 vilket gör den lämplig för modifikationer. Skrivaren kommer i en byggsats och kostar ca 5 000 kr inkl. moms [25]. För mer detaljerade specifikationer se Bilaga F.



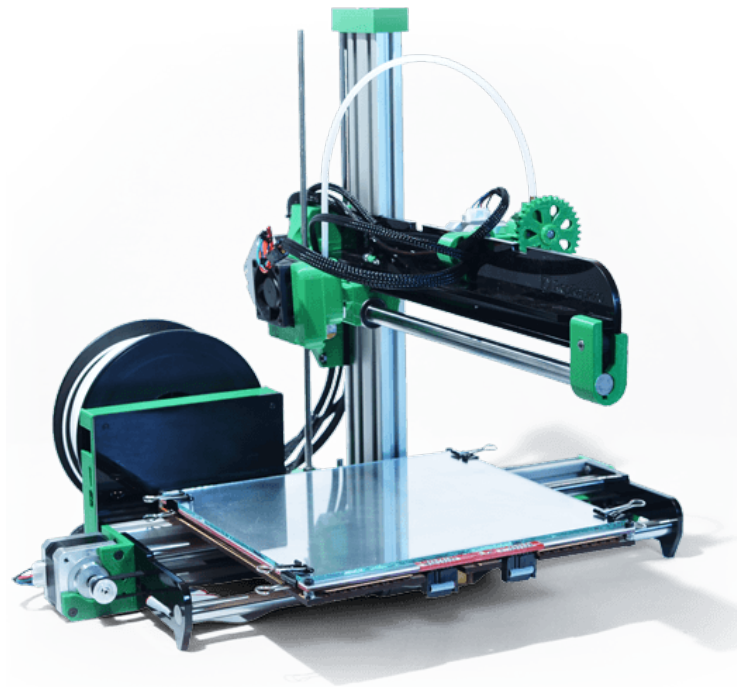
Figur 7: RepRapPros Huxley

4.2.3.6.2 RepRapPro Ormerod

Ormerod, se Figur 8, är den senaste skrivaren som är utvecklad inom RepRap projektet. Den är mycket lik Huxleyn men skiljer sig på några punkter. Liksom Huxley så är alla plastdetaljer 3D-utskrivna. Men i stället för att använda sig av gängstänger till huvudkonstruktionen så använder sig Ormerod av aluminiumprofiler. Ormerod har en utskriftsvolym om 200x200x200 mm, vilket är större än Huxleyn. Skrivaren använder sig av 1,75 mm rund plasttråd, och utskriftsytan består av en glasskiva som kan värmas. Den stora skillnaden mot andra 3D-skrivare är att Ormerod har en mjukvarubaserad automatisk nivåjustering av utskriftsplattformen. Skrivaren kommer i en byggsats och kostar ca 6 500 kr inkl. moms [26]. För mer detaljerade specifikationer se Bilaga F.

4.2.3.6.3 Printrbot Plus V2.1

Printrbot Plus V2.1, se Figur 9, är utvecklad av Printrbot som startade 2011 och är baserat i Kalifornien, USA. Printrbots 3D-skrivare känns igen på att de flesta är tillverkade till stor del av laserutskuren plywood, istället för 3D-utskrivna plastdelar. Printrbot Plus har en utskriftsvolym om 200 x 200 x 200 mm, lika stor som Ormeroden. Det som särskiljer Printrbot plus från de

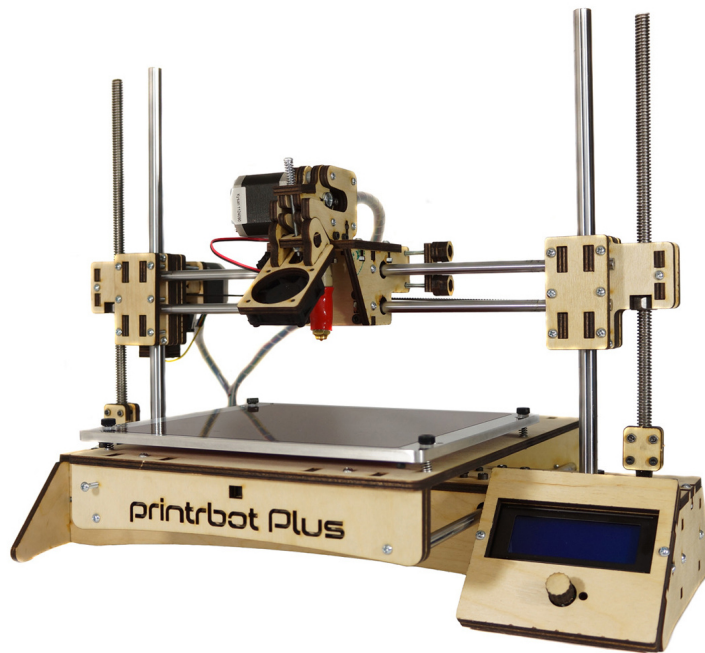


Figur 8: RepRapPros Ormerod

andra två 3D-skrivarna är att den har ett mindre munstycke vilket gör att den har högre noggrannhet i x- och y-led. Den har en LCD-display som gör att det går att skriva ut utskrifter från ett minneskort utan att ha en dator ansluten. Delarna som sammanfogar stålstängerna är tillverkade från CNC-frästa aluminiumblock. Detta gör att skrivaren får högre precision än de två andra 3D-skrivarna där delarna sitter ihop med 3D-utskrivna delar. Printrobot Plus utskriftsyta består av en aluminiumplatta med kaptontejp ovanpå en värmeplatta. Skrivaren kommer i en byggsats eller färdigmonterad och kostar ca 7 500 kr inkl. moms för en byggsats och ca 8 200 kr färdigmonterad [27]. För mer detaljerade specifikationer se Bilaga F.

4.2.3.7 Val av produkt

De tre utvalda skrivarna hade mycket lika egenskaper. Ormerod från RepRap-Pro valdes av ett antal anledningar där den främsta, förutom att den uppfyllde kraven, är att den såldes av en svensk återförsäljare som Chalmers hade avtal med. Vidare innebär den automatiska nivåjusteringen av utskriftsytan



Figur 9: Printrbot Plus V2.1

förhoppningsvis att behovet av manuella justeringar minimeras.

4.2.3.8 Montering

3D-skrivaren levererades i en byggsats med elektronik, motorer, metalledar och 3D-utskrivna plastdetaljer. Instruktionerna för monteringen av skrivaren var tyvärr i flera fall bristfälliga. Detta kan bero på att skrivaren ständigt utvecklas men att monteringsanvisningar inte hinner uppdateras i samma takt. Detta gjorde att monteringen och kalibreringen av skrivaren var onödigt komplicerad. Sammanlagt tog det cirka 50 arbetstimmar för projektgruppen att montera och kalibrera skrivaren.

4.2.3.9 Verifiering av systemet

Diverse delar av systemet testades för att kontrollera att den eftersträlvade funktionaliteten fanns eller är uppnåbar.

4.2.3.9.1 Vidhäftningsundersökning

För att verifiera att vidhäftningen minimerades efter utskrift testades vidhäftningen mellan utskriftsobjektet och skrivplattformen. För att kunna undersöka slitage och dimensioneringskrav gjordes en undersökning av vidhäftningen mellan utskriftsobjektet och skrivplattan.

5 Resultat och diskussion

I detta avsnitt presenteras och diskuteras de slutliga resultat av arbetet. Här kommer också de viktigaste undersökningarna som behandlats i arbetet redovisas samt de som inte ansågs essentiella för fortsattutveckling av delsystemen.

5.1 Intresseundersökning

Vid sammanställning av intresseundersökningen visade det sig att Chalmers studenter hade ett intresse för teknologin. De ansåg att det vore ett praktiskt och roligt tillägg på Chalmers. Studenterna trodde att de skulle få nytta av tekniken både i utbildningen och på fritiden. Det största behovet uppkommer vid prototypstillverkning i slutet av projektkurser, såsom IKOT och kandidat-arbeten.

Det visade sig också att flera av de tillfrågade redan var bekanta med tekniken och såg stor potential i att ha tekniken tillgänglig på Chalmers. De trodde dock att kreativiteten skulle sätta stora begränsningar på användningen för deras del. En del uttryckte även oro över att det skulle bildas kö om för få skrivare installerades.

När det kommer till kostnad för utskrift var de flesta bekväma med att betala självkostnadspris plus en liten avgift för underhåll. Det kom även in förslag på ett system likt det med Printerquota (PQ) för pappersskrivarna på Chalmers.

Det blev dock så att endast tjugosex personer undersöktes. Därmed är inte intresseundersökningen lika pålitlig som önskats. Många svar är dock likartade vilket indikerar att resultatet kan ha viss tillförlitlighet.

5.2 Verifiering av system

Vid undersökning av skrivaren visar det sig att dess motorer inte är tillräckligt starka för att skrivhuvudet ska kunna användas för utmatning. Används skrivhuvudet för utmatning finns även risken att delar av skrivaren böjs, något som kan försämra utskriftskvaliteten eller göra skrivaren obrukbar. Det visar sig även att skrivarens mjukvara har problem med seriell kommunikation över USB, något som leder till att utskriftssystemet som helhet ej fungerar korrekt.

5.2.1 Vidhäftningsundersökning

Vidhäftningsundersökningen gav aldrig ett tillförlitligt resultat eftersom processen inte itererades tillräckligt många gånger. De resultat som erhöles varierade mellan noll och 1,5 Newton per kvadratcentimeter (N/cm^2), ekvivalent med att lyfta drygt 150 g, vid avsvälning från 65°C till 55°C . För att hitta ett mönster behövs fler tester göras. Majoriteten av utskrifterna lossade dock av sig själva om de läts svalna från 65°C till 45°C .

5.2.2 Kompabilitetstest

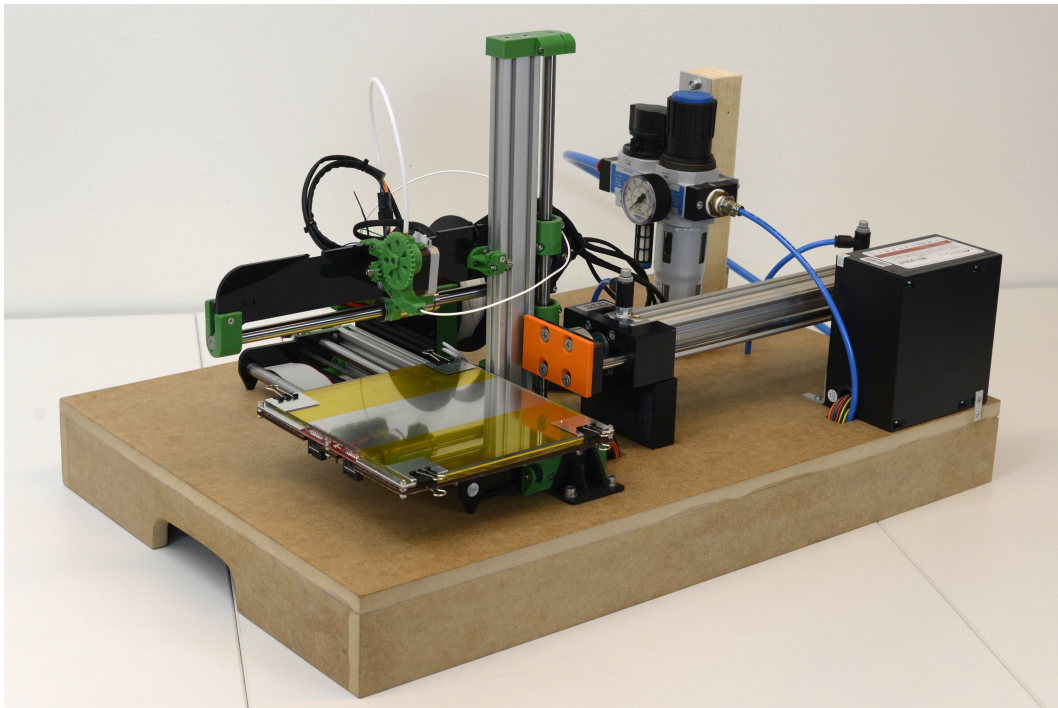
Ett praktiskt kompabilitetstest mellan utskriftssystemet och Chalmers datornätverk var planerat men har inte kunnat utföras. Främst beror detta på att efterfrågad information från Chalmers IT-service sida har uteblivit. Detta resulterar i att mjukvaran inte kan integreras med Chalmers datornätverk som planerat.

5.3 Slutlig konstruktion

Följande avsnitt kommer att detaljerat beskriva de slutliga delsystem som har arbetats med under projektet. Den slutgiltiga systemkonstruktionen illustreras i Figur 10.

5.3.1 Delsystem: Automatisk utmatning och skrivplattform

Den slutgiltiga konstruktionen av skrivplattformen består av fem materiallager, se Figur 11. Nummer ett överst i bilden är en glasplatta. Denna är huvudkomponenten i konstruktionen. Den utgör skrivytan för 3D-skrivaren samtidigt som den förhindrar att deformationer och distorsioner sker i plattformen. Därefter så ligger en metallplatta vars uppgift endast är att leda värmen så att den blir jämnfördelad. Nummer tre är en värmeplatta. Denna justerar temperaturen vid och efter utskrift. Det är denna i kombinationen glasplattan som utgör grunden för konceptet. Nummer fyra skyddar skrivarmonteringen från värme. Detta är nödvändigt då monteringen är i plast som är termiskt känslig. Nummer fem är den del som monteras på 3D-skrivaren.



Figur 10: Den färdiga prototypen

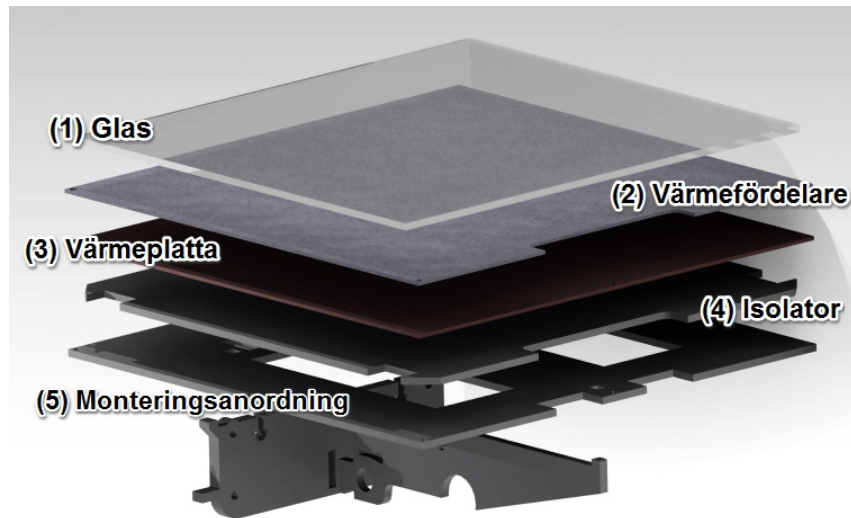
3D-skrivarens utmatning består av en pneumatisk kolv som pressar av den färdiga utskriften från plattan när utskriften är färdig. Konstruktionen är förhållandevis enkel och kringgår en del av problematiken med vidhäftning genom en stabil konstruktion och ett stort kraftintervall.

5.3.2 Delsystem: Mjukvara

Mjukvarusystemet består av ett flertal moduler med olika uppgifter. Modulerna är fördelade över fyra olika fysiska maskiner:

5.3.2.1 Klient

Detta är den maskin användaren ansluter till utskriftssystemet med, exempelvis en av Chalmers datorer, användarens egen dator eller en smarttelefon. Det krävs att klienten har webbläsare samt att användaren har inloggningsuppgifter för tjänsten.



Figur 11: Sprängskiss av skrivplattformen

5.3.2.2 Webbserver med kösystem

Denna maskin kör en webbserver som tillhandahåller användargränssnitt för klienten samt ett kösystem som lagrar och fördelar utskriftsjobb över de tillgängliga 3D-skrivarna i utskriftssystemet. För att få göra utskrifter krävs att användaren loggar in i webbgränssnittet med sitt användarnamn samt lösenord.

Integreringen av utskriftssystemet i Chalmers datornätverk har inte kunnat utföras, därmed kan inte inloggningsuppgifterna för Chalmers tjänster användas för inloggning till systemet. I stället krävs att användaren skapar ett nytt konto i systemet innan det kan användas.

5.3.2.3 Skivningsserver med kontroll och övervakning av skrivare

Varje 3D-skrivare i systemet är kopplad till en server som sköter skivning av CAD-filer samt kommunikation med skrivarna. Det kan finnas ett flertal skrivare kopplade till varje sådan server. När en skrivare kopplad till servern är ledig och ett utskriftsjobb finns i kösystemet hämtar servern automatiskt utskriftsjobbet som den sedan tilldelar den lediga skrivaren. En webbkamera kopplad till servern erbjuder övervakning av utskriftsprocessen via webbgränssnittet.

5.3.2.4 Styrkort skrivare

På själva skrivaren sitter en mikroprocessor som styr skrivarens motorer, munstycken, fläktar med mera enligt instruktioner som erhålls antingen från lokalt microSD-kort, via USB eller Ethernet. I prototypens implementation sker kommunikationen via USB.

5.3.2.5 Botqueue

Basen för systemet utgörs av BotQueue [28], en mjukvarulösning för 3D-skrivare som bland annat tillhandahåller följande:

- Grafiskt användargränssnitt i form av en webbserver.
- Stöd för ett stort antal användare.
- Kösystem med möjligheten för flera separata köer.
- Stöd för automatisk översättning, skivning, av 3D-modeller till G-kod.
- Stöd för ett stort antal 3D-skrivare, dessa kan även vara av olika typ.
- Loggning av utskrifter samt av fel i systemet.

BotQueue erbjuds som öppen källkod och kan därför vidareutvecklas eller skräddarsys för att passa de behov som finns inom projektet. Vidareutveckling av OctoPrint var i början av projektet det mest aktuella konceptet då det är mycket användarvänligt. BotQueue erbjuder dock, till skillnad från OctoPrint, ett kösystem med automatisk fördelning av utskriftsjobb till skrivarna i systemet. Detta gör BotQueue till ett lämpligare val i det fall utskriftssystemet ska utökas i form av fler 3D-skrivare. OctoPrint lämpar sig bäst i ett system med endast en skrivare.

För att utskriftssystemet ska kunna sättas i drift finns behov av möjlighet att logga in till systemet via Chalmers inloggningssystem. För detta kan OpenAM [29] användas, en mjukvarulösning med stöd för flera säkerhetsprotokoll inklusive SAML [30], det protokoll som används av Chalmers inloggningssystem. OpenAM installeras på samma Apache-webbserver [31] som BotQueue

ligger på. Instruktioner för hur installationen går till finns på OpenAM:s sida [29].

BotQueue använder sig av Amazon Web Services (AWS) [32] för datalagring. AWS kan dock ersättas med Eucalyptus [33], en mjukvarulösning för molnlagring, som även har öppen källkod och kan köras på en egenadministrerad server. På så sätt får man full kontroll över den data som finns inom utskriftssystemet.

I ett driftsatt utskriftssystem kan det vara önskvärt att integrera ett kvot-system, dock finns inget behov av detta i prototypsystemet, vars uppgift är att demonstrera den automatiska utmatningen samt fjärråtkomsten till utskriftssystemet.

5.3.3 Delsystem: 3D-skrivare

Ormerod, se Figur 8 RepRapPros Ormerod, är uppdelad i 3 axlar som styr skrivkoordinaterna i x-, y- och z-led. y- och z-leden styr munstyckets position, medan x-leden styr plattformen. I och med att plattformen kan röra sig fritt i x-led kan utmatningssystemet monteras i ena änden av skrivaren.

5.4 Användarvänlighet

I och med att vidareutvecklingen av mjukvaran har behövt begränsas, se Avsnitt 1.5 Avgränsningar, ligger systemets användarvänlighet på en något lägre nivå än planerat. För att använda prototypsystemet måste användaren:

1. Modifiera 3D-modellen för att vara lämplig för utskrift, vilket kan innefatta simplificeringar av geometri, orientering samt placering av objekt på utskriftsytan.
2. Navigera till utskriftssystemets hemsida.
3. Skapa ett nytt konto för utskriftssystemet.
4. Logga in till systemet med sina inloggningsuppgifter.
5. Ladda upp CAD-filen eller G-koden för den 3D-modell som ska skrivas ut.

6. Starta utskriften.
7. Hämta det utskrivna objektet efter slutförd utskrift.

5.5 Tillgänglighet

Systemet är idag inte tillgängligt för studenter på Chalmers på grund av att arbetet endast tar fram en prototyp som illustrerar hur systemet kan fungera. Det finns även vissa brister i systemet, som nämnt tidigare.

Om vidare utveckling av mjukvaran utförs kan systemet sättas i drift.

5.6 Diskussion om uppgift och dess genomförande

I och med att det finns en stor efterfrågan efter 3D-skrivartekniken så är arbetet att utöka tillgången till 3D-skrivartekniken relevant på Chalmers. I dagsläget så används 3D-skrivarna via Chalmers personal. Detta hindrar införandet av fler 3D-skrivare i och med den ökade belastningen på personalen. Därmed så är detta arbetet relevant då de arbetar mot att konstruerar ett system som kan användas av studenterna. Detta gjordes genom att automatisera så stor del som möjligt. Arbetet har kommit en bra bit på vägen mot att ställa upp ett automatiserat 3D-skrivarsystem. Systemet kräver dock vidareutveckling.

6 Slutsats och rekommendationer

Det finns goda möjligheter att tillverka ett 3D-skrivarsystem med automatisk utmatning och fjärråtkomst. Prototypen som togs fram i detta projekt demonstrerar ett sätt att mata ut utskrifter. Prototypen är beroende av tryckluft för att kunna mata ut färdiga utskrifter.

Genom att skriva ut på en uppvärmd glasskiva som tillåts svalna när utskriften är färdig kan man få utskriften att släppa helt. På så sätt går det att putta ut utskriften med skrivarhuvudet, istället för med en tryckluftsdriven kolv, utan att skada skrivaren. För att få utskriften att släppa helt behöver man dock experimentera med olika temperaturer och avstånd mellan munstycke och glasskiva. Det kan även behövas olika parametervärden beroende på hur stor utskriften är etcetera. För att skrivaren ska klara av flera utskrifter på rad utan att konfigurationen rubbas krävs det en mycket stabil skrivare.

Vid fortsatt utveckling av systemet rekommenderas att basera systemet på en 3D-skrivare med god dokumentation alternativt en mycket bred användbarhet. Om systemet baseras på en utmatning som inte kräver att utskriften lossnar från skrivytan av sig själv krävs en mycket stabil och robust skrivare som inte rubbas när utskriften trycks bort.

RepRapPros Ormerod är i nuläget inte en lämplig bas för ett 3D-skrivarsystem för kontinuerlig drift med många användare på grund av skrivplattformens instabila upphängning och bristande mjukvara. Duet-kortet, ett Arduino-baserat kontrollkort, har problem med den seriella kommunikationen. Detta gör att utskrift från andra källor än microSD-kortet lider av ojämn motorstyrning.

Ormerods automatiska nivåkompensering är en lovande funktion som skulle kunna öka intervallet mellan underhåll av 3D-skrivaren, genom att tillåta viss lutning på skrivplattformen. Systemet fungerar tyvärr inte helt optimalt i dagsläget, men det är värt att ha i åtanke när man väljer skrivare.

Vidare bör det tas i beaktande att 3D-utskrift lämnar rester på utskriftsytan som måste rengöras med jämna mellanrum. Att eventuellt konstruera ett system eller att ha någon som är ansvarig för systemet som regelbundet rengör skrivplattformen är något att ha i åtanke.

För ett 3D-skrivarsystem på Chalmers är det viktigt att utveckla en inneslutning till systemet för att minimera systemets störande effekter på omgiv-

ningen samt underlätta för användaren. Inneslutningen bör fungera som ett gränssnitt mellan användaren och 3D-skrivaren och endast låta användaren plocka ut färdiga utskrifter. Vidare bör inneslutningen ge enkel tillgång till 3D-skrivaren för underhåll och service.

BotQueue erbjuder redan många av de funktioner som ett driftsatt system kräver, dock saknas viss nödvändig funktionalitet och anpassning. Prototypsystemet ger vanliga användare för mycket frihet att göra ändringar i systemet och saknar kontroll av G-koden som skickas till skrivaren, detta kan orsaka driftfel men även skada på utskriftssystemet. För att avhjälpa detta problem rekommenderas att en grundlig genomgång och anpassning av källkoden för BotQueue görs.

För att få större kontroll över utskriftssystemet och den data som skickas inom det rekommenderas även att BotQueue installeras på en egen webbserver. Mjukvara för utskriftssystemets datalagring, förslagsvis Eucalyptus, bör också installeras på en egen server. För att denna migrering till egendrivna servrar ska kunna ske krävs dock omfattande ändringar i källkoden för BotQueue.

För att kunna kontrollera hur mycket varje student kan skriva ut rekommenderar projektgruppen att ett kvotsystem till BotQueue utvecklas. Ett sådant system kan även användas för att utvärdera användningen av 3D-skrivarsystemet. Kvotsystemet kan lämpligen baseras på volym filament som använts.

7 Slutord

Den framtagna prototypen är en god start i arbetet mot ett system färdigt för bruk på Chalmers. Kandidatgruppen hoppas att arbetet inom en snar framtid leder till att 3D-utskrift blir tillgänglig och lättanvänd för samtliga studenter och anställda på Chalmers.

Referenser

- [1] Nationalencyklopedin (2014) *ABS-plast*. I *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/lang/abs-plast> (2014-05-18).
- [2] Jinming, Z. (2014) *friformsframställning*. I *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/friformsframställning> (2014-05-18).
- [3] Nationalencyklopedin (2014) *GPL*. I *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/lang/gpl> (2014-05-16).
- [4] Wikipedia contributors (2014) *Polylactic acid*. I *Wikipedia, The Free Encyclopedia* http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polylactic_acid&oldid=602139981 (2014-05-17).
- [5] Creative Tools AB (2014) *Om Creative Tools AB*. http://www.creativetools.se/om_creative_tools (2014-05-18)
- [6] Nationalencyklopedin (2014) *Öppen källkod*. I *Nationalencyklopedin*. <http://www.ne.se/kort/öppen-källkod> (2014-05-18).
- [7] Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Kauczor R. Unterhinninghofen · H.-U., Giesel, F. L. (2008) *3D printing based on imaging data: review of medical applications*. Springer
- [8] Griffiths, S. (2014) *3D printer creates 10 houses in a DAY*. Mail Online. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2615076/Giant-3D-printer-creates-10-sized-houses-DAY-Bungalows-built-layers-waste-materials-cost-3-000-each.html> (2014-05-16).
- [9] Lewis, T. (2014) How NASA Is Launching 3D Printing Into Space *Space.com* <http://www.space.com/24599-nasa-launches-3d-printing-in-space.html> (2014-05-18).
- [10] Felder, R.M., Silverman, L.K. (1988) *Learning and Teaching Styles In Engineering Education*. Engr. Education, Volume 78, Issue 7, pp 674-681 (2014-05-19)

Author/s surname, initial(s). (Year of publication) Article title. Journal/Newspaper title, volume, number, pages. (Date accessed).

- [11] Fiesel, L.D., Rosa, A.J. (2005) *The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education*. Journal of Engineering Education, Volume 94, Issue 1, pp 121-130 (2014-05-19)
- [12] MakerBot Industries, LLC (2014) *3D Printing Concepts* <http://www.makerbot.com/support/guides/printing/> (2014-05-16)
- [13] Jabocs, P. F. (1992) *FUNDAMENTALS OF STEREOLITHOGRAPHY*. Valencia, California: 3D Systems, Inc.
- [14] Agarwala, M. et al. (1995) Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, Volume 1, Number 1, pp. 26–36
- [15] Matz, J., Eagar, T. (2002) *Carbide formation in alloy 718 during electron beam solid freeform fabrication*. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.33A pp2559-67
- [16] *DreamVendor | DREAMS Lab | Virginia Tech* <http://www.dreams.me.vt.edu/dreamvendor/> (2014-05-18)
- [17] Pax, C.E., Smith, Z., Mayer, A., Pettis, N.B. (2012) *Automated 3D build processes*. US Patent 8,287,794.
- [18] Pax, C.E., Smith, Z., Mayer, A., Pettis, N.B. (2012) *Automated 3D build processes*. US Patent 8,282,380.
- [19] MakerBot Industries, LLC (2012) *MakerBot Thing-O-Matics: Where We Are Now* <http://www.makerbot.com/blog/2012/04/17/makerbot-thing-o-matics-where-we-are-now/>. (2014-05-16)
- [20] Sanjay Mortimer (2013) *RepRap Auto Printing - Ejection of print and starting of new print*. [Youtube] <https://www.youtube.com/watch?v=KxU3ElV1LPw> (2014-05-19)
- [21] Lee, I. (2013) *World's First Fully Automated 3D Printer for Schools*. <http://makezine.com/2013/09/26/worlds-first-fully-automated-3d-printer-for-schools/> (2014-05-19)

- [22] Lindstedt, P., Burenius, J. (2003) *The Value Model: How to Master Product Development and Create Unrivalled Customer Value*. u.o.:Nimba.
- [23] Dr Burge, S. (2009) *The Systems Engineering Tool Box*. <http://www.burgehugheswalsh.co.uk/uploaded/documents/Pugh-Matrix-v1.1.pdf> (2014-06-03)
- [24] MakerBot, (2011) *Automated Build Platform for Thing-O-Matic* Tillgänglig på: <https://www.flickr.com/photos/makerbot/5258342086/sizes/o/in/photostream/>
- [25] Creative Tools AB (2014) *3D-skrivare : RepRapPro Huxley*. <http://www.creativetools.se/hardvara/3d-skrivare/reprappro-huxley-byggsats-komplett> (2014-05-16)
- [26] RS Components AB (2014) *Buy 3D Printers RepRapPro Ormerod Full 3D Printer Kit RepRapPro Ormerod 384 online from RS for next day delivery*. <http://se.rs-online.com/web/p/3d-printers/7952333/> (2014-05-16)
- [27] Printrbot Inc (2014) *Plus v2.1 KIT | Printrbot*. <http://printrbot.com/shop/plus-v2-1-kit/> (2014-03-07)
- [28] Hoeken, Z. (2014) *BotQueue.com: Internets + Digital Fabrication = Win*. <https://www.botqueue.com/> (2014-05-18)
- [29] ForgeRock (2014) *OpenAM | ForgeRock*. <http://forgerock.com/products/open-identity-stack/openam/> (2014-05-18)
- [30] Wikipedia contributors (2014) *Security Assertion Markup Language*. I *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Security_Assertion_Markup_Language&oldid=608786698 (2014-05-18)
- [31] The Apache Software Foundation (2014) *Welcome! - The Apache HTTP Server Project*. <http://httpd.apache.org/> (2014-05-18)
- [32] Amazon.com, Inc. (2014) *Amazon Web Services (AWS) - Cloud Computing Services*. <https://aws.amazon.com/> (2014-05-18)

- [33] Eucalyptus Systems, Inc. (2014) *Open Source AWS Compatible Private Clouds* | *Eucalyptus*. <https://www.eucalyptus.com/> (2014-05-18)

A Intervjufrågor

För att ha en gemensam grund att utgå ifrån så skapades en lista med frågor till den muntliga intervjun och enkäten. En del frågor ställdes för att se om studenterna hade något behov av tekniken, övriga frågor är utformade för att ge studenterna möjlighet att framföra tankar kring tekniken.

1. Vet ni vad 3D-utskrivning är?
2. Har ni någon gång kommit i kontakt med tekniken? Iså fall Var? När? Varför?
3. Om ni ska konstruera en prototyp för ett arbete, vilken metod skulle ni använda?
4. Om ni har en mer komplicerad konstruktion att redovisa/presentera, skulle 3D-utskrivning vara en möjlighet?
5. Om de fanns en 3D-skrivare tillgängliga på Chalmers, vad skulle ni använda den till?
6. Vad skulle ni önska att en 3D-skrivare/ett system med 3D-skrivare skulle kunna göra?
7. Har ni någon gång känt ett behov av en 3D-skrivare i er utbildning?
8. Hade ni kunnat tänka er betala för att skriva ut något? Iså fall hur mycket?
9. Har ni arbetat med 3D-modellering någon gång? Känner ni att ni har tillräckligt med kunskap för att modellera något för utskrift.
10. Känner ni någon annan som skulle vara intresserad av att göra 3D-utskrifter? Vem/vilka?

B Resultat materialundersökning

Tabell 3: Resultat av materialundersökningen för skrivplattan

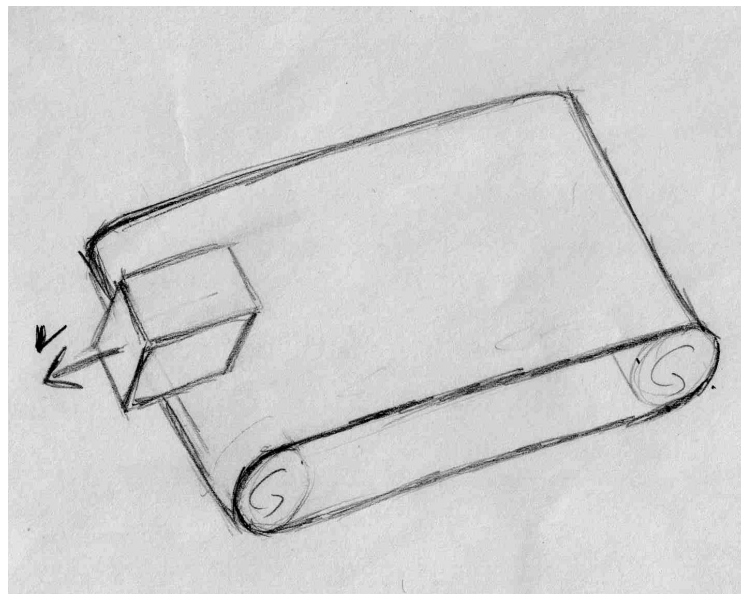
Material	Resultat	Förväntat resultat	Betyg	Reducenter
Kapton (uppvärmt)	G	G	3	5,7
Blå målartejp	G	G	2	2,3,7
Aluminium: Slätyta	U	U	-	-
Aluminium: Finyta	U	G	-	-
Aluminium: Grovyta	U	G	-	-
Glas	U	G	-	-
Glas: Avfettat (uppvärmt)	G	U	3	4
Glas: Hårsprej	G	G	1	4,6
Plexiglas	U	G	-	-
Plexiglas: Fettfri	G	G	2	3,4
Massivt trä: slät	G	G	1	1,2,3,7
Plywood: slät	G	G	1	1,2,3,7
Masonit: grovundersida	G	G	1	1,2,3,7
Masonit: finundersida	U	U	-	-
Papper	G	G	2	1,3,7

1. Delar av materialet följer med det utskrivna objektet vid lossning: -1 p
2. Lossning av utskrivet objekt kräver verktyg: -1 p
3. Slitage på materialet efter utskrift: -1 p
4. Materialet kräver regelbundet underhåll före utskrift: -2 p
5. Materialet kräver regelbundet underhåll veckovis: -1 p
6. Materielunderhåll inte lämpligt att utföra i 3D-skrivaren: -2 p
7. Materialet behöver ersättas regelbundet: -1 p

C Utmatningskoncept

C.1 Rullband

Utskrift sker på ett rullband som transporterar ut utskriften när den är färdig. Bandet är uppspänt mellan två rullar, varav en har motordrivning. Utskriften lossnar när den åker över den främre rullen, och trillar ner i någon slags behållare som användaren kan komma åt. För att utskrift ska kunna ske på bandet behöver det vara helt plant, detta skulle kunna uppnås med en platta under ett tillräckligt spänt band. För att förbättra bandets vidhäftningsförmåga kan det behöva tejpas med blå maskeringstejp eller kaptontejp. Under bandet kan man ha en värmeplatta om detta behövs för att det ska gå att göra utskrift på bandet. En automatisk skrivplattform som använder sig av ett rullband är en teknik som utvecklades, patenterades och lanserades av MakerBot hösten 2010. Dock slutade de sälja denna skrivplattform våren 2012.

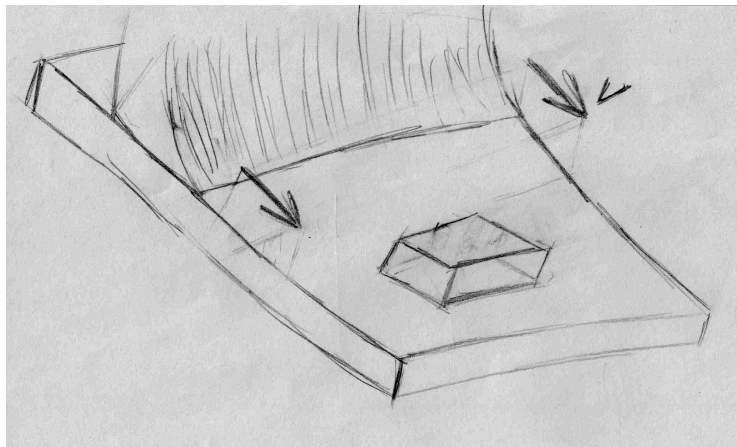


Figur 12: Skiss av konceptet rullband

C.2 Plog

En plog trycker bort utskriften från plattan med kraft. Metoden har framgångsrikt använts av andra utvecklare och står ut genom sin simplicitet. En eventuell nackdel med metoden är att fina detaljer kan förstöras av trycket från plogen.

Att använda en plog som skär och föser ut utskriften ställer krav på att skrivplattformen inte tar skada när detta sker och att den är tillräckligt stabil för att inte behöva kalibreras mellan utskrifter. Förskjuts plattformen i z-led finns risken att nästkommande utskrift inte fäster på plattformen vilket skulle leda till en misslyckad utskrift.



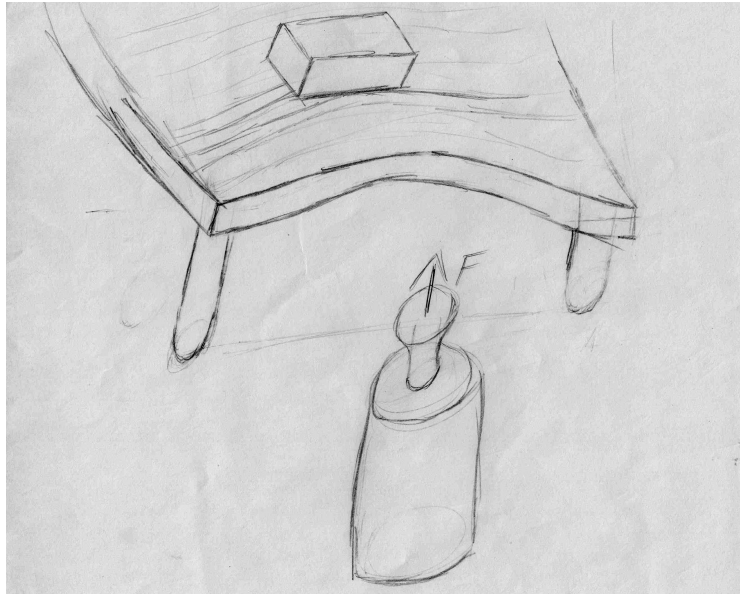
Figur 13: Skiss av konceptet plog

C.3 Knuff underifrån

Utskrift sker på en platta med hög elasticitet. Utskriften lossas från plattan genom att en kolv böjer plattan efter att utskriften är klar. Därefter puttats den ut av en arm eller anordning lik en plog, se avsnitt C.2.

C.4 Glödtråd

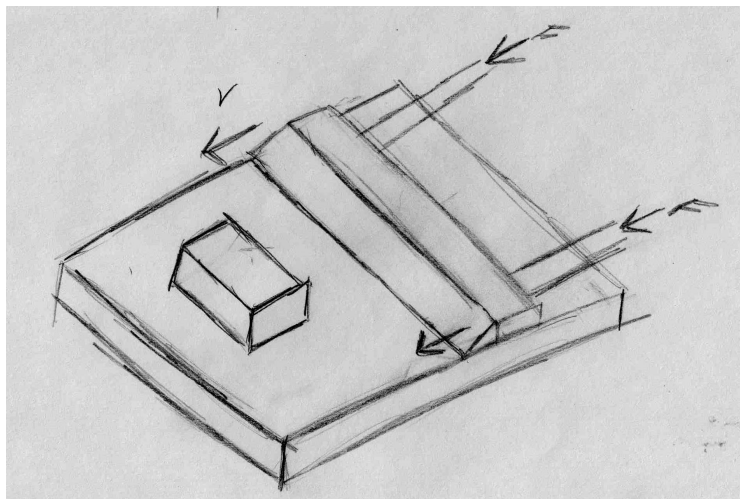
En glödtråd värms upp vid slutet av utskriften. Denna används sedan för att skära av utskriften längsmed bottenplattan. Detta gör utskriften helt fri från plattan. Det behövs dock fortfarande någon form av utmatningsfunktion.



Figur 14: Skiss av konceptet knuff underifrån

C.5 Plog med skärblad

Ett skärblad separerar utskriften från plattan, därefter matas den ut med en plog. Har gjorts av andra med framgång.



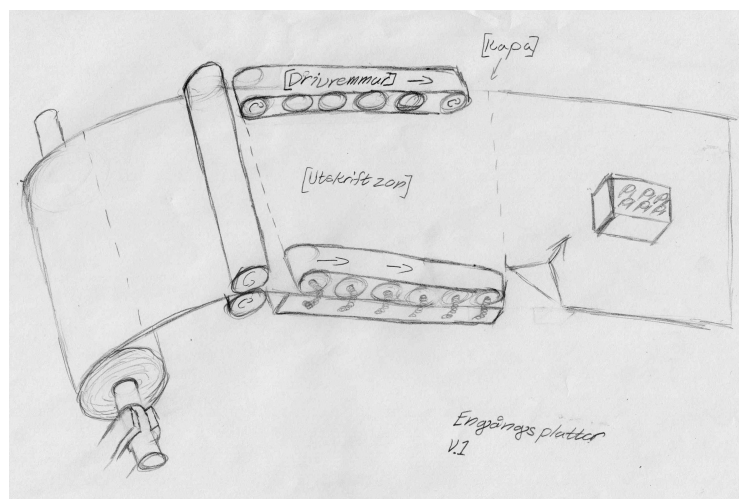
Figur 15: Skiss av konceptet plog med skärblad

C.6 Avtagbara plattor

Objekt skrivs ut på lösa plattformar som matas ut när utskriften är färdig. Tomma plattformar finns redo att matas in i skrivaren så fort en annan matas ut. Inmatning av plattformar sker helt automatiskt, men använda plattformar behöver rengöras och matas in i skrivaren av användaren.

C.7 Engångsplattform

Objekt skrivs ut på engångsark av lämpligt material som matas ut när utskriften är färdig. Användaren får sedan rensa sin utskrift från rester av utskriftsarket. Materialet kan antingen finnas i skrivaren som färdiga ark av rätt storlek, eller finnas på rulle för att skäras av utanför skrivaren efter utmatning.



Figur 16: Skiss av konceptet Engångsplattform

D Krav och önskemål

D.1 Automatisk utmatning och skrivplattform

Tabell 4: Krav och önskemål - Automatisk utmatning och skrivplattform

Kriterier	Krav/önskemål	Vad	Enhet	Idealvärde
Pålitlighet	K	Sannorlikhet för lyckad utskrift	$\mu\%$	0
Få komponenter	Ö	Antal Komponenter	st	1
Låg komplexitet	Ö	Antal Moduler	st	
Goda reparationsmöjligheter	Ö	Öppen konstruktion	n/a	n/a
Lågt ingripande för användaren	Ö	Interaktioner från CAD-modell till utskrift	st	0
Lågt underhåll	Ö	Utskrifter/underhållstillfälle	st_u/st_ut	∞
Modul: Plattform				
Rak utskriftsyta	K	Delta max och min höjd	$\Delta\mu m$	0
Termisk deformationsbeständigt	Ö	Längdutvidgningskoefficienten/värmeledningstalet	λ/α	0
Modul: Platformsyta				
Hög vidhäftning vid utskrift	K	Hur väl utskrift fäster vid utskrift	N/cm ²	∞
Låg vidhäftning efter utskrift	Ö	Hur lätt utskriften lossnar efter utskrift	N/cm ²	0
Modul: Utmatning				
Automatisk utmatning	Ö		n/a	n/a
Skonsam mot utskriften	Ö		n/a	n/a

D.2 3D-skrivaren

Tabell 5: Krav och önskemål - Automatisk utmatning och skrivplattform

Kriterier	Krav/önskemål	Vad
Kan utföra 3D-utskrift	K	Grundfunktionen för 3D-skrivare
Stabil konstruktion	K	Konstruktionen ska vara stabil för att tåla eventuella påfrestningar vid utmatning
Leverans inom 14 dagar	K	Förutsättning om projektets skall hinnas klart
Öppen konstruktion	Ö	Att skrivaren inte är innsluten för att underlätta konstruktion av utmatningssystem
Skrivplattform rörlig i en dimension	Ö	Fungerar bra tillsammans med utmatningskoncept
Lågt pris	Ö	Förutsättning om projektet skall skalas upp

E Pugh-matriser

E.1 Automatiskutmatning och skrivplattform

Tabell 6: Pugh-matris för automatisk utmatning och skrivplattform

		Skrivplattform									
		Första iterationen						Andra iterationen			
		Referens	1	2	3	4	5	6	1	3	6
Pålitlighet	1	x	+	-	+	-	+	+	x	0	+
Få komponenter	2	x	-	-	0	-	-	-	x	+	0
Låg komplexitet	3	x	-	0	0	-	-	-	x	+	0
Goda reparationsmöjligheter	4	x	-	-	+	-	0	+	x	0	+
Lågt ingripande för användaren	5	x	+	+	+	+	+	+	x	0	-
Lågt underhåll	6	x	+	+	+	-	0	+	x	+	0
Automatisk utmatning	7	x	+	+	+	+	+	+	x	0	-
Skonsam mot utskriften	8	x	+	0	-	-	0	+	x	-	0
Antal +		x	5	3	5	2	3	6	x	3	2
Antal 0		x	0	2	2	0	3	0	x	4	4
Antal -		x	3	3	1	6	2	2	x	1	2
Totalt		x	2	0	4	-4	1	4	x	2	0

referens: Maskeringstejpad glasplatta

1 Rullband

4 Glödtråd

2 Knuff underifrån

5 Skär + plog

3 Plog

6 Avtagbara plattor

E.2 Mjukvara och nätverk

Tabell 7: Pugh-matris för skrivplattform

	Nätverksintegrering					
	Första urvalet				Andra urvalet	
	1	2	3	4	3	2
Webbaserat användargränssnitt	x	+	+	0	x	0
Övervakning av utskriftsprocess	x	0	0	0	x	0
Dokumentering av utskriftsprocess	x	+	+	+	x	0
Felkontroll av utskriftsprocess	x	+	+	+	x	0
Meddelande om avslutad	x	0	0	0	x	0
Inloggningssystem för användare	x	+	+	0	x	0
Grafiskt användargränssnitt	x	0	0	0	x	0
Loggning av system	x	+	+	+	x	0
Kösystem för utskrifter	x	0	+	0	x	-
Konvertering av ritningar till utskriftskommandon	x	+	+	+	x	0
Konvertering av ritningar under pågående utskrift	x	-	0	-	x	-
Öppen källkod	x	0	0	-	x	0
Utskriftskvot för användare	x	0	0	0	x	0
Åtkomstbegränsning för användare	x	+	+	0	x	0
Antal +	x	7	8	4	x	0
Antal 0	x	6	6	8	x	12
Antal -	x	1	0	2	x	2
Totalt	x	6	8	2	x	-2
Rangordning	x	2	1	3	x	x

1 Lokalt via USB (Referens)

2 OctoPrint

3 BotQueue

4 Makerbot MakerWare

F Jämförelse av 3D-skrivare

Tabell 8: Jämförelse av 3D-skrivare

3D-skrivare:	Huxley	RepRapPro Ormerod	Printbot Plus V2.1
Byggdata:			
3D-printmetod	FDM	FDM	FDM
Byggvolym	140 x 140 x 110 mm	200 x 200 x 200 mm	200 x 200 x 200 mm
Lagertjocklek	0,1 - 0,5 mm/lager	0,1 - 0,5 mm/lager	0,1 - 0,4 mm/lager
Bygghastighet	10-30 mm/s	10-30 mm/s	10-100 mm/s
Antal skrivhuvuden	1	1	02-jan
Max. temperatur	250 °C	250 °C	250 °C
Positionsnoggrannhet	0,0125 mm	-	-
Munstycke	0,5 mm	0,5 mm	0,4 mm
Byggplattform	Aluminium med uppvärmning	Aluminium med uppvärmning	Aluminium med uppvärmning
Löstagbar plattform	Ja (genom klämmor som håller en glasskiva)	Ja (genom klämmor som håller en glasskiva)	Nej
Materialdata:			
Materialdimension	1,75 mm diameter rundtråd	1,75 mm diameter rundtråd	1,75 mm diameter rundtråd
Materialtyp	ABS, PLA, Nylon, med flera	ABS, PLA, Nylon, med flera	ABS, PLA, Nylon, med flera
Anslutningar			
Dataöverföring	USB-kabel (Micro-USB)	USB-kabel (Micro-USB)	USB-kabel (Micro-USB)
Minnesläsare	SD-kortläsare	Micro SD	Micro SD
Mjukvara:			
3D-printstyrprogram	Pronterface, Repetier	Pronterface, Repetier	Repetier, Simplify3D, Pronterface
Operativsystemstöd	Windows, Linux, Mac OS X	Windows, Linux, Mac OS X	Windows, Linux, Mac OS X
Filformat	STL	STL	STL
Maskindata:			
Maskinstorlek	260 x 280 x 280 mm (Längd x Djup x Höjd)	500 x 460 x 410 mm (Längd x Djup x Höjd)	483 x 381 x 381 mm (Längd x Djup x Höjd)
Vikt	2,8 kg	-	10,2 kg
Inbyggd LCD-panel	Nej	Nej	Ja
Chassi	Ramverk bestående av gängade stänger och plastelement	Aluminiumprofiler och plastelement	Laserutskuren plywood
Byggsats eller monterad	Byggsats	Byggsats	Byggsats/monterad
Svensk återförsäljare	Ja	Ja	Nej
Pris (Inkl moms)	ca 5 000 kr	ca 7 500 kr	ca 7 500-8 200 kr