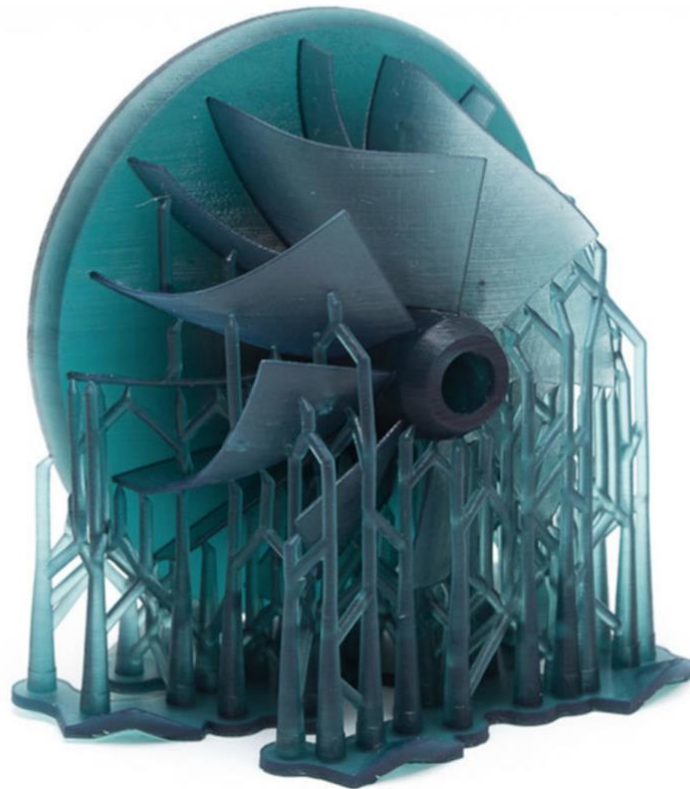




CHALMERS



Process för tillämpning av additiv tillverkning på Volvo Cars

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Erik Westin 19980204 - 4116

Oscar Abel 19960606 - 6190

Institutionen för industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

Process för tillämpning av additiv tillverkning på Volvo Cars

En studie för att identifiera när additiv tillverkning är en lämplig metod ur ett kostnadsperspektiv i en verifieringsfas

ERIK WESTIN
OSCAR ABEL

© Erik Westin och Oscar Abel

Handledare: Tunç Gümüş, Volvo Cars

Handledare: Lars Nyborg, Industri- och materialvetenskap

Examinator: Lars Nyborg, Industri- och materialvetenskap

Examensarbete IMSX20

Institutionen för Industri- och materialvetenskap

Chalmers University of Technology

SE- 412 96 Gothenburg

Tel: +46317721000

Omslagsbild: Komponent med stödmaterial tillverkad med tekniken vat photopolymerization. [5]

Abstract

This thesis study at Chalmers University of Technology is performed at the department of Mechanical Integration at Volvo Cars, Gothenburg. The purpose of the work is to develop an applied method for identifying when in time as additive manufacturing is a good tool from an economic perspective in a verification process. To achieve the goal of a well-functioning method based on well-founded facts, a deep dive into relevant manufacturing methods has been performed, from beginning to end.

Cost calculations for additive manufacturing have been analyzed together with the cost calculations that are currently used within Volvo Cars internally. These have been combined to obtain cost calculations that contain the most important parameters with the aim of generating a picture of the price that is comparable to the actual price. By highlighting the prominent parameters, a calculation is obtained that is user-friendly regardless of experience, the time required can therefore be minimized with the consequence that additional costs are minimized. An average personnel cost was then presented to demonstrate that it can be related to the price of additive manufacturing and thus get an indication of a time frame that is suitable for virtual verification. This was demonstrated by a calculation with the material PP and the SLS method on three different components obtained by Volvo Cars. The components have previously had central roles in verification processes where additive manufacturing has been the final solution to the verification process intended.

In addition to this, proposals for solutions that simplify the process of additive manufacturing have also been developed, following information on problems obtained after dialogue with employees at Volvo Cars. The solutions presented are based on simplifying the process with the consequence that additive manufacturing will become a more attractive and natural tool in the future.

The results obtained clearly illustrate what powerful tool additive manufacturing can be if it is used in the right way at the right time. Utilizing additive manufacturing can minimize both costs and precious time.

Sammanfattning

Examensarbetet genomfördes vid Institutionen för industri- och materialvetenskap, Chalmers tekniska högskola och avdelningen Mechanical Integration på Volvo Cars Göteborg. Arbetets syfte har varit att ta fram en metod för att identifiera när i tiden som additiv tillverkning är ett bra hjälpmedel ur ett ekonomiskt perspektiv i en verifieringsfas vid produktutveckling. För att nå målet med en väl fungerande metod baserad på väl grundade fakta har en djupdykning i relevanta tillverkningsmetoder utförts, från början till slut.

En kostnadskalkyl för additiv tillverkning har tagits fram och analyserats tillsammans med de kostnadskalkyler som idag nyttjas inom Volvo Cars internt. Dessa har kombinerats för att erhålla kostnadskalkyler som innehåller de viktigaste och största parametrarna med syfte att generera en prisbild som är jämförbar med det verkliga priset. Genom att lyfta de mest centrala parametrarna erhålls en kalkyl som är användarvänlig oavsett erfarenhet. Tidsåtgången kan då minimeras och därmed ytterligare kostnader kan elimineras. En genomsnittlig personalkostnad togs sedan fram för att påvisa att den kan sättas i relation till priset för additiv tillverkning och därmed få en indikation på en tidsram som är lämplig för virtuell verifiering. Detta påvisades med en beräkning med materialet polypropen (PP) och metoden selective laser sintering (SLS) för tre olika komponenter som erhållits av Volvo Cars. Komponenterna har tidigare varit centrala i verifieringsprocesser där just additiv tillverkning har varit den slutgiltiga lösningen i verifieringsarbetet.

Utöver detta har även förslag på lösningar som förenklar processen kring additiv tillverkning tagits fram, efter dialog med anställda på Volvo Cars. Lösningarna som presenteras baseras på möjligheten att förenkla processen med konsekvensen att additiv tillverkning ska bli ett mer attraktivt och naturligt hjälpmedel i framtiden.

Resultaten som erhållits belyser tydligt vilket hjälpmedel additiv tillverkning kan vara om tekniken används på rätt sätt vid rätt tidpunkt. Att utnyttja additiv tillverkning i produktutvecklingsprocessen kan minimera både kostnader och dyrbar tid.

INNEHÅLLSSIDOR

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte.....	7
1.3 Avgränsningar.....	7
1.4 Precisering av frågeställning.....	7
1.5 Disposition	8
2 Teoretisk referensram	9
2.1 Introduktion till additiv tillverkning (AM)	9
2.2 Dagens användning av AM och hur det fungerar	9
2.3 Utmaningar och fördelar med additiv tillverkning	11
2.3.1 Utmaningar.....	11
2.3.2 Fördelar	11
2.4 Additiva tillverkningstekniker.....	11
2.5 Fördjupning relevanta AM-tekniker för Volvo Cars.....	12
2.5.1 SLS- Selective Laser Sintering	12
2.5.2 FDM- Fused Deposition Modeling.....	13
2.5.3 SLA- Stereolithography	15
2.6 Riktlinjer för design av relevanta AM-tekniker på Volvo Cars.....	17
2.6.1 SLS- Selective Laser Sintering	17
2.6.2 FDM- Fused Deposition Modeling.....	18
2.6.3 SLA- Stereolithography	19
2.7 Efterbehandling av AM-komponenter som omfattar polymerer.....	20
2.7.1 Borttagning av stödmaterial.....	20
2.7.2 Ytbehandling.....	21
2.8 AM - Kostnader och ekonomi.....	22
2.8.1 Kostnadskalkyl för AM enligt Ruffo, Tuck & Hague	22
2.8.2 Kostnadskalkyl för SLS internt på Volvo Cars.....	23
2.8.3 Kostnadskalkyl för FDM internt på Volvo Cars.....	25
2.8.4 Formel personalkostnad för ingenjörsarbete.....	26
3 Metod och insamling av mätdata/statistik	27
3.1 Arbetsgång och datainsamling	27
3.2 Litteraturstudie.....	27
4 Resultat	28
4.1 Förslag på utökad kostnadskalkyl för SLS	28
4.2 Förslag på utökad kostnadskalkyl för FDM	29
4.3 Anställningskostnad.....	30
4.4 Komponenter med beslut om AM	31
4.4.1 Footwell area - Body structure part.....	31
4.4.2 VIU (Vehicle integration unit).....	33

4.4.3 Protection cover for vehicle computational unit	34
5 <i>Analys och diskussion</i>	36
5.1 Identifiering av lämplig metod samt förbättringar på befintlig metod	36
5.2 Analys & diskussion av resultat	37
5.3 Förslag på framtida visioner som möjliggör förenklad process kring AM.....	37
6. <i>Slutsats</i>	40
6.1 Frågeställning.....	40
6.2 Metod för grundande beslut i verifieringsfas.....	42
7 <i>Fortsatt arbete</i>.....	42
7.1 Motgångar	42

Indexlista

AM – Additiv tillverkning

CAD – Computer-aided design

CATIA – Computer Aided Threedimensional Interactive Application

FDM – Fused Deposition Modeling

PBF – Powder Bed Fusion

PA12 – Polyamid

PP – Polypropen

SLS – Selective Laser Sintering

SLA – Stereolithography

STL – Standard Tessellation Language

R&D – Research and Development

UV – Ultraviolet

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Under utvecklingsprocessen av en produkt använder sig Volvo Cars oftast av virtuella underlag när beslut ska fattas, till exempel modeller i datorprogrammet CATIA. Fördelarna med att använda sig av virtuella metoder är bland annat flexibiliteten och kostnadseffektiviteten. Det går också relativt fort och är billigt att ändra exempelvis design i en virtuell modell jämfört med en fysisk. Problemet är att det inte alltid är helt optimalt att ta beslut baserat på endast virtuella underlag. Därför har Volvo Cars på senare tid börjat använda sig av additiv tillverkning (AM) för att på så sätt få tillgång till en fysisk modell. Att tillverka modeller med hjälp av 3D-skrivare är en dyr process, därför måste det noga övervägas hur och när man ska använda sig av denna metod. Frågeställningen som arbetet behandlar beskriver hur AM ska integreras i produktutvecklingsprocessen för att företaget ska få ut nytta i form av tidsbesparing och därmed i slutändan ekonomisk vinning.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att ta fram en process för att identifiera i vilket stadie under en produktutvecklingsprocess som Volvo ska nyttja AM i stället för virtuell verifiering för att minimera slutgiltiga kostnaden. Målet med arbetet är att ta fram riktlinjer för när och hur Volvo Cars bör använda sig av AM för att minimera tidsåtgången och därmed kostnader i ett produktutvecklingsprojekt.

1.3 Avgränsningar

- Fokus på additiva tillverkningsmetoder/material som avdelningen Mechanical Integration vid Volvo Cars använder sig av internt: främst FDM och SLS, men i vissa fall SLA.
- Fokus på områden som avdelningen Mechanical Integration ansvarar för.
- Fokus på ett slutresultat som verifierar geometri och design.

1.4 Precisering av frågeställning

- Vilka additiva tillverkningsmetoder finns tillgängliga på dagens marknad?
- Vilka parametrar påverkar tidshorisonten för tillverkningsprocess och efterbearbetningsprocess vid användning av AM?
- Vilka parametrar i en AM-process påverkar den totala kostnaden mest på Volvo Cars?
- Hur används AM – verifiering, provning, prototyper och design?
- Vilka beslutsunderlag krävs för att besluta om en fysisk produkt tillverkad med AM är nödvändig och rekommendationer för hur detta bör ske och hur den ska användas?
- När är det lämpligt att ta fram 3D-modeller? I vilket skede ska detta göras? Hur "svåra" problem skall gälla? Behöver det ens vara ett problem? Kan historik trigga att 3D-modeller tas fram redan innan det finns ett problem?

1.5 Disposition

Kapitel 1 – Inledning

I kapitel 1 presenteras arbetet och en översiktlig bild av innehållet. Detta presenteras i form av en bakgrund och syfte som beskriver problemet som adresseras. Även en preciserad frågeställning till problemet med tillhörande avgränsningar redovisas.

Kapitel 2 – Teoretisk referensram

I kapitel 2 presenteras relevant teori. Här behandlas AM-metoder, efterbearbetningsprocesser samt ekonomiska faktorer. Detta görs för att läsaren ska få en översiktlig bild av metoderna som är relevanta för arbetet men också för att styrka resultat och diskussion.

Kapitel 3 – Metod

I kapitel 3 presenteras tillvägagångssättet för arbetet tillsammans med en litteraturstudie.

Kapitel 4 – Resultat

I kapitel 4 presenteras framtagna kostnadskalkyler samt beräkningar för tre olika komponenter. Dessa har tagits fram genom metoden som presenteras i kapitel 3.

Kapitel 5 – Analys & diskussion

I kapitel 5 analyseras och diskuteras resultaten som redovisats i kapitel 4. Här diskuteras även förslag som möjliggör en förenklad arbetsprocess för tillämpning av AM.

Kapitel 6 – Slutsats

I kapitel 6 dras slutsatser från arbetet. Frågeställningen besvaras och en metod för identifiering av vilken process som är lämplig presenteras baserad på resultat och diskussion.

Kapitel 7 – Fortsatt arbete

I kapitel 7 presenteras relevanta möjliga vägar att bygga vidare på från utfört arbete och motgångar i projektet diskuteras även.

2 Teoretisk referensram

I avsnittet teoretisk referensram presenteras relevant fakta och tidigare forskning som genererar en överblick inom området additiv tillverkning. Detta görs för att läsaren ska få en djupare förståelse för området som arbetet behandlar, men också för att styrka och hämta viktig information som är relevant till arbetets frågeställning.

2.1 Introduktion till additiv tillverkning (AM)

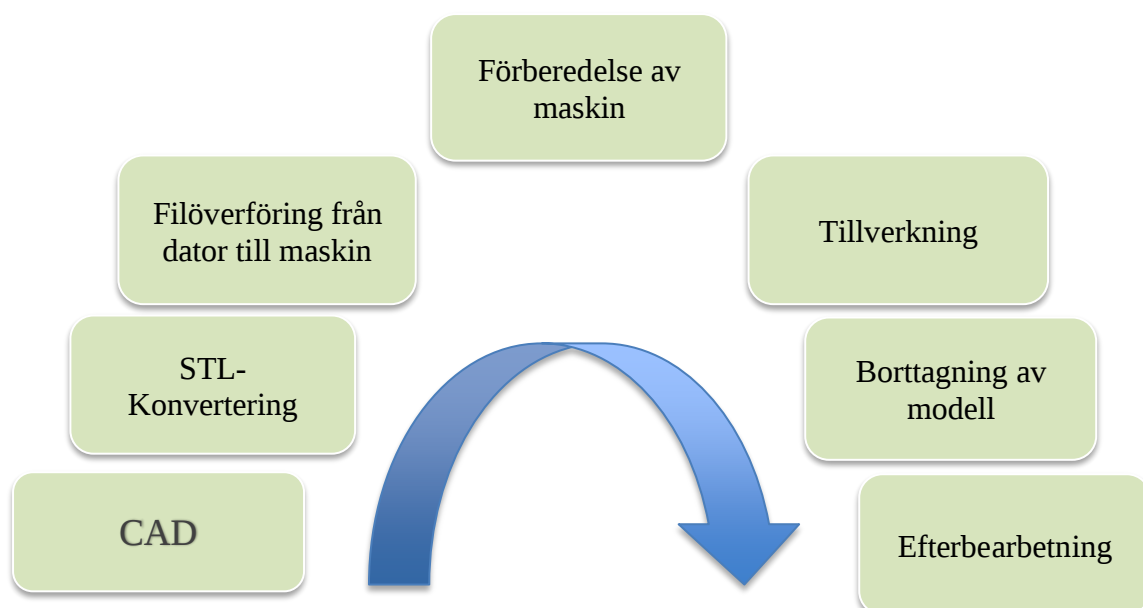
Additiv tillverkning är en metod som tillåter en generativ design från CAD att produceras utan några specifika verktyg eller former. Det bygger på att flertalet lager (XY-planet) av specifikt material byggs på varandra (Z-planet) för att skapa en produkt i tre dimensioner. Produkten kan i sin tur användas för funktionstestning, koncept eller som slutprodukt.

Additiv tillverkning anses idag vara en relativt ny teknik med stor utvecklingspotential men den första additiva tillverkningsmetoden utvecklades redan på 80-talet av en man vid namn Charles "Chuck" Hull [1]. Denna 3D-skrivarmetod byggde på laserteknologi med benämningen "stereolithography", mer känt som SLA. Denna metod används än idag men med årens gång har teknologin utvecklats och optimerats för dagens industri.

2.2 Dagens användning av AM och hur det fungerar

Tekniken för AM har nu kommit tillräckligt långt i utvecklingen för att kunna implementeras i industrin. Fördelarna gentemot de traditionella tillverkningsmetoderna är såpass stora att de nu attraherar större företag som till exempel Volvo Cars. Fördelarna med AM ligger i dess funktion. Tillverkningen sker genom en lager på lager-metod. Med denna förmåga går det att skapa mycket komplexa geometrier som andra tillverkningsmetoder inte kan generera.

Även om det finns många olika 3D-skrivare på marknaden som använder sig av varierande tekniker är processen från virtuell till fysisk modell den samma. Processkedjan kan delas upp i följande 7 steg. [1]



Figur 1. Illustration av processen från CAD-fil till färdig AM-komponent.

Steg 1: CAD

Första steget är att skapa ett virtuellt underlag av modellen i CAD. Den virtuella modellen måste redogöra för modellens fullständiga geometri. För att skapa en virtuell modell kan man använda sig av de flesta professionella CAD-program. Det fungerar även bra att använda tekniker som till exempel laser och optisk skanning för att den vägen skapa en digital modell för vald komponent.

Steg 2: STL-konvertering

Att kunna konvertera CAD-filen till en STL-fil alternativt annat lämpligt filformat är nödvändigt för att kunna få ut en färdig produkt. STL har blivit en standard som nästan alla 3D-skrivare idag accepterar. STL-filen beskriver de stängda ytorna med hjälp av ytelement i form av små trianglar i den ursprungliga CAD-modellen. Detta behövs för att kunna utföra beredningen av varje lager som ska skrivas ut. Ju högre upplösning det vill säga ju fler trianglar det är på STL-filen, desto högre precision kan 3D-skrivaren sedan tillämpa vid utskrift förutsatt att den har relevanta fysiska upplösningen i utskriften.

Steg 3: Filöverföring från dator till maskin

Nästa steg i processen är att skicka över STL-filen till en 3D-skrivare. Beroende på modell utav skrivare kan en bearbetning av filen utföras. Detta görs för att korrekt storlek, position och riktning ska resultera i en optimal utskrift.

Steg 4: Förberedelse av maskin

I detta steg ska skrivaren ställas in för att kunna utföra sin uppgift enligt önskemål. Beroende på modell utav skrivare justeras parametrar som materialbegränsning, energikälla, lagertjocklek och hastighet.

Steg 5: Tillverkning

När tillverkningen av modellen väl kommit igång går det mesta på automatik och ingen övervakning behövs. Endast en översiktlig kontroll av skrivaren behövs för att säkerställa materialtillgång, energitillgång och programvarufel.

Steg 6: Borttagning av modell

Här finns nu en färdig modell som ska plockas bort från skrivaren. Eftersom det i detta steg förekommer interaktion med skrivaren är det viktigt att tänka på sin egen säkerhet. Till exempel kan höga temperaturer skapas under processens gång som man måste beakta. Viktigt är också och se till att skrivarens rörliga delar är i sina utgångslägen och att ingen aktivitet pågår vid borttagning.

Steg 7: Efterbearbetning

Ofta kan det behövas viss typ av efterbearbetning av modellen. I de enklare fallen är det bara stödmaterial som behöver plockas bort från modellen. I mer avancerade fall fortsätter man processen med att till exempel slipa, borra, måla eller värmebehandla modellen. Beroende på kraven kan det slutgiltiga resultatet som önskas bli en mycket kostsam och tidskrävande process [2].

2.3 Utmaningar och fördelar med additiv tillverkning

Additiv tillverkning är en tillverkningsmetod som har många fördelar men också utmaningar jämfört med konventionella tillverkningsmetoder.

2.3.1 Utmaningar

- Ytfinhet – Beroende på krav från användare krävs det olika typer av efterbearbetning, detta kan bli en dyr process ifall kraven är högt ställda.
- Långsam tillverkningsprocess – Eftersom det tar relativt lång tid att tillverka en komponent med AM är produktion av stora volymer inte vanligt.
- Högt investeringskostnad – En 3D-skrivare avsedd för industrin kräver avancerad teknik och det resulterar i höga investeringskostnader.
- Begränsad byggvolym – 3D-skrivare har en begränsad yta att arbeta på, därför är storleken på komponenten begränsad av skrivarens kapacitet [1].

2.3.2 Fördelar

- Designfrihet – Konstruktören har god designfrihet, dvs metoden kan skapa mycket komplexa geometrier inom ramarna för storleksbegränsningen i maskinen.
- Få verktyg – Inga extra verktyg krävs vid själva byggprocessen, utan behövs enbart för efterbearbetning.
- Materialsnål – Metoden är mycket materialsnål eftersom bearbetning i form av att ta bort material inte existerar förutom borttagning av stödstrukturer eller justering av ytor, vilket resulterar i mycket lite spill/svinn.
- Optimering – AM är en mycket bra metod för optimering av en komponents egenskaper och vikt i de fall där detta medges på grund av designkrav [1].

2.4 Additiva tillverkningstekniker

Additiv tillverkning delas in i grupper baserat på grundläggande principer för tekniken, dvs i grupper där liknande maskinkoncept och material nyttjas. Det finns även AM-processer som är kapabla att nyttja olika typer av material som till exempel polymerer, metaller, keramer eller kompositer. De kan även nyttja olika energikällor som laser och infraröd strålning m.m. De olika AM-processerna delas därmed upp enligt ASTM i följande grupper:

1. Vat Photopolymerization (VPP) - Processer där material i form av flytande fotopolymerer förvaras i en behållare som sedan utsätts för energi i form av laser eller UV-ljus på specifika områden för att härda materialet i fråga med resultatet att få önskad form.
2. Powder Bed Fusion (PBF) - Processer där plaster eller metaller i form av pulver förvaras i en behållare som sedan sprids över specifikt område och sedan succesivt utsätts för en energikälla i form av laser eller elektronstråle.
3. Material Extrusion (MEX) - Processer där plasttråd smälts genom extrudering i ett munstycke, plasten portioneras ut på specifika platser, i olika lager, för att konstruera efterfrågad geometri.
4. Material Jetting (MJT) - Processer där ett munstycke droppar material vars struktur snabbt förändras i kontakt med ultraviolett strålning. Dropparna fördelas enligt önskad geometri och hårdas av energikällan.
5. Binder Jetting (BJT) - Processer där en bindande vätska fördelas på en pulverbädd vilket skapar en solid geometri, detta återupprepas lager på lager.
6. Sheet Lamination (SHL) - Processer där material byggs på och sedan skärs till önskad form av laser eller skarpa knivblad, denna process återupprepas till önskad geometri.
7. Directed Energy Deposition (DED) - Processer där en arm rör sig runt ett fixt objekt som skjuter ut material, oftast i tråd eller pulverform. Materialet smälts sedan med laser, elektronstråle eller plasma. Processen återupprepas till önskad geometri är utformad [3].

2.5 Fördjupning relevanta AM-tekniker för Volvo Cars

Detta avsnitt innefattar en fördjupning för de AM-metoder som avdelningen Mechanical Integration på Volvo Cars nyttjar samt de material som främst används vid verifiering av geometri och design.

2.5.1 SLS- Selective Laser Sintering

Selective laser sintering (SLS) ingår i gruppen Powder Bed Fusion och är en typ av AM-metod som använder sig av högenergilaser. Energin riktas mot ett råmaterial som då binder sig till fast form. Det vanligaste råmaterialet som används i SLS 3D-skrivare är pulver som oftast består av materialen polyamid(PA12), polypropen(PP) och Alumid. Polyamid är en polymer som kan vara en-kristallin, delkristallin eller amorf termoplast. Alumid är en blandning av polyamid och aluminium, detta material är en komposit som är styvare och tål högre temperaturer. Andra bearbetbara material är keramik, kolfiber och glas.

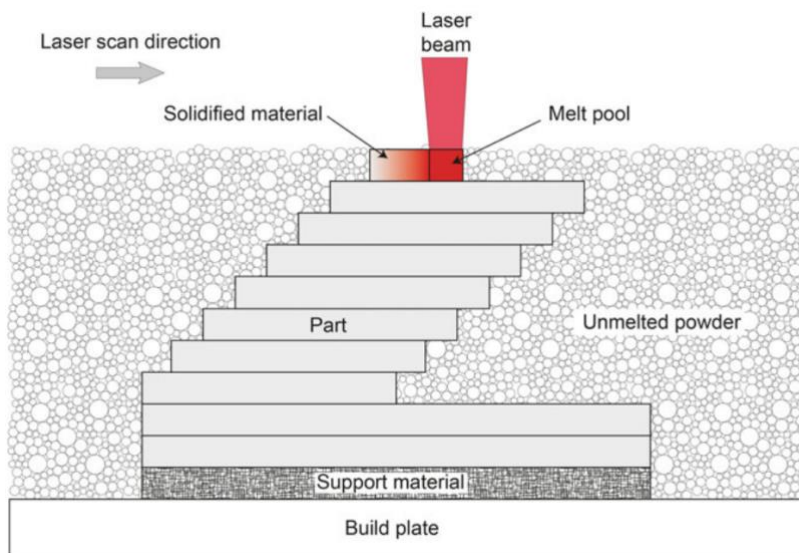
Ett SLS-system består av tre huvuddelar;

1. Ett datorstyrt kontrollsystem som omfattar en högpresterande dator, kontrollmoduler med pålitliga egenskaper, drivmotorenhet och ett antal olika sensorer. Med hjälp av en

mjukvara kan 3D-processen sedan utföras och kontrolleras i realtid

2. Huvudenheten består av sex grundenheter; en arbetscylinder, en pulvermatande cylinder, ett pulverläggningssystem, en galvanometer med laserskanningssystem, ett temperaturkontrollsystem och enheten där allting är inpackat.
3. Kylsystem: Kylsystemet är ett vattenbaserat system som med hjälp av en justerbar termostat reglerar temperaturen. Kylningen syftar till att lasern ska hållas vid en effektiv arbetstemperatur för att öka prestandan. Detta skyddar även lasern från överhettning och förlänger dess livslängd [4].

Metoden som SLS använder sig av bygger på att man skiktat en virtuell geometri och sedan med hjälp av hög energi, lager för lager, smälter samman små partiklar. Dessa lager har en tjocklek på 0,1–0,15 mm. Lasern har en inställd effekt för att smälta pulverbädden samt 0,02 mm ner i det föregående lagret, detta för att det nya lagret ska fästas ihop med det föregående. Efter varje bearbetat lager sänks pulverbädden ner och ett nytt pulverlager läggs ut med en recoater. Denna process återupprepas till produkten är klar. När själva tillverkningen är genomförd påbörjas en nerkylningsprocess som kan ta allt från en timma till över ett dygn. Produkten grävs sedan fram, överflödigt material blåstras bort och produkten kontrollmäts. En stor utmaning när man arbetar med SLS-tekniken är att energin från lasern måste hanteras med stor precision. Detta gäller eftersom temperaturen på materialet under tillverkningsprocessen har en stor inverkan på slutprodukten kvaliteten. För att snabba på processen värms pulverbädden upp till en temperatur strax under smälttemperaturen. Densiteten av de sammansmälta partiklarna avgörs av laserns effekt och inte exponeringstiden, därför är en SLS-skrivare oftast utrustad med en pulserande laser [4].



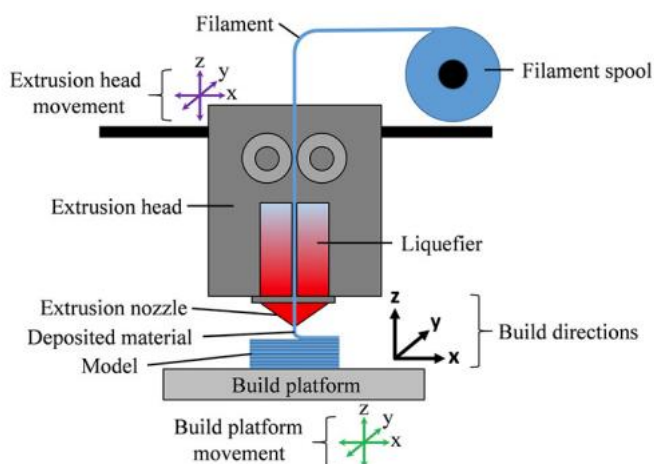
Figur 2. Illustration av tillverkningsmetoden SLS [5].

2.5.2 FDM- Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling (FDM) innefattas i gruppen Material extrusion, den är en av de vanligaste metoderna för AM idag, främst för prototypverifiering men också för industriella produkter. Termoplast nyttjas som byggmaterial i processen FDM, materialet sänds via ett skrivarhuvud där de smälts för att sedan extruderas genom ett munstycke på aktuell skrivaryta. Materialet appliceras i form av halvsmälta trådar enligt önskad geometri, materialet stelnar i takt med att de svalnar. Därefter bygger man på med nästa lager och fullföljer samma process tills man byggt önskad geometri i tre dimensioner. FDM har blivit en mycket populär process eftersom den anses var mycket enkel att använda samtidigt som den är relativt billig och miljövänlig jämfört med andra typer av AM-processer. [6]

I en FDM-skrivare rör sig extruderingshuvudet, eller fundamentplattformen i x, y och z-riktning, men det finns även de som nyttjar en kombination av dessa rörelseförmågor. Oftast rör sig extruderingshuvudet i dessa fall i x och y-riktning samtidigt som fundamentplattformen rör sig i z-riktning. Då geometrin blir komplex eller är designad med överhängande partier krävs det stödmaterial, dessa kan byggas på med samma material som huvudprodukten byggs i. Det finns även de FDM-skrivare som har ytterligare ett munstycke för att bygga stödstrukturen i ett annat material med syftet att förenkla efterbearbetningsprocessen. Detta material är ofta lösningsbart för att minska påverkan på huvudprodukten. [7]

I processen FDM nyttjas många olika typer av termoplaster, främst Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) och Polyactic Acid (PLA) men också Polycarbonate (PC), Polyether Ether Ketone (PEEK), nylon eller andra kompositer. ABS är en oljebaserad copolymer dvs en polymer som är sammansatt av flera typer av monomerer. Acrylonitrile förbättrar produktens resistens mot högre temperaturer, Butadiene bidrar till en starkare slagstyrka samtidigt som Styrene bidrar till hög styvhet. Dessa ämnen bidrar till att modeller producerade av materialet ABS har breda applikationsområden då de generellt har god värmeresistens, kemikalieresistens och påverkas ytterst lite av fukt. Polyactic Acid (PLA) är en typ av polymer som är biologiskt nedbrytbar, materialet framställs genom en kemisk reaktion där änden på polymerkedjan sammanfogas med cykliska monomerer för att bilda långa kedjor, så kallad ringöppningspolymerisation av mjölksyra. Mjölksyran framställs genom fermentering av socker. PLA är generellt hårdare än ABS, däremot är materialet relativt sprött vilket begränsar användningsområdet [6].

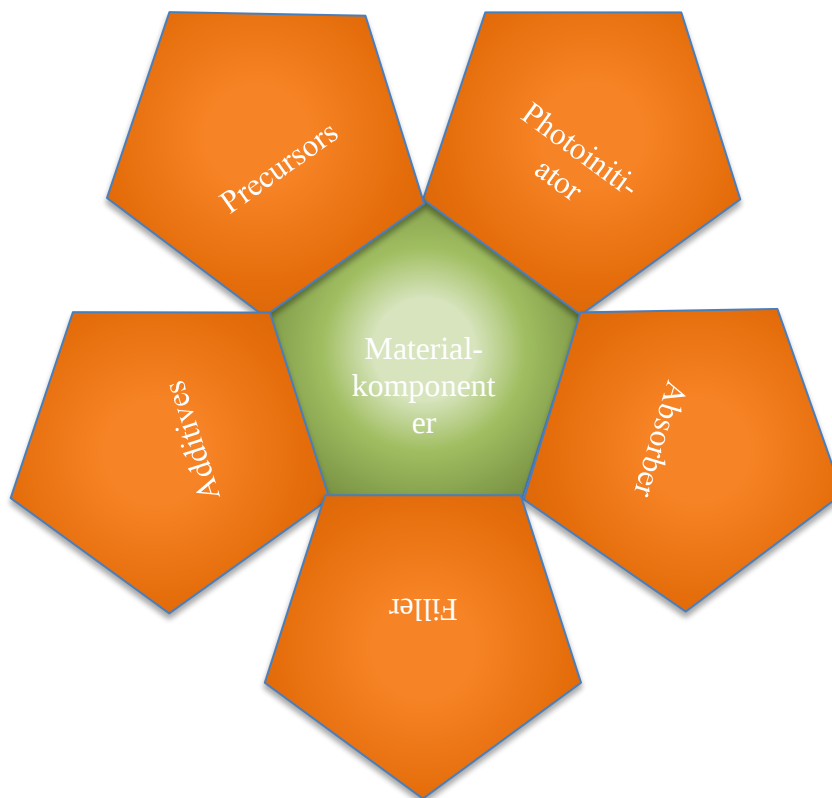


Figur 3. Illustration av tillverkningsmetoden FDM [7].

2.5.3 SLA- Stereolithography

Stereolitografi (SLA) innefattas i gruppen Vat Photopolymerization, metoden bygger på att material i form av vätska utsätts för ultraviolett strålning vilket medför att materialet polymeriseras- och därmed blir solitt. Processen återupprepas lager efter lager till önskad geometri är uppbyggd. Strålningen siktar mot en reglerbar fotoinitiator, denna riktar till korrekt vinkel så att laserstrålen reflekteras mot önskat område för att uppnå den kemiska polymerisationsreaktionen, dvs då materialet härddas och hårdnar. Efter detta appliceras ytterligare ett lager film som utsätts för samma process vilket resulterar efter återupprepning i en fullskalig tredimensionell geometri. Strålen kan appliceras på två olika sätt, vanligtast ovanifrån, men den kan också appliceras underifrån genom en transparent behållare. Denna bestrålning kan nyttjas på olika vis, laser-SLA där man skannar varenda punkt av specificerat tvärsnitt med laser, digital ljusbehandling (DLP) vilken bygger på att man projicerar hela geometrin på materialsiktet. Ytterligare en metod finns, men är något ovanligare jämfört med de tidigare nämnda, den bygger på belysning genom en LCD-skärm.

Komponenterna som innefattas i det ljushärdbara materialet syns i *figur 4*. Fotoinitiator (PI) vilken är den komponent som reagerar mot aktuell ljuskälla. Då materialet utsätts för en korrekt våglängd initierar PI härdningsreaktionen. En annan komponent som ofta innefattas är en så kallad absorber, den absorberar ljusstillförseln och begränsar ljuset från att nå redan bearbetade lager. Detta blir extra viktigt då geometrin är komplex eftersom man vill förhindra att de redan behandlade materialet härddas ytterligare. Den vanligaste absorbern som nyttjas i SLA processer för att binda ultraviolett strålning är bensotriazol. Filler beskriver tillsatser som blandas med det flytande materialet för att uppnå specifika egenskaper hos den slutgiltiga produkten. Detta sker främst i pulverform och kan handla om metaller, keramer eller kompositer m.m. Additiv är tillsatser som stabiliserar materialet och förhindrar potentiella negativa effekter som kan uppstå under en tillverkningsprocess. Till exempel kan det behövas tillsatser i materialet för att öka stabiliteten då en skrivar-process är långvarig. Precursors är molekyler i vätskeform som kan polymeriseras, dvs kopplas tillsammans efter utsättning av en ljuskälla. Beroende på den slutgiltiga produktens applikationsområde nyttjas en variation av olika monomerer och oligomerer. I SLA-processer nyttjas vanligen akrylatbaserade hartser, detta med anledning av att de genererar god reaktivitet hos materialet och därmed är gynnsamt för att uppnå högre bygghastigheter. Det är möjligt att modifiera materialets mekaniska egenskaper eller värmebeständighet genom att ändra typ av akrylat, till exempel genom att nyttja ändringen i oligomerer som uretanakrylat. Av dessa anledningar är akrylatbaserade hartser i många avseenden väldigt fördelaktiga, men nackdelen med dessa är att de har en förmåga att utsättas för krympning under skrivar-processen. Detta går dock i viss mån att motverka genom att tillsätta metakrylater. En annan utmaning är att akrylatbaserade hartser är känsliga mot syre vilket krävs då syre hjälper polymerisationsreaktionen. [8]

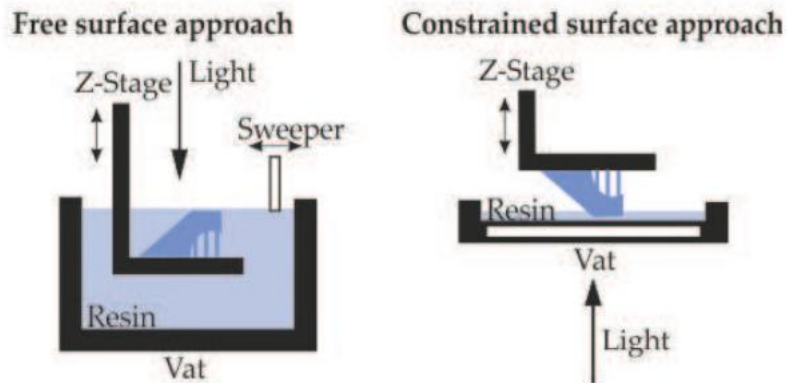


Figur 4. Komponenter som förekommer i material lämpat för SLA. [8]

Ett alternativ till akrylbaserade hartser är epoxibaserade hartser, vilka har en annan härdningsmekanism. Dessa har en sämre reaktionsförmåga, vilket leder till att det krävs längre härdning och därmed längre byggtid, dock fås ökad stabilitet mot syre och epoxibaserade hartser utsätts inte i samma grad som akrylbaserade hartser för krympning. Då båda varianterna har fördelar har man idag tagit fram så kallade hybridsystem, som i de flesta SLA-system idag är standard. Hybridsystemen kombinerar båda hartserna vilket resulterar i snabb härdning i kombination med mindre krympning. Andra polymera material kan även nyttjas i SLA-processer för att uppnå specifika materialegenskaper som till exempel silikon produkten ska vara elastisk. Dock bör det tas i beaktande att polymerer har en förmåga att påverkas negativt av termiska påfrestningar, därav bör man utreda om materialvalet passar för applikationen där den färdiga produkten ska nyttjas. Det är även möjligt att skapa keramiska produkter med hjälp av stereolitografi, där polymeren avlägsnas genom pyrolys och keramen sintras till slutlig form och täthet. Fördelen med detta är att komplexa geometrier är möjliga att tillverka samtidigt som slutmaterialet är beständigt mot höga temperaturer, vilket leder till att det kan nyttjas för värmeisolatorer.

Då den additiva tillverkningen är slutförd så krävs oftast en efterbearbetningsprocess. Komplexa geometrier kräver ofta stödstrukturer vid den additiva processen för att förankra modellen så att önskad geometri behålls. Detta innebär att dessa i efterhand behöver skäras bort. Produkten behöver ofta slipas därefter och eventuellt rengöras med lämpliga lösningsmedel. Beroende på produkt kan det krävas att den behöver efterhärddas i en UV-kammare. Orsaken till detta är att slutföra polymerisationsreaktionen för att optimera de mekaniska egenskaperna.

SLA-processen är en mycket flexibel metod med breda applikationsområden. Den nyttjas i stor utsträckning inom flyg och fordonsindustrin då metoden är mycket tidseffektiv samtidigt som den kan skriva mycket högpresterande material genom modifiering av materialets ingående komponenter [8].



Figur 5. Illustrationer av principerna för tillverkningsmetoden SLA vid användning av härdningskälla i två olika riktningar [8].

2.6 Riktlinjer för design av relevanta AM-tekniker på Volvo Cars

2.6.1 SLS- Selective Laser Sintering

En fördel med SLS-tekniken är att det går att producera skräddarsydda produkter med avancerad komplexitet. Det behövs inte heller printas några stödstrukturer under tillverkningen eftersom komponenten hålls på plats av pulvret som ligger runt om. Detta betyder att designern har större designfrihet. Jämför man tekniken med till exempel SLA(stereolitografi) är det en snabbare teknik, men för att kunna konkurrera med ytfinhet så behöver en SLS-komponent efterbearbetning i högre grad. Nackdelar med SLS är att det endast finns en handfull olika polymerpulver som kan användas för SLS och nästan alla utgår ifrån polyamid 12 (PA12). Detta ska jämföras med traditionella tillverkningsmetoder som till exempel formsprutning och strängsprutning där det finns tusentals olika kombinationer av flera grundläggande polymerer. Detta bidrar till att det finns ett visst motstånd inom många branscher att investera allt för mycket i SLS-tekniken. Produkter tillverkade med metoden SLS är ofta anisotropa, dvs de har olika egenskaper i olika riktningar. Detta blir tydligt för geometrier under 25 mm² i vertikal riktning, produkten kommer ha sämre egenskaper i Z-riktningen jämfört med X- och Y-riktningarna. Designern måste ta detta i beaktande då en produkt ska tillverkas med metoden SLS, element som kommer utsättas för höga spänningar bör byggas i horisontell riktning för att öka hållfastheten.

Likt Material extrusion varierar noggrannheten och toleranser för gruppen Powder Bed Fusion mycket. Faktorer som påverkar dessa är geometrins komplexitet och utskriftorientering samtidigt som det finns variationer beroende på system och maskin. För att säkerställa betydelsen av dessa differenser bör ett test göras på aktuell maskin för att verifiera om maskinen uppfyller tillverkningen för den slutgiltiga produktens krav [5].

Layer thickness	0.1 mm (0.005 in.)
Accuracy	$\pm 0.3\%$ lower limit of ± 0.3 mm (0.010 in.)
Tolerance	± 0.25 mm (0.010 in.) or ± 0.0015 mm/mm (0.0015 in./in.)—whichever is greater
Smallest feature size	Around 0.5 mm (0.04 in.)

Tabell 1. Maskinprestanda för gruppen Powder bed fusion. Värdena är generella för kvalitativa industriella maskiner [5].

Vanligtvis blandas nytt pulver tillsammans med återvunnet pulver. Förhållandet varierar från 20/80 till 35/65 räknat i volymandelar. Material som inte härdats vid en körning kan återanvändas till en viss grad. Efter flera körningar tenderar gammalt pulver att bidra till missfärgningar och mindre gropar i produkten. Att återanvända och återvinna materialet är avgörande för att metoden ska vara konkurrenskraftig ur ett ekonomiskt perspektiv [5].

2.6.2 FDM- Fused Deposition Modeling

Metoden FDM är en AM-process som nyttjar trådliknande material som pressas ut genom ett munstycke som nämnts tidigare. Främst nyttjas termoplaster i denna process. Vanligen krävs också stödstrukturer vid överhängande geometrier för att den slutgiltiga produkten ska bibehålla tänkt form. Stödmaterialet varierar, det kan vara samma material som huvudprodukten men det går även att använda andra material för att förenkla efterbearbetningsprocessen. Beroende på syftet av den slutgiltiga produkten kan man skapa en kompakt solid geometri eller en geometri som inifrån stöds med regler eller ställningar. Detta val kan påverka materialåtgången samt vikten men också hållfastheten. Hållfastheten påverkas i olika utsträckning beroende på riktningen av de byggda materialet i förhållande till den pålagda kraften som den slutgiltiga produkten ska utsättas för.

Noggrannheten och toleranser för gruppen Material extrusion varierar mycket. Faktorer som påverkar dessa är geometrins komplexitet och utskriftorientering samtidigt som det varierar beroende på system och maskin. För att säkerställa dessa faktorer bör ett test göras på aktuell maskin för att verifiera om maskinen uppfyller den slutgiltiga produktens krav.

Layer thickness	0.1–0.3 mm (0.005–0.013 in.)
Accuracy	± 0.1 or ± 0.03 mm per 25 mm (± 0.005 in. or ± 0.0015 in. per inch), whichever is greater
Tolerance	Reality rule of thumb for Material Extrusion: typically 0.25 mm (0.01 in.)
Smallest feature size	Around 1 mm (0.04 in.)

Tabell 2. Maskinprestanda för gruppen material extrusion. Värdena är generella för kvalitativa industriella maskiner [5].

Tjockleken på varje lager av material bör tänkas igenom beroende på geometri, då detta kan påverka ytfinheten på produkten. Om den tänkta produkten har spetsiga eller trubbiga vinklar alternativt runda kanter så kommer detta val påverka ytfinheten tydligt, däremot om produkten enbart ska bestå av räta vinklar är inte detta lika viktigt. Anledningen till att detta har en sådan stor inverkan på ytfinheten beror på att det bildas större trappsteg med tjockare lager vilket illustreras i *figurerna 6 och 7*.



Figur 6. Trappstegseffekten med tunna lager.



Figur 7. Trappstegseffekten med breda lager.

Beroende på syftet med produkten bör man därför ta lagertjockleken i beaktande då man väljer att 3D-printa sin produkt. Ur ett kostnadsperspektiv bör också tjockleken tas i beaktande eftersom byggtiden ökar då tunnare lager appliceras. Generellt kan man säga att bygget i *figur 6* tar tre gånger så lång tid jämfört med bygget i *figur 7* [5].

2.6.3 SLA- Stereolithography

Tidigare nämnt så nyttjar metoden SLA en ultraviolett stråle som riktas mot byggmaterialet som i denna metod är i form av vätska. Detta medför att materialet under den utsatta ytan härdar. SLA tenderar att ha en upplösning enligt följande. I XY-planet varierar diametern på laserstrålen mellan 50-200 μm . Detta resulterar i att metoden inte är lämplig om tänkt geometri ska innehålla strukturelement som är mindre än denna variation. I Z-planet är upplösningen mellan 25-200 μm beroende på önskad lagertjocklek. Som andra metoder så går lagertjockleken hand i hand med tidsåtgång samt kvalitet. Tunnare lager innebär längre byggtid vilket resulterar i en större kostnad per part, dock blir ytfinheten väsentligt bättre.

Då byggmaterialet utsätts för strålning underifrån, dvs då den härdade produkten dras ut uppifrån från vätskebadet så bör man bygga produkten i en vinkel i förhållande till byggplattan. Detta blir extra viktigt om geometrin har ett stort tvärsnitt, för att minimera att produkten ska utsättas för krafter som är för höga. Då det inte är möjligt att minimera tvärsnittet i förhållande till byggplattan så krävs ofta mycket stödmaterial. Detta kan betyda att SLA inte längre är lämplig metod ur ett kostnadsperspektiv alternativt att ytfinheten inte längre kan upprätthålla de ställda kraven för komponentens användningsområde. Sammanfattat så bör den horisontella ytan minimeras då en produkt designas för tillverkning med SLA.

Då geometrin är utformad med överhängande delar krävs stödstrukturer i olika omfattningar. Detta gäller då vätskan som omsluter de härdade delarna inte är tillräckligt trögflytande för att hålla dessa på plats under härdningsperioden. Vanligtvis är processen för att addera stödstrukturer automatiserad, dock kan dessa tillföras manuellt för att undvika stödstruktur på strukturelement som kräver fin ytfinhet.

SLA är en av få metoder som erbjuder en helt isotrop produkt. Detta beror på materialets förmåga att polymeriseras och härdas. Detta leder till att en produkt som är tillverkad med SLA har samma egenskaper i alla riktningar oberoende på om produkten har tillverkats vertikalt, horisontellt eller med en vinkel i förhållande till byggplattan.

Beroende på användningsområde kan ett alternativ med denna metod vara att skapa ihåliga produkter, vilket medför att materialåtgången och tidsåtgången minskar och resulterar i en mindre kostnad per part. Då denna metod nyttjas är det rekommenderat att skalet har en tjocklek på minst 2 mm för att inte riskera att produkten går sönder under tillverkningsprocessen. Det krävs även att man skapar någon form av dränering i geometrin

för att tillåta vätskan som inte härdas i mitten att rinna ut. Om detta inte görs kan tryckskillnaden bidra till skador [5].

2.7 Efterbehandling av AM-komponenter som omfattar polymerer

Alla additiva tillverkningstekniker kräver någon form av efterbehandling för att få fram delar som är redo att användas. Efterbehandling omfattar allt från borttagning av stödmaterial, förfining av ytfinhet, lackering och applicering av skydd mot potentiella kemiska påfrestningar. Inom AM-branschen finns det en enorm mängd av kunskap om efterbearbetning men mycket lite av detta är dokumenterat och tillgängligt för alla att ta del av. Detta resulterar i att företag på egen hand ofta måste testa sig fram och utveckla egna efterbehandlingsmetoder vilket kostar både pengar och dyrbar tid. I detta kapitel kommer flera olika efterbehandlingsmetoder gås igenom och förklaras.

2.7.1 Borttagning av stödmaterial

2.7.1.1 Powder bed fusion

Denna teknik är en av få tekniker där stödmaterial appliceras naturlig på grund av att processen ser ut som den gör. Eftersom ett homogent lager med pulver kontinuerligt matas ut över hela bädden fungerar det osmälta pulvret som inte utsätts för energistrålen som stöd. När processen är färdig och temperaturen sjunkit grävs produkten fram ur pulverkakan. Detta görs enklast genom efterföljande blästring, dvs att man under högt tryck blåser med ett slipande material, oftast sand. Här är det viktigt att hålla avstånd till komponenterna då det annars kan bildas brännmärken. En relativt enkel metod för att undvika detta är att ersätta sanden med polyamidpulvret som man använder i själva skrivaren, det kommer endast ta lite längre tid eftersom materialet är mindre slipande än sand. Ett annat problem kan vara att det är svårt att få ut pulvret ur långa smala rör eftersom det packas ihop under utskrivningsprocessen. En lösning på detta är att lämna små hål längs med röret, då är det enkelt att avlägsna pulvret i röret med en tryckluftpistol. [5]

2.7.1.2 Material extrusion

Det finns tre olika metoder för användning av stödmaterial när man använder sig av material extrusion.

- Den första metoden går ut på att man använder sig av samma material till stödstrukturen som man använder till komponenten. Stödstrukturen appliceras till komponenten med punktkontakt och har även lägre densitet. Borttagning av dessa stödstrukturer är mekanisk och sker med hjälp utav handverktyg.
- Den andra metoden är mycket lik den första, skillnaden är att man använder sig av ett annat material än själva komponenten.
- Den tredje metoden går ut på att stödstrukturen byggs med ett material som går att lösa upp med ett vätskebaserat lösningsmedel. Detta är en metod som kan ta flera timmar om det finns stödmaterial i långa smala rör, eftersom lösningsmedlet då bara kan lösa upp lite i taget. Denna metod lämpar sig bäst för komponenter som har ömtåliga detaljer som riskeras att skadas vid användning av verktyg [5].

2.7.1.3 Vat Photopolymerization

Denna teknik använder samma material för stödstrukturen som används för den utskrivna delen. Stödstrukturen byggs upp likt ett träd där trädgrenarna genom punktkontakt fäster sig i komponenten. För borttagning av stödmaterialet används handverktyg. När man använder denna teknik krävs det oftast att komponenten efter utskrift härdas i en UV-ugn eller att den utsätts för solljus. Det rekommenderas att stödmaterialet avlägsnas innan härdningsprocessen därför att det är svårare att utföra när materialet härdats [5].

2.7.2 Ytbehandling

2.7.2.1 Ångutjämning

Ångbehandling är ett sätt att göra ytan slät med hjälp av ett lösningsmedel. Lösningsmedlet kan bestå av till exempel aceton eller kloroform beroende på vilket material som används i AM-processen. Genom att värma upp lösningsmedlet bildas ånga som långsamt börjar lösa upp yttre skikt av polymeren. Denna metod kan vid korrekt inställda parametrar ge ett resultat liknande en formsprutad del. Metoden kan utföras genom att hänga komponenten i ett slutet utrymme med lösningsmedel i botten. Att tillföra värme kommer att påskynda processen kraftigt. Tiden för ångbehandling kan variera mycket och det är svårt att sätta någon exakt tid, det bästa sättet är att testa sig fram eftersom geometri och kvaliteten på materialet spelar stor roll. Att tänka på vid denna behandling är att de yttre dimensionerna kan påverkas om endast marginellt, ångorna är även hälsofarliga så man bör vara försiktig vid användning av dessa. Fördelen med att använda ångutjämning jämfört med att doppa komponenten i lösningsmedel är att det kommer ge ett mer konsekvent resultat. Komponenterna kan även suga upp en del av lösningsmedlet när man doppar den i detta vilket medför att processen kan fortsätta flera minuter efter avslutad behandling [5].

2.7.2.2 Trumling

Att trumla komponenter är en typ av behandlingsprocess som används för att bland annat torka, avkalka, rengöra och polera. Metoden är lämplig på de flesta AM-tekniker och fungerar på så sätt att komponenter placeras i trumlare som sedan roteras eller vibreras. Trumlaren fylls även med någon form av slipmedel och kan antingen vara en torr eller våt process. Processen tar mellan 3–6 timmar beroende på vilket typ av slipmedel som används. Eftersom trumlandet är en slipande process kan dimensionerna påverkas och skarpa hörn kommer att rundas något. [5]

2.7.2.3 Målning

Processen för målning är liknande hos alla typer av AM och är en av de vanligaste ytbehandlingarna. Processen går till på nästan samma sätt som hos andra former av målning. Oftast börjar man med ett relativt grovt sandpapper för att gradvis gå mot finare och finare. Sedan appliceras så många lager med slipfärg som är nödvändigt för att få en slät yta, mellan varje lager behöver man även slipa lite till. När ytan är fin nog är det slutligen dags att lägga på önskad färg vilket även också kräver ett antal lager. Detta följs sedan av några lager klarlack för att skydda komponenten och ge den önskad nivå av glans [5].

2.7.2.4 Blästring

Denna process går ut på att med ett högt tryck spruta sand eller något annat material på en komponent. Syftet kan vara att göra en grov yta slätare, grova upp en slät yta eller ta bort ytföroreningar. När det gäller AM används denna metod ofta för powder bed fusion i syfte att få bort material som har fastnat på komponentens yta. Sandblästring är en slipande process, därför bör man inte komma för nära munstycket då det kan uppstå brännskador på komponenten. Sanden kan i vissa fall ersättas med återvunnen polyamid, risken för brännskador minskar då men det kommer att ta längre tid att uppnå önskat resultat [5].

2.7.2.5 Maskinbearbetning

I de fall där det krävs hög kvalitet på komponentens ytfinhet eller stor noggrannhet på dimensionerna brukar maskinbearbetning vara den enda metoden att använda för att uppnå detta. Processen går till på samma sätt som för andra polymerbearbetningsprocesser men man bör anta en större försiktighet och lägre bearbetningshastighet då additivt tillverkade komponenter kan ha en viss svaghet mellan skikten så kallat anisotropi [5].

2.8 AM - Kostnader och ekonomi

För att kunna identifiera vilken metod som är bäst lämpad i en verifieringsprocess ur ett kostnadsperspektiv krävs ekvationer med relevanta ingående parametrar mellan de olika metoderna. Ekvationer nedan beskriver kostnad för en produkt tillverkad med AM samt en ekvation för kostnad av ingenjörarbete per arbetsvecka. Kostnaden mäts i enheten kostnad per vecka eftersom Volvo Cars menar på att verifiering med mänsklig insats ofta tar flertalet veckor, den kan enkelt modifieras för att erhålla ett bra tidsintervall. Dessa ekvationer tillsammans med tidigare statistik (tidsåtgång för verifiering) kan jämföras för att identifiera vilken metod som lämpar sig bäst för aktuell identifiering.

2.8.1 Kostnadskalkyl för AM enligt Ruffo, Tuck & Hague

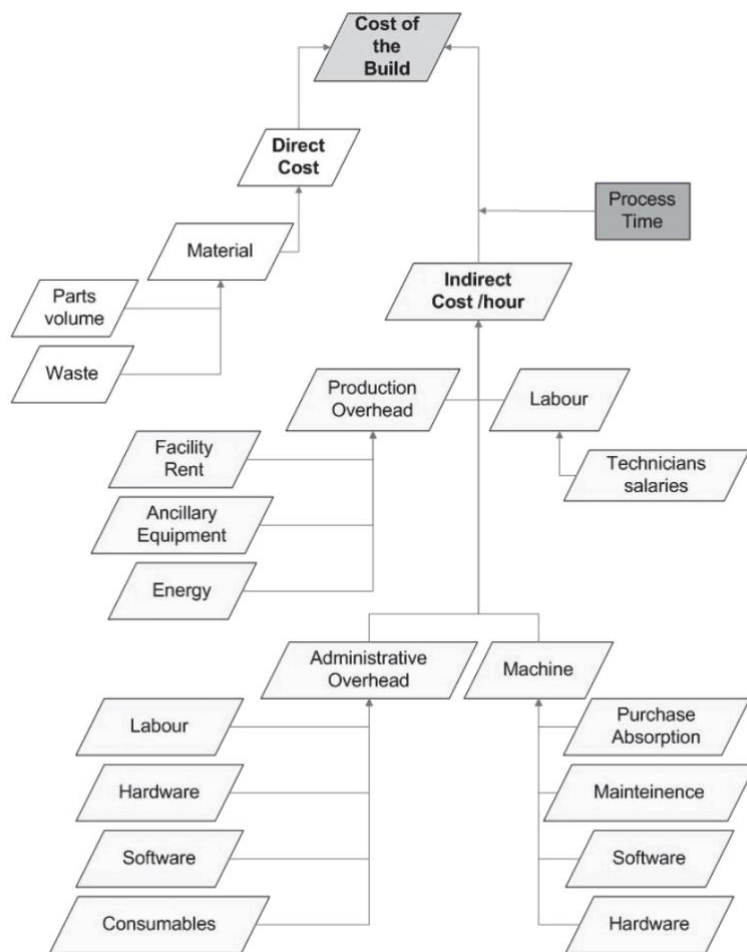
Kostnaden $Cost_B$ beskriver den totala kostnaden för en additivt tillverkad produkt, denna kostnad är summan av indirekta kostnader i samband med tiden för tillverkningen (t_B) tillsammans med direkta kostnader i samband med material som brukas under tillverkningen (m_B).

$$Cost_B = Cost(t_B) + Cost(m_B)$$

$$Cost(m_B) = \frac{\text{Direct Cost}}{\text{Mass unit}} m_B$$

$$Cost(t_B) = \frac{\sum \text{Indirect Costs}}{\text{Working time}} t_B$$

Tiden (t_B) syftar till hur lång tid maskinen i fråga arbetar och materialet (m_B) är ett index för råmaterialet som förbrukas [9].



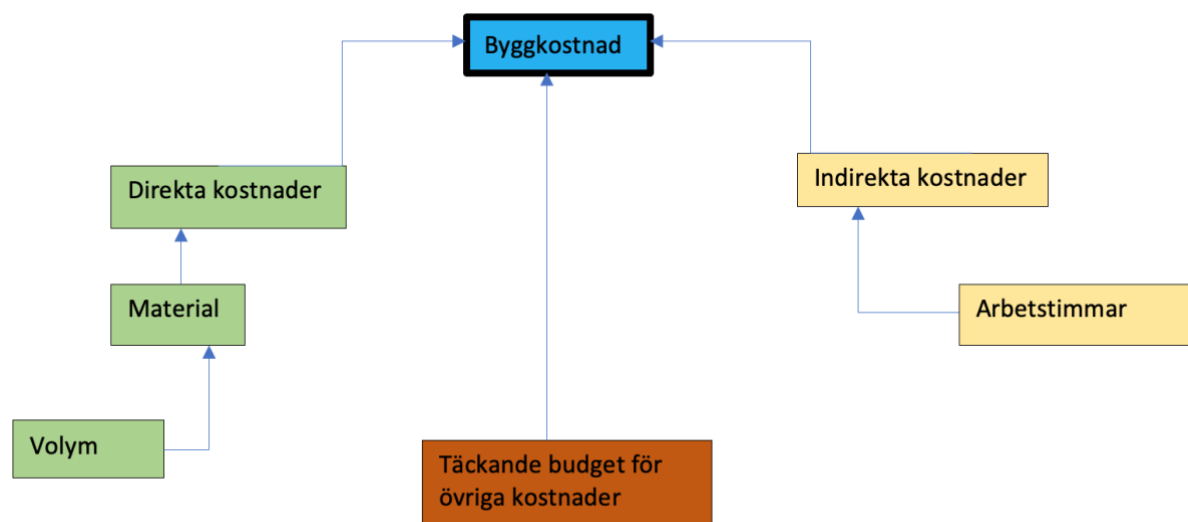
Figur 8. Kostnads kalkyl för additiv tillverkning [9].

Figuren illustrerar hur kostnader för en additivt tillverkad produkt kan brytas ned i direkta kostnader samt indirekta kostnader enligt Ruffo, Tuck och Hague [9]. Dessa benas sedan ut i underkategorier för att enklare identifiera underliggande kostnader. Observera att dessa inte definitivt är alla kostnader, utan endast en idé. Till exempel kan ett företag äga maskiner och faciliteter och därmed betalas inte en hyra.

2.8.2 Kostnads kalkyl för SLS internt på Volvo Cars

Värden framtagna här gäller för metoden SLS inom Volvo Cars. Underlaget baseras på information som hämtats från Concept Center vilka tillhandahåller AM på Volvo Cars.

Efter dialog med Concept Center har information om hur internt additivt tillverkade produkter debiteras. För avdelningar inom Volvo Cars som till exempel Mechanical Integration finns en standardiserad kostnads kalkyl för debitering. För att göra det enkelt för varje avdelning att beräkna kostnaden behöver de endast ta hänsyn till materialkostnader per volymenhet när det gäller direkta kostnader. För indirekta kostnader räknas endast AM-operatörens arbetstimmar in i kalkylen. Övriga kostnader som till exempel faciliteter och underhåll av maskiner debiteras inte av kunden utan täcks av en överliggande budget. Detta illustreras i figur 9 nedan. Tabell 3-5 visar data för kostnadsmodelleringen.



Figur 9. Nuvarande kostnadskalkyl för additivt tillverkad produkt med metoden SLS på Volvo Cars.

MATERIALDATA				
Material	Utnyttjandegrad %	Densitet	Pris/gram	Vinstmarginal
PA12	23%	0,93	0,55 kr	20%
PP	80%	0,85	1,35 kr	20%
PA12GF	13%	1,22	0,53 kr	20%
FLEX	13%	0,95	0,84 kr	20%

Tabell 3. Materialdata för olika relevanta material användbara i metoden SLS. Värden hämtade från Volvo Cars AM-center.

MATERIALKOSTNAD	
Pris per gram	1,35 kr
Densitet	0,85
Utnyttjandegrad	80,00%
Materialkostnad per gram	1,69 kr
Materialkostnad per mm ³	0,0014344 kr

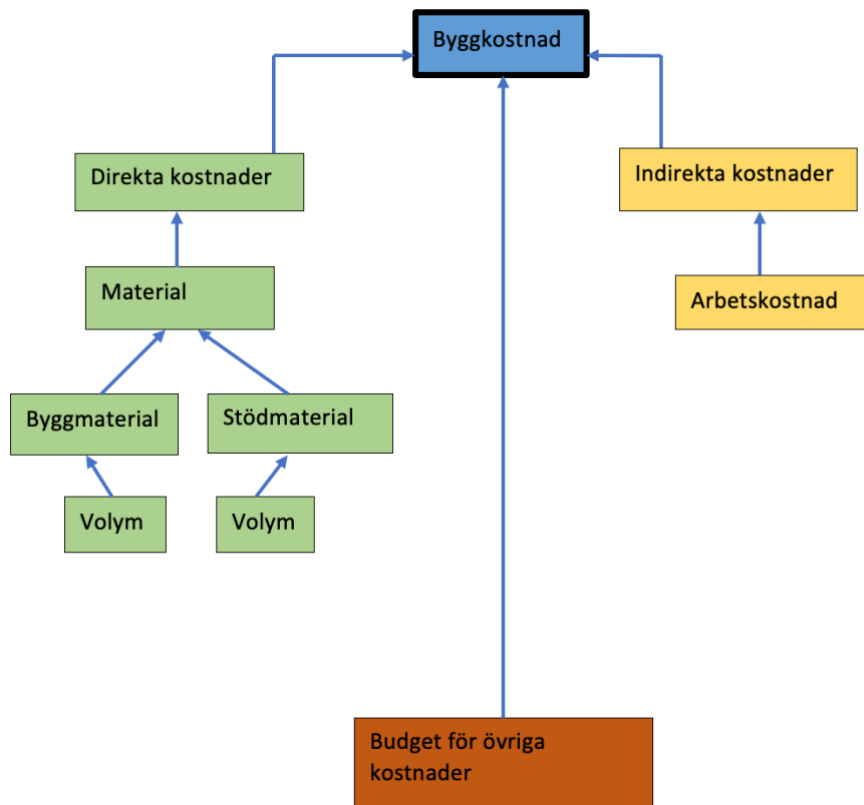
Tabell 4. Materialkostnad/mm³ för materialet PP. Värden hämtade från Volvo Cars AM-center.

Arbetskostnad	
Timkostnad personal	380,00 kr
Arbetstimmar per år per anställd	2080
Antal anställda	2,9
Printade detaljer per år mm ³	1457258651
Arbetskostnad per mm ³	0,00 kr
Arbetskostnad per mm ³	0,001573 kr

Tabell 5. Genomsnittlig arbetskostnad/mm³ för en AM-operatör. Värden hämtade från Volvo Cars AM-center.

2.8.3 Kostnadskalkyl för FDM internt på Volvo Cars

Kostnadskalkyl och materialdata för metoden FDM är hämtad från anställda på Concept Center som tillhandahåller AM på Volvo Cars internt. Efter dialog med AM-center har information inhämtats om hur internt additivt tillverkade produkter debiteras. För avdelningar inom Volvo Cars som till exempel Mechanical Integration finns en standardiserad kostnadskalkyl för debitering. För att göra det enkelt för varje avdelning att beräkna kostnaden behöver de endast ta hänsyn till materialkostnader per volymenhet när det gäller direkta kostnader, detta i form av byggmaterial och stödmaterial för metoden FDM. För indirekta kostnader räknas endast AM-operatörens arbetstimmar in i kalkylen. Övriga kostnader som till exempel faciliteter och underhåll av maskiner debiteras inte av kunden utan täcks av en överliggande budget. Detta illustreras i *figur 10* nedan:



Figur 10. Nuvarande kostnadskalkyl för additivt tillverkad produkt med metoden FDM på Volvo Cars.

Materialdata hämtade från AM-center för metoden FDM beräknas materialkostnader enligt data nedan i tabell 6 och för arbetskostnad på 380 kr/h enligt tabell 6, generellt räknas en timma per bygge. Dock kan dessa kostnader öka vid specifika fall beroende på komplexitet och efterbearbetning.

Beställt		Antal	Sort	Pris
FDM ABS (mtrl+stöd+maskin+tid)(använd kg) pris/gr	3,06 kr	1	gram	3,06 kr
FDM PC (mtrl+stöd+maskin+tid)(använd kg) pris/gr	3,26 kr	1	gram	3,26 kr
FDM ASA (mtrl+stöd+maskin+tid)(använd kg) pris/gr	3,26 kr	1	gram	3,26 kr
FDM Ultem (mtrl+stöd+maskin+tid)(använd kg) pris/g	5,40 kr	1	gram	5,40 kr
FDM Nylon (mtrl+stöd+maskin+tid)(använd kg) pris/g	3,00 kr	1	gram	3,00 kr
FDM Tillverkning fast kostnad per uppdrag 380r/st (ar	380,00 kr	1	styck	380,00 kr

Tabell 6. Illustrerar materialdata samt tillverkningskostnad användbara för metoden FDM. Värden hämtade från Volvo Cars AM-center.

2.8.4 Formel personalkostnad för ingenjörsarbete

Formeln visar kostnaden för en anställd per vecka.

$$Cost = \frac{(L + S_L)x}{52} + \frac{F + S}{52}$$

Där:

$$L = \text{Lön/år}$$

$$S_L = \text{Semesterlön/år}$$

$$x = \text{Aktuell procentsats}$$

$$F = \text{Försäkringskostnad/år}$$

$$S = \text{Särskild löneskatt/år}$$

Aktuell procentsats för lönekostnadstillägg uppgår till:

- Född efter 1955=31,42%.
- Född 1938-1954=10,21%.
- Född 1937 eller tidigare=0%.
- 15-18 år lön < 25000 SEK/mån=10,21%,
- 15-18 år lön > 25000 SEK/mån=31,42%. [10]

3 Metod och insamling av mätdata/statistik

3.1 Arbetsgång och datainsamling

Efter diskussioner med avdelningen Mechanical Integration på Volvo Cars fastslogs syftet med rapporten och sedan avgränsningar. Därefter fördes en dialog mellan handledare Lars Nyborg, avdelningen Mechanical Integration samt examensarbetets författare Oscar Abel och Erik Westin för att fastställa en rimlig frågeställning. En plan i form av ett Gantt-schema sattes upp och själva arbetet påbörjades därefter.

Förstudier gjordes för att ta fram arbetets avgränsningar, dvs additiva tillverkningsmetoder som Volvo Cars utnyttjar internt. Detta gjordes för att skaffa en djupare förståelse inom området AM och vilka parametrar som medför kostnader vid användning av metoderna. Relevanta formler för att identifiera kostnader för additivt tillverkade produkter samt personalkostnader togs sedan fram.

För att få en överblick över den additiva tillverkningen på Volvo Cars, till exempel hur integrerat tillämpningen är i utvecklingsprocessen, hur frekvent tekniken används och hur effektiviteten upplevs intervjuades anställda med olika roller och uppgifter inom Volvo Cars. Arbetet har innefattat studiebesök och löpande kontakt med operatörer på Volvo Cars Concept Center där AM-center ingår. Avdelningen ansvarar för alla beställningar av 3D-modeller, från mottagen beställning till färdig utskrift och ansvarar även för att 3D-skrivarna underhålls och utnyttjas så effektivt som möjligt. Arbetet har även innefattat kontakt med ingenjörer som arbetar på Mechanical Integration. Detta har givit ett underlag hur den additiva tillverkningen upplevs, både vad som är bra och förslag på förbättringar. Projekt där AM blivit en del i produktutvecklingsprocessen har presenterats och information har inhämtats om vad som kan vara den utlösande faktorn till att en 3D-modell skapas och hur processen kring den additiva tillverkningen har upplevts.

Utgående från teoretisk referensram i kombination med information och erfarenheter som tillförskaffats efter dialog med anställda på Volvo Cars togs beslutet att kombinera Ruffo, Tuck och Hague's kostnadskalkyl med Volvo Cars interna kostnadskalkyl för debitering. Detta då Volvo Cars eftersöker en kostnadskalkyl som är enkel och snabb att genomföra för att undvika längre tidsåtgång och därmed större kostnader. Detta gjordes genom att noga avväga vilka parametrar som är viktigast för att erhålla en mer rättvisande prisidé för en additivt tillverkad produkt.

Efter konstruktion av ny kostnadskalkyl beräknades totala byggkostnaden för tre olika komponenter vars volym var känd (materialet PP, metod SLS). Dessa kostnader illustrerades i diagram tillsammans med en genomsnittlig ingenjörskostnad per vecka eller per timma på Volvo Cars. Detta för att identifiera när i tiden som AM är en kostnadseffektiv process att utnyttja.

3.2 Litteraturstudie

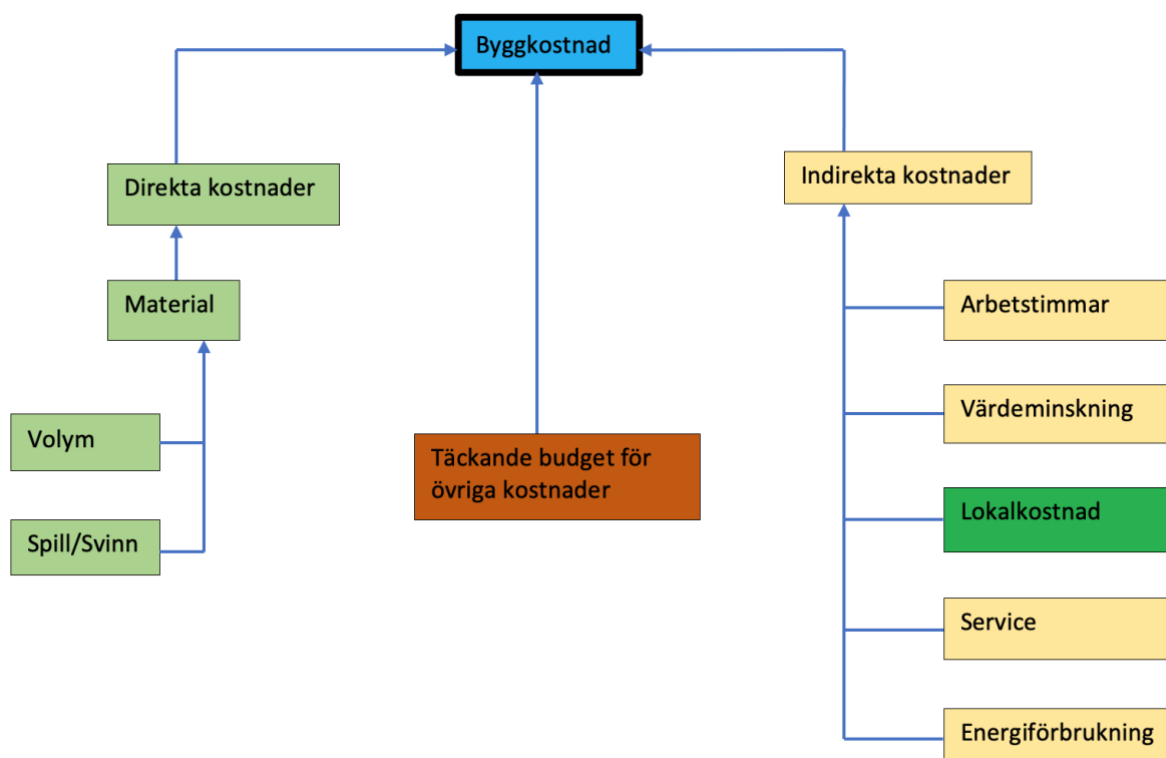
Litteraturstudien gjordes genom att via internet söka efter vetenskapliga artiklar och E-böcker på Chalmers universitetsdatabas publicerade senast 2021-05-15. För att hitta artiklar med relevant information användes i huvudsak sökordet "additive manufacturing". För att få fram lite mer specifika artiklar adderades ett tilläggsord som till exempel "additive manufacturing

SLS”, ”additive manufacturing SLA”, ”additive manufacturing FDM”, ”additive manufacturing economics”, ”additive manufacturing cost”. Även svenska sökord användes i form av ”Additiv tillverkning” men gav en mindre mängd resultat.

4 Resultat

4.1 Förslag på utökad kostnadskalkyl för SLS

Kostnadsmodellen som idag utnyttjas på Volvo Cars för SLS anser vi vara något minimalistisk och missvisande. Ej insatta medarbetare runt om på Volvo Cars olika avdelningar får en felaktig bild av den totala kostnaden för additivt tillverkade produkter. Därav har en ny kostnadskalkyl arbetats fram som är en rimlig mineralisering av Ruffo, Tuck och Hague’s kostnadskalkyl [9]. Detta genom att ha med de mest vitala och viktigaste parametrarna för att undvika misstolkningar som kan leda till att AM utnyttjas vid fel tillfällen.



Figur 11. Utökad kostnadskalkyl med relevanta parametrar för en god prisbild med metoden SLS.

Värdeminskning, service och energiförbrukning är det som är adderats till Volvo Cars kostnadskalkyl. Lokalkostnad är även med, dock är inte detta en kostnad som debiteras internt utan enbart för externa kunder. Värden för respektive kategori är hämtat från Volvos AM-center. Utökade kostnader presenteras nedan och omvandlas till enheten kr/mm^3 .

Värdeminskning: Avskrivning på maskinen beräknas på 10 år och det genomsnittliga inköspriset för en SLS-maskin är 9 000 000 kr.

Lokalkostnad: För de lokaler Volvo Cars själva äger behöver de interna avdelningarna ej betala någon hyra. Lokalkostnad för externa kunder uppgår till 1100kr/kvm/år.

Servicekostnad: Genomsnittligt 5% per år på investerat maskinbelopp.

Energiförbrukning: 20 000 kr/år (genomsnitt för AM på Volvo).

Värdeminskning per volymenhet

$$\frac{\left(\frac{\text{Inköpspris[kr]}}{\text{Avskrivningstid[år]}} \right)}{\text{Printvolym} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{år}} \right]} = \frac{\left(\frac{9\,000\,000}{10} \right)}{1\,457\,258\,651} = 0,0006175 \text{ kr/mm}^3$$

Maskinservicekostnad per volymenhet

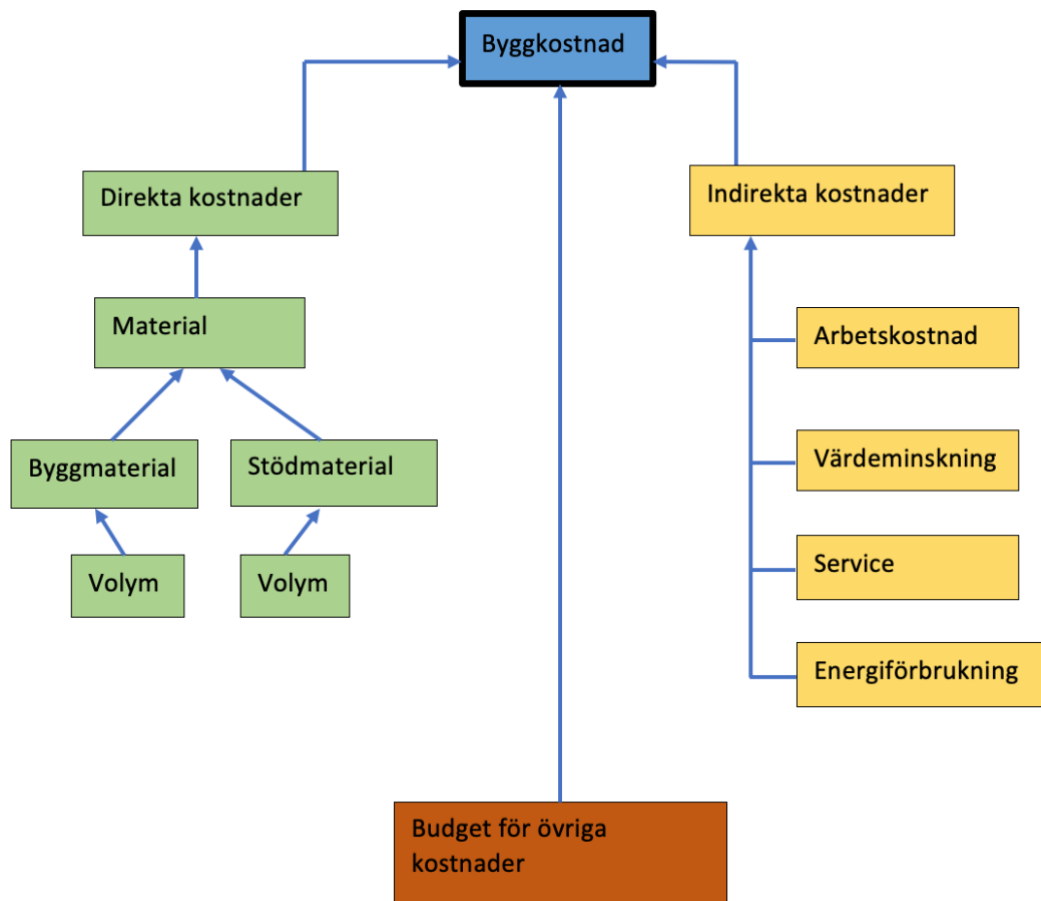
$$\frac{(\text{Inköpspris[kr]} * \text{Servicekostnad[5\%]})}{\text{Printvolym} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{år}} \right]} = \frac{(9\,000\,000 * 0,05)}{1\,457\,258\,651} = 0,000308 \text{ kr/mm}^3$$

Energikostnad per volymenhet

$$\frac{\text{Energikostnad} \left[\frac{\text{kr}}{\text{år}} \right]}{\text{Printvolym} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{år}} \right]} = \frac{20\,000}{1\,457\,258\,651} = 0,000013724 \text{ kr/mm}^3$$

4.2 Förslag på utökad kostnadskalkyl för FDM

Likt kostnadskalkylen för SLS har en utökad kostnadskalkyl för metoden FDM tagits fram. Detta för att erhålla ett verkligt pris och undvika missvisande prisbild och därmed undvika att använda additiv tillverkning vid fel tillfälle. De utökade kostnaderna kan beräknas på samma vis som utförts för metoden SLS ovan.



Figur 12. Utökad kostnadskalkyl med relevanta parametrar för en god prisbild med metoden FDM.

4.3 Anställningskostnad

Formeln nedan kan användas för att beräkna anställningskostnad per person per vecka, formeln är användbar då det är känt vilka personer som arbetar i ett projekt dvs då variablerna är kända.

$$Cost = \frac{(L + S_L)x}{52} + \frac{F + S}{52}$$

Där:

$L = \text{Lön/år}$

$S_L = \text{Semesterlön/år}$

$x = \text{Aktuell procentsats}$

$F = \text{Försäkringskostnad/år}$

$S = \text{Särskild löneskatt/år}$

Aktuell procentsats för lönekostnadstillägg uppgår till:

- Född efter 1955=31,42%.
- Född 1938-1954=10,21%.
- Född 1937 eller tidigare=0%.
- 15-18 år lön<25000 kr/mån=10,21%, lön>25000 kr/mån=31,42%.

Då Volvo Cars inte har brutit ner anställningskostnaderna likt den standard som formeln anger kan vi inte redovisa exakta siffror för varje del i ekvationen. Vi har däremot fått information av Volvo Cars som redovisar för den genomsnittliga lönekostnaden hos en tillsvidareanställd tjänsteman på avdelningen Research & Development. Snittlönen är 52000 SEK/månad, för att inkludera arbetsgivaravgifter och övriga kostnader i beräkningen multipliceras snittlönen sedan med 1,5 enligt Volvo Cars. Beräkningsgången lyder följande:

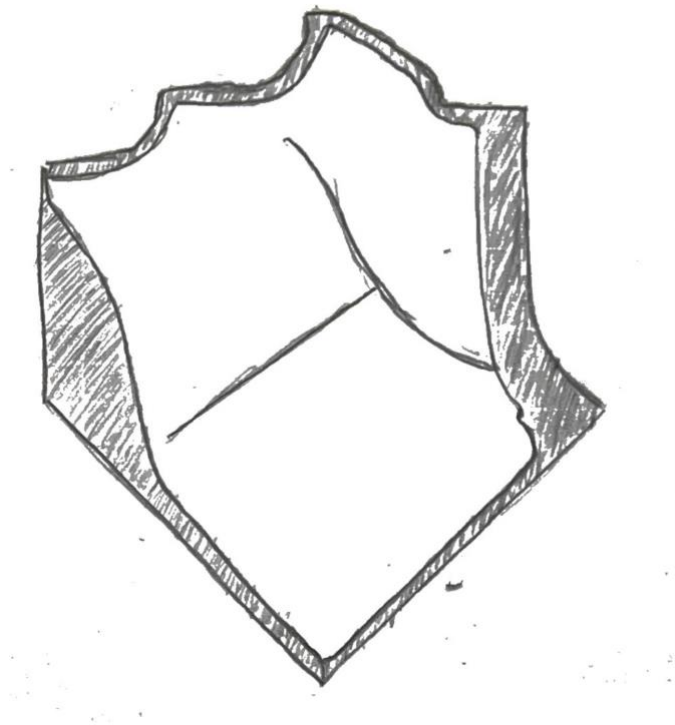
$$52\,000 * 1,5 = 78\,000 \text{ kr}$$

4.4 Komponenter med beslut om AM

Komponenterna som presenteras nedan är verkliga exempel som efter en längre period av försök att verifiera med hjälp av virtuella underlag, har resulterat i ett beslut om en additivt tillverkad produkt. Eftersom detta avser pågående projekt som lyder under strikt sekretess kan de ursprungliga CAD-filerna inte visas i arbetet. därför har rekonstruktioner av filerna skapats för hand med färre detaljer. Dessa rekonstruktioner ansågs vara rimliga för arbetet utan att försämra innehållet då detaljer spelar mindre roll. Det som krävs är en känd volym.

Totala byggkostnaderna som presenteras nedan är beräknade med utökad kostnadskalkyl för SLS. Kostnaderna stämmer förutsatt att komponenten byggs internt i materialet PP med metoden SLS. Dessa kostnader jämförs i diagram med kostnader för en ingenjör med en genomsnittlig totalkostnad på 78000 kr/person/månad dvs 19500 kr/person/vecka eller 487,5 kr/person/timme. Detta ger en bild av i vilket skede som AM är en relevant metod att utnyttja.

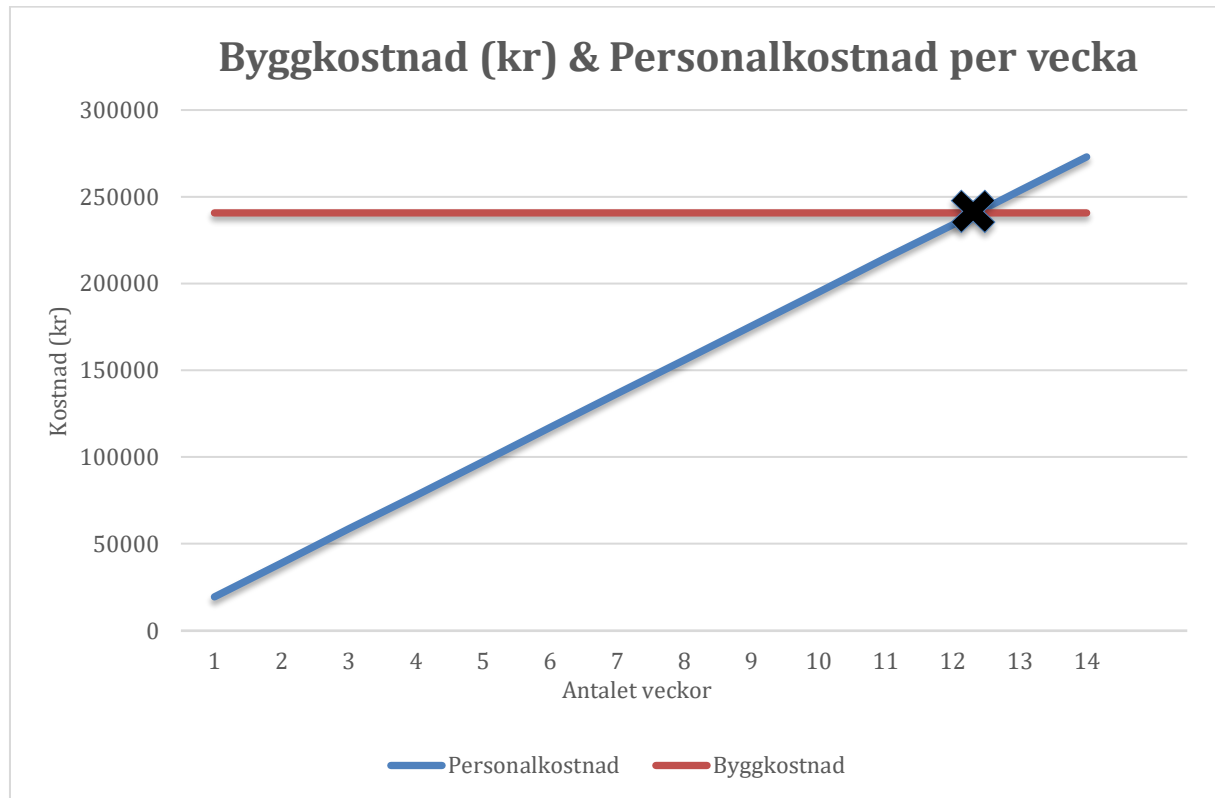
4.4.1 Footwell area - Body structure part



Figur 13. Figuren illustrerar en mycket förenklad (pga. sekretess) skiss av "footwell area" i en bil där sent beslut om additiv tillverkning tagits.

Volym: 61 000 000 mm³

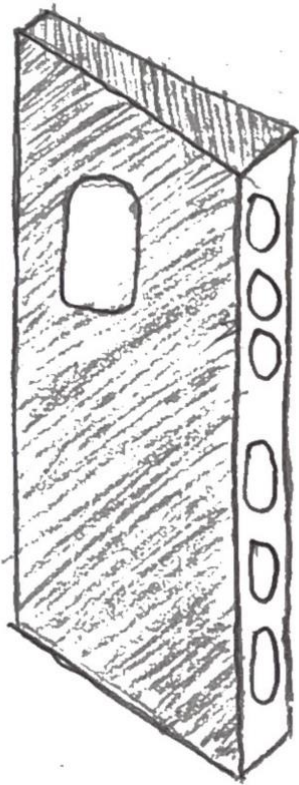
$$\begin{aligned} & \text{Total byggkostnad} \\ &= (0,0014344 + 0,001573 + 0,0006175 + 0,000308 + 0,0000137244) \\ & \quad * 61000000 = 240744 \text{ kr} \end{aligned}$$



Figur 14. Diagram som visar brytpunkten mellan kostnader för att additivt tillverka komponent "Footwell area" samt personalkostnad/person/vecka.

I diagrammet i *figur 14* kan personalkostnader tydligt jämföras mot vad det kostar att additivt tillverka komponenten. Här har grunden för analysen varit kostnaden för en ingenjör och då ser man att byggkostnaden är ekvivalent med ca tre månaders effektivt arbete. Förutsätter vi att det är tre ingenjörer som arbetar med processen/problemet på fulltid skulle det endast ta en månad innan kostnaderna är uppe i samma belopp som komponenten kostar att tillverka additivt. I detta fall tog processen sex månader innan det beslutades om att AM skulle tillämpas vilket betyder att i teorin hade kostnaderna kunnat reducerats kraftigt om ett beslut om AM hade tagits tidigare i processen. Anledningarna till att processer kan bli utdragna är många och komplexa. Dessa orsaker behandlas i avsnittet för analys och diskussion.

4.4.2 VIU (Vehicle integration unit)

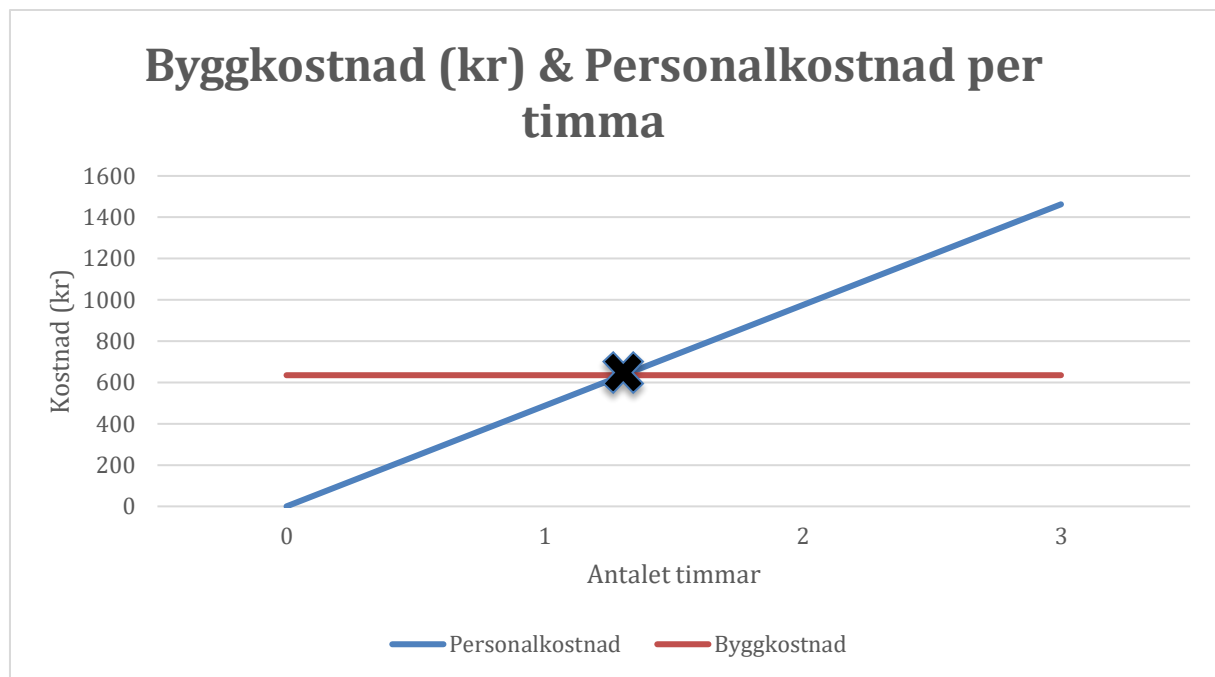


Figur 15. Illustration av mycket förenklad (pga. sekretess) skiss av ” Vehicle integration unit” i en bil där sent beslut om additiv tillverkning tagits.

Volym: 161 000 mm³

Total byggkostnad

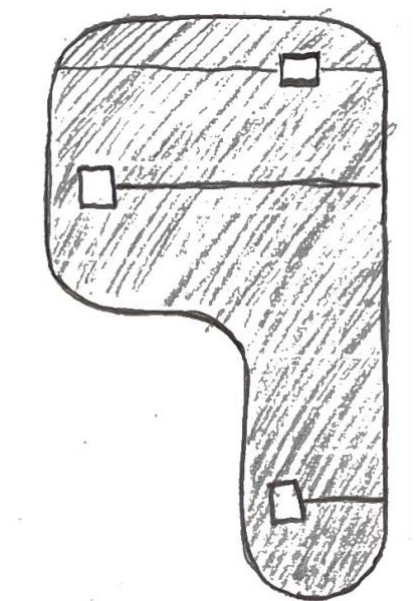
$$\begin{aligned} &= (0,0014344 + 0,001573 + 0,0006175 + 0,000308 + 0,0000137244) \\ &* 161000 = 635 \text{ kr} \end{aligned}$$



figur 16. Diagram som illustrerar brytpunkten mellan kostnader för att additivt tillverka komponent "Vehicle integration unit" samt personalkostnad/person/timma.

Diagrammet i figur 16 illustrerar kostnaden för att additivt tillverka komponenten ovan, samt personalkostnad per timma. Brytpunkten finnes på ca 1,33 h, dvs det är lönt att virtuellt verifiera problemet inom den tidsramen. Därefter är AM den bäst lämpade metoden. Teamet på Mechanical Integration ägnade ungefär en månad till att försöka verifiera problemet med denna komponent innan beslutet om AM togs. Denna tidsåtgång och därmed kostnader hade kunnat minimeras avsevärt om beslutet hade tagits i ett tidigare skede.

4.4.3 Protection cover for vehicle computational unit

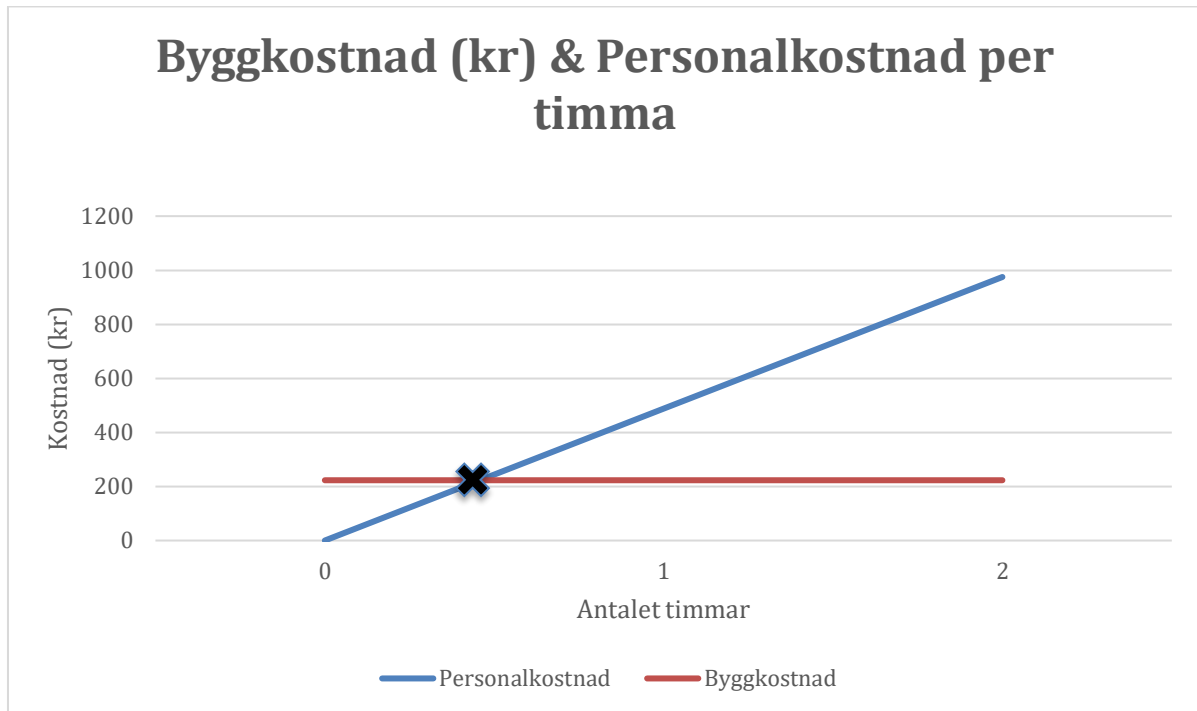


Figur 17. Illustration av mycket förenklad (pga. sekretess) skiss av "Protection cover" i en bil där sent beslut om additiv tillverkning tagits.

Volym: 56 440 mm³

Total byggkostnad

$$= (0,0014344 + 0,001573 + 0,0006175 + 0,000308 + 0,0000137244) \\ * 56440 = 223 \text{ kr}$$



Figur 18. Diagram som illustrerar brytpunkten mellan kostnader för att additivt tillverka komponent "Protection cover" samt personalkostnad/person/timma.

Diagrammet i *figur 18* illustrerar kostnaden för att additivt tillverka komponenten ovan, samt personalkostnad per timma. Brytpunkten finns vid ca 0,4 h, dvs det är lönt att virtuellt verifiera problemet inom den tidsramen. Därefter är AM den bäst lämpade metoden. Teamet på Mechanical Integration ägnade ungefär 1,5 månad till att försöka verifiera problemet med denna komponent innan beslutet om AM togs. Denna tidsåtgång och därmed kostnader hade kunnat minimeras avsevärt om beslutet hade tagits i ett tidigare skede.

5 Analys och diskussion

5.1 Identifiering av lämplig metod samt förbättringar på befintlig metod

För att identifiera i vilket skede av en verifieringsprocess som det är lämpligt ur ett ekonomiskt perspektiv att utnyttja AM så krävs god kunskap samt erfarenhet inom området. Att besluta för de enskilda fallet om AM är en effektiv metod ur ett kostnadsperspektiv jämfört med flertalet ingenjörer som med hjälp av virtuella underlag försöker lösa verifieringsproblemet, är mycket svårt. Detta gäller då varje fall är unikt och därav är det svårt att förutsäga om problemet går snabbt att lösa virtuellt eller om beslutet ska tas att nyttja AM för att snabba på verifieringsprocessen. Båda lösningarna kan vara mycket kostsamma, men att flertalet ingenjörer arbetar virtuellt i flertalet månader och beslutet sedan tas att AM krävs bör undvikas. Att identifiera kostnaden för en additivt tillverkad produkt eller personalkostnaden för en ingenjör är relativt enkelt. Utmaningen ligger i att identifiera tidsåtgången till att virtuellt verifiera en produkt. Eftersom tidsåtgången är direkt kopplat till personalkostnaden är detta en viktig parameter. Därefter måste dessa kostnader ställas mot varandra. Alltså ligger det i Volvos Cars intresse att det finns en metodik som kan ge indikationer i en ungefärlig tidsram för ett beslut om vilken metod som är bäst lämpad för de enskilda fallet.

För att ta ett grundat beslut med så bra utgång som möjligt så bör avdelningen dokumentera och analysera statistik för varje enskilt fall av produkter som tidigare tenderat att sluta i en additivt tillverkad produkt. Med hjälp av statistik över komponenter med olika komplexitet från tidigare utfall, kan man tillsammans med god kunskap inom kostnadsidentifiering av additiva tillverkningsmetoder ta ett väl grundat beslut.

Det är av största vikt att identifiera användningsområdet för den tänkta additivt tillverkade produkten för att kunna sätta krav på ytfinhet, geometri samt fysikaliska och strukturella egenskaper. Då detta är bestämt kan beslut tas om vilken AM-metod samt material som är bäst för det enskilda fallet. Vald metod kan dock vara bäst lämpad för produkten i fråga men ur ett helhetsperspektiv för företaget kan andra metoder vara bättre. Detta gäller ifall den valda maskinen kör fullt med köbildning som följd. Alltså är en god kontakt mellan avdelningen som beställer produkten och AM-center av största vikt så att produktionen blir så tidseffektiv och kostnadseffektiv som möjligt. Det bör undvikas att skicka beställningar externt om tänkt AM-teknik finns inom företaget eftersom kostnaderna då ökar med uppåt 100% enligt en personlig intervju med Richard Camp 2021. Dessa ökade kostnader måste dock ställas mot eventuella förseningar i projekt som kan uppstå ifall det är högt tryck på de interna skrivarna.

Efter dialog med AM-center förstår vi att parametrar som ingår i debiteringen internt är viktigt för båda parterna att förstå sig på, d.v.s. om enbart material och arbetstimmar är prisgrundande för debiteringen så resulterar detta i en ganska stor missvisning jämfört med det verkliga priset per part som en annan budget då får täcka. Utan förståelse för det verkliga priset kan beslutet om vilken metod som är bäst lämpad bli felaktig. En metod för kostnadsidentifiering som är mycket komplex med exakta siffror kan dock vara ett sämre alternativ då detta skulle kräva en stor tidsåtgång och därav ge en större kostnad per part. Med andra ord är det av yttersta vikt att ha en metod som lyfter de viktigaste parametrarna för att undvika missförstånd men också är ändamålsenlig för att minimera kostnaderna.

I många verifieringsprocesser hos avdelningen Mechanical Integration spelar detaljens fysikaliska egenskaper mindre roll vilket betyder att man har större valmöjligheter av material och tillverkningsmetod. Toleranserna är av större vikt eftersom en vanlig verifieringsprocess handlar om att identifiera geometrins passform tillsammans med andra redan befintliga parter i arbetet. Vid denna typ av verifieringsprocess kan metoder som ger goda toleranser och innebär snabb verifiering prioriteras snarare än materialet.

Volvos AM-center tenderar att utnyttja SLS-maskinen mycket mer frekvent jämfört med FDM eller SLA som ofta står lediga, detta leder till köbildning i SLS-maskinen och ofta långa väntetider. Med detta i beaktande så bör FDM och SLA nyttjas mer om möjligt ur ett kostnads och tidsperspektiv.

5.2 Analys & diskussion av resultat

Resultatet som vi har uppnått behandlar materialet PP med metoden SLS på Volvo Cars AM-center. Beräkningarna kan med liknande metod utföras med andra material och för metoderna FDM och SLA. Kostnadskalkylen innehåller de parametrar som vi tillsammans med personal från AM-center, Finans och R&D anser var mest relevanta och har störst inverkan på den totala kostnaden. Denna kalkyl är möjlig att modifiera. Dock bör enkelheten tas i beaktande så att tidsåtgången för beräkningarna inte får för stor inverkan på den totala kostnaden. Resultaten visar att AM i många fall är en mycket kraftfull metod att använda vid verifiering av olika komponenter. Uppgifterna som erhållits av Mechanical Integration angående tidsåtgången för virtuell verifiering av de olika komponenterna överstiger kostnaderna med stora marginaler jämfört med att additivt tillverka komponenten och testa den fysiskt. För mindre komplexa komponenter som till exempel "Protection cover for vehicle computational unit" där kostnaden för AM är minimal, så bör beslutet i ett väldigt tidigt skede tas. Oavsett om yttre omständigheter i framtiden kan påverka att geometrin behöver ändras så är kostnaden näst intill försumbar jämfört med tidsåtgången och kostnaderna för virtuell verifiering i detta fall. För exempelvis komponenten "Footwell area - Body structure part" där kostnaden för AM uppnår 240 744 kr måste däremot dessa yttre omständigheter i form av förändringar i design som kan tillkomma beaktas ingående. Detta gäller för att undvika att beslutet tas i ett skede där angränsande komponenter i en konstruktion är osäkra, vilket kan leda till konsekvensen att komponenten senare inte är aktuell och behöver byggas en gång till med AM. Detta leder till att beslutet blir svårare att ta då kostnaden för AM ökar och, kan få en stor inverkan på totala kostnaderna för verifieringsprocessen. För att kunna ta ett grundligt beslut i dessa fall krävs god kommunikation med avdelningar som jobbar inom aktuellt område för att kunna göra en tidig riskbedömning avseende eventuella förändringar. Statistik från tidigare projekt kan också i dessa fall styrka beslutet om AM är en lämplig metod i aktuellt skede.

5.3 Förslag på framtida visioner som möjliggör förenklad process kring AM

Vi upplever att det finns ett visst motstånd till att utveckla en förbättrad process som möjliggör att AM kan vara en enkel metod att utnyttja. Detta beror till viss del på att ingen avdelning vill ta på sig de ekonomiska kostnaderna som skulle möjliggöra detta. Investeringen i att säkerställa en kapacitet är stor och det är inte helt självklart att det blir lönsamt på en gång. En rutin att använda AM som lösningsmetod måste implementeras bland de anställda för att maximera effektiviteten. Eftersom det idag är relativt komplext och tidskrävande att utnyttja AM så kan detta vara en bidragande faktor till att beslut om att

använda AM tenderar att vara en sista utväg till att lösa det aktuella problemet. Till exempel kan det ta flera veckor innan man får sin beställda komponent. AM är även relativt nyligen implementerat i industrin. Därför är det för de flesta inte ett naturligt hjälpmedel vilket innebär att förenklingar kring hela processen att nyttja AM skulle kunna bidra till ett bättre förhållningssätt i framtiden. Exempel på förenklade omständigheter skulle kunna vara att anpassa en verkstad endast för verifiering av komponenter mot en kaross. Detta skulle möjliggöra effektiva testmonteringar för att lösa olika problem eller frågor. Det gäller även att likvärdiga verktyg som finns i den riktiga produktionskedjan finns till handa samt att standardiserade tillbehör som krävs finns på plats, till exempel muttrar, skruvar, kablage och clips.

Nyttjandet av AM vid rätt tillfälle och i rätt tid är viktigt för att även kunna påvisa att en komponent faktiskt är ergonomiskt monterbar vid tänkt placering och inte bara för att verifiera att komponentens geometri. Naturligtvis finns det flertalet virtuella hjälpmedel som är tillgängliga och kan användas för att simulera enklare montage med goda resultat. Dessa ska inte förkastas men vid komplexa och trånga utrymmen kan det vara svårare att få sig en god ergonomisk uppfattning av monteringen och då är det helt nödvändigt att testa på en verklig modell. Exempel på detta är komponenter med hög vikt som genom en simulering kan se väldigt enkla ut att montera. I realiteten tenderar dock komponenter med hög vikt att vara svårmonterade, särskilt i trängre områden där det krävs en lång hävarm. Oavsett vikt så är längden på hävarmen också något att ta i beaktande då variationen på nåbarheten hos personalen i produktionen kan bidra till att specifika montage enbart är görbara för ett begränsat antal medarbetare. Dessa exempel är några av många verifieringsprocesser som en lokal verkstad för AM skulle förenkla avsevärt. När enkelheten finns där och personalen förstår de möjliga värdena av en bra arbetsprocess kring AM kan detta spara både tid och kostnader.

För att nå framgångar i projekt på ett stort företag som Volvo Cars krävs det att alla inblandade parter samarbetar effektivt. Detta gäller ledningsgrupper högre upp i företagets hierarki såväl som ingenjörer som designar och konstruerar. En utmaning då flertalet parter är inblandade är just att få samarbetet att flyta på.

Att arbeta virtuellt har absolut sina fördelar men vi vet nu med resultaten i hand att många ingenjörstimmar hade kunnat sparas in om ett mer inarbetat system att använda sig av AM hade varit på plats. I fallet "footwell area - body structure part" arbetade man till exempel med att lösa ett monteringsproblem virtuellt. Det tog sex månader innan ett AM-koncept togs fram och det gick då fort att verifiera att problemet inte var så stort som man tidigare trodde. Hade detta gjorts tidigare hade företaget sparat både tid och pengar.

Utmaningarna som leder till att anställda drar sig för att använda sig av AM och det blir en sista utväg är flera. Vi har genom möten med anställda på Volvo Cars fått information om vilka nuvarande problem de ser med AM inom företaget.

Att lägga en order hos AM-center är i dag en föråldrad process, dagens beställningsblankett behöver moderniseras, förtydligas och förenklas. Man kan inte räkna med att gemene man förstår alla termer inom AM. Det behövs också ett standardiserat system där allt fungerar på samma sätt vilken typ av skrivare man än väljer.

Tiden det tar att få sin beställda komponent varierar men vi ser exempel där det har tagit uppåt 4 veckor. Detta är en stor anledning till att AM tenderar bli en sista lösningsmetod. Det

är enkelt att tänka att man hinner lösa problemet innan komponenten ens har levererats och då rinner tiden väldigt fort iväg. En beställd komponent som levereras efter 4 veckor kan även vara inaktuell då designen behövt ändras under tiden. Detta leder till att den slutgiltiga designen oftast behöver vara bestämd innan man beställer sin komponent. Ett alternativ för att hantera långa kötider är att skicka beställningarna externt men detta bör undvikas på grund av ökad kostnad.

Ett annat stort problem som nämnts tidigare är att det inte finns någon specifik plats där man kan testa och prova sin komponent. Till exempel kan det behövas tillgång till skruvar, monteringsutrustning, typ av provkablage och kanske till och med en kaross där det finns möjlighet att testa sin utskrivna komponent. Detta är viktigt när man behöver testa den ergonomin för en monteringsverifiering.

För att komma till rätta med dessa problem har vi tagit fram ett förslag där alla våra uppgifter om kostnader kommer från anställda inom Volvo Cars med god insyn. Vi har gjort en uppskattad kalkyl på vad det skulle kosta att upprätta en lokal med 2 - 3 SLS-skrivare anpassad och avsedd endast för AM inom Volvo Cars. Nedan följer förklaringar till de olika delarna i investeringen.

Anpassning av lokal: Här handlar det till stor del om vilken kvalitetsnivå lokalen ska förhålla sig till. Vill man som i Volvo Cars fall ha en riktig produktionsanpassad lokal med bra ventilation, centraldammsugare, processventilation och full ex-klassning som innebär förebyggande åtgärder mot pulverexplosioner kommer kostnaden hamna på ca 1-2 MSEK. Här inkluderas även område för efterbearbetning med tillhörande utrustning.

Skrivare: Högkvalitativ SLS-skrivare med tillhörande utrustning som till exempel pulvermatare. Ca 9 MSEK per styck.

Operatör: Genomsnittslönen för en tillsvidareanställd på R&D Volvo Cars: 936 000 SEK/år

Mjukvara och support: Licenser av virtuella program för att hjälpa till att maximera skrivarens kapacitet genom effektiv packning, även arbete med att förenkla beställningsprocessen för den enskilde ingenjören. Ca 2 MSEK. Detta kan variera på grund av att vissa licenser betalas per år.

Tabellen redovisar en uppskattning för investeringskostnaden av en lokal redo att användas för additiv tillverkning.

Investeringselement	Antal	Kostnad per styck	Total Kostnad
Anpassning av lokal	1	1.3 MSEK	1,3 MSEK
Skrivare	3	9 MSEK	27 MSEK
Operatör	3	1 MSEK	3 MSEK
Mjukvara	1	2 MSEK	2 MSEK
			33,3 MSEK

Tabell 7. Tabellen redovisar för delkostnader och den totala kostnaden för att upprätta en lokal anpassad för additiv tillverkning.

En uppskattning på vad det skulle kosta att upprätta en lokal för additiv tillverkning blir alltså 33,3 MSEK. Viktigt att notera här är att om man väljer att endast investera i två SLS-skrivare blir kostnaden istället 24,4 MSEK. Att upprätta 3 lokaler av denna karaktär skulle då kosta från 72,9 MSEK till 99 MSEK. Enligt våra beräkningar kostar det alltså lika mycket som 80st tillsvidareanställda ingenjörer på R&D kostar per år. Sätter man detta i relation till det totala antalet anställda inom R&D som uppgår till ca 6000 är det försumbara 1,3%. Med tanke på antalet månader som kunde sparats på grund av att man fördröjt beslutsprocessen om att använda AM förutspår vi att det kommer bli en lönsam investering på sikt, eftersom en fördröjd verifieringsprocess ofta påverkar ett flertal olika avdelningar ifall en problemlösning drar ut på tiden.

En annan viktig aspekt att ta i beaktning är att den största delen av investeringssumman är en engångskostnad och när allting väl är implementerat kommer de flesta problemen vi stött på inom AM att elimineras. Användarvänligheter för den enskilde ingenjören kommer öka vilket minskar att man drar sig från att använda sig av metoden AM. Leveranstiderna kommer att kortas tack vare de ökade antalet skrivare och operatörer. Skulle man även implementera en testverkstad för ingenjörer med all nödvändig utrustning nära till hands hade även det bidragit till en ökad effektivitet.

Vi tror att detta koncept i längden är en god investering. Att relativt snabbt kunna besluta under ett möte om att ta fram en additivt tillverkad produkt och ha den utskriven och klar inom några få dagar kommer öka motivationen och även känslan av att gott samarbete lönar sig. Detta kommer i sin tur korta ner utvecklingsprocesserna vilket i slutändan leder till att företagets resultat ökar.

6. Slutsats

6.1 Frågeställning

- **Vilka additiva tillverkningsmetoder finns tillgängliga på dagens marknad?**

På dagens marknad finnes flertalet olika additiva tillverkningsmetoder som genom olika metoder bygger en tre dimensionell geometri. Metoderna delas in i sju grupper enligt följande: Vat Photopolymerization, Powder Bed Fusion, Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Sheet Lamination samt Directed Energy Deposition. Samtliga metoder har studerats för att få en god överblick av ämnet, sedan har fördjupning av Vat photopolymerization, Material extrusion samt Powder bed fusion tillämpats enligt arbetets avgränsningar.

- **Vilka parametrar påverkar tidshorisonten för tillverkningsprocess och efterbearbetningsprocess vid användning av AM?**

Tidshorisonten varierar beroende på tillverkningsmetod, val av material, lagertjocklek samt storlek av geometri. Efterbearbetning varierar beroende på slutprodukten krav i form av val av ytbehandlingar samt borttagning av eventuella stödmaterial.

- **Vilka parametrar i en AM-process påverkar den totala kostnaden mest på Volvo Cars?**

Efter en stor tidsåtgång ägnat till att läsa sig in på ämnet additiv tillverkning, besök för att se dessa metoder i verkligheten och dialog med flertalet personer verksamma inom ämnet på Volvo Cars. De viktigaste och mest vitala parametrarna har tagits fram och därefter adderats till den befintliga kostnadskalkylen som utnyttjas för additiv tillverkning på Volvo Cars. Dessa parametrar är materialkostnader, arbetstimmar, värdeminskning på maskin, service på maskin samt energiförbrukning.

- **Hur används AM – verifiering, provning, prototyper och design?**

Additiv tillverkning används idag för verifiering, provning prototyper osv. Dock upplevs det saknas en betryggande metod samt process för hur detta på ett smidigt vis ska tillämpas. Idag tenderar AM att vara ett hjälpmedel som utnyttjas i ett sent skede då virtuella underlag inte räcker till.

- **Vilka beslutsunderlag krävs för att besluta om en fysisk produkt tillverkad med AM är nödvändig och rekommendationer för hur detta bör ske och hur den ska användas?**

Additiv tillverkning är ett mycket kraftfullt hjälpmedel om de används på rätt sätt vid rätt tidpunkt enligt analysen som gjorts. Vilka underlag krävs då egentligen för att ta ett beslut om additiv tillverkning är en lämplig metod att utnyttja för de enskilda fallen? Först och främst krävs en CAD-profil som motsvarar produktens geometri. Denna räknar vi dock inte som kostnadsgrundande eftersom den krävs oavsett om metoden är virtuell verifiering eller additiv tillverkning. Profilen genererar en känd volym samt en indikation för användningsområdet. Därefter kan genom de framtagna utökade kostnadskalkylerna beräkning av total byggkostnad generera en god indikation till det verkliga priset. Då byggpriset är känt kan den beräkningen ställas i förhållande till personalkostnader som krävs för den virtuella verifieringen, och därefter finna en brytpunkt. Brytpunkten beskriver tidsåtgången inom vilken virtuell verifiering är lämplig. Om den tiden passerar så bör additiv tillverkning utnyttjas. Hur kan då bedömningen göras i ett tidigt stadie om verifieringsprocessen kommer överstiga denna tid till brytpunkten? Detta är mycket svårt att prediktera då flera faktorer kan påverka utfallet, som förändringar i geometrier för angränsande komponenter, osv. Därav krävs dokumenterad statistik från tidigare fall samt god kommunikation mellan inblandade parter inom aktuellt område för att ta ett väl grundat beslut.

- **När är det lämpligt att ta fram 3D-modeller? I vilket skede ska detta göras? Hur ”svåra” problem skall gälla? Behöver det ens vara ett problem? Kan historik trigga att 3D-modeller tas fram redan innan det finns ett problem?**

Historik kan trigga att additiv tillverkning utnyttjas vid fel tillfälle om bristande kunskap inom området råder samt om en tillämpad metod inte styrker beslutet. När det gäller frågan om hur ”svåra” problem där additiv tillverkning är en lämplig metod är rimligen, svårighetsgraden egentligen inte vad som bör vara beslutsgrundande ur ett kostnadsperspektiv. Vad som krävs är en undersökning av kostnad för additiv tillverkning för aktuell geometri jämfört med personalkostnader för virtuell verifiering oberoende av geometrins komplexitet. Detta påvisas till exempel för *figur 13* med en mycket låg beräknad kostnad för att additivt tillverkas. Här ägnades mycket omfattande tid för virtuell verifiering

jämfört med om beslutet hade tagits att tillämpa AM i ett tidigare skede. Med andra ord behöver inte komplexiteten vara en bidragande faktor till att additiv tillverkning är en lämplig metod. När i tiden som additiv tillverkning är en lämplig metod bestäms av byggkostnaden kontra personalkostnad för att virtuellt verifiera problemet.

6.2 Metod för grundande beslut i verifieringsfas

1. Konstruera aktuell geometri i CAD för att erhålla produktens volym.
2. Identifiera produktens användningsområde för att sätta krav på val av material och tillverkningsmetod.
3. Beräkna kostnaden för att additivt tillverka produkten med vald metod och material.
4. Ställ kostnaden för additivt tillverkad produkt i förhållande till personalkostnader för att identifiera inom vilken tidsram som virtuell verifiering är en lämplig metod.
5. Uppskatta tidsåtgången för verifiering med virtuella underlag för den aktuella geometrin och ta hjälp av dokumenterade underlag i form av statistik samt kommunicera med personer inblandade i området.
6. Besluta vilken metod som är bäst lämpad baserat på informationen som erhållits från punkter ovan.

7 Fortsatt arbete

Konstruera ett program där alla lämpliga parametrar finns för att underlätta identifiering av kostnader för additiv tillverkning. Det kan även vara lämpligt att personalkostnader för antal tilltänkta personer i projektet i form av kostnad/tidsenhet är en parameter. Ett program för detta skulle förenkla att identifiera vilken metod som är bäst lämpad.

Det kan även vara lämpligt att undersöka om det bör investeras i andra additiva tillverkningsmetoder utanför de som redan finns på Volvo Cars.

7.1 Motgångar

Under rådande omständigheter i form av pandemin COVID-19 begränsades möjligheten till personliga möten för diskussion och samverkan, vilket resulterade i att kommunikationen mellan vissa parter tog längre tid än planerat, vilket medför att kunskapsinhämtning försvårades. Det faktum att det råder sekretess på mycket information inom Volvo Cars resulterade i att viss information fick minimeras för att inte riskera eventuell konkurrerande skada inom bolaget.

Referenser

- [1] A Bandyopadhyay, T Gualtieri, B Heer & S Bose, "Introduction to additive Manufacturing", in Additive Manufacturing Second Edition, Amit Bandyopadhyay & Susmita Bose, Boca Raton , FL, USA: Taylor & Francis Group, 2020, pp. 2-20.
- [2] I Gibson, D Rosen, B Stucker & M Khorasani, "The Generic AM Process" in Additive Manufacturing Technologies, Third Edition, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 3-6.
- [3] I Gibson, D Rosen, B Stucker & M Khorasani, "New AM Classification Schemes" in Additive Manufacturing Technologies, Third Edition, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 38-39.
- [4] C. Yan, Y. Shi, L Zhaoqing, S Wen & Q Wei, Selective Laser Sintering Additive Manufacturing Technology, 1st ed, Cambridge, United States: Elsevier, 2020. [Ebook]
- [5] O. Diegel, A. Nordin & D. Motte, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, 1st ed, Singapore, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020. [Ebook]
- [6] B Banjanin, G Vladić, M Pál, S Baloš, M Dramićanin, M Rackov & I Knežević, Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology, 1st ed, Rio de Janeiro, Brasilien: Revista Materia, 2018. [Ebook]
- [7] T. J. Gordelier, P. R. Thies, L Turner & L Johanning, "Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review", Rapid Prototyping Journal., Vol 25, no. 6, pp. 954-955, Aug. 2019. [Online]
- [8] C Schmidleithner & D. M. Kalaskar, Stereolithography, D Cvetković, 1st ed., London, UK: intechopen, 2018, ch. 1-4, pp. 3-14. [Ebook]
- [9] M. Ruffo, C Tuck & R. J. M. Hague, "Cost Estimation for Rapid Manufacturing - Laser Sintering Production for Low to Medium Volumes", Journal of Engineering Manufacture., Part B, pp 1417-1427, Jan, 2006. [Online]
- [10] "Räkna ut vad en anställd kostar", verksamt.se, maj, 14, 2021. [online]
https://www.verksamt.se/alla-e-tjanster/rakna-ut/rakna-ut-vad-en-anstalld-kostar?p_auth=xPmJQqhe&p_p_id=tvv_webcalc_WAR_tvv_webcalc&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=2&tvv_webcalc_WAR_tvv_webcalc_facesViewI



CHALMERS