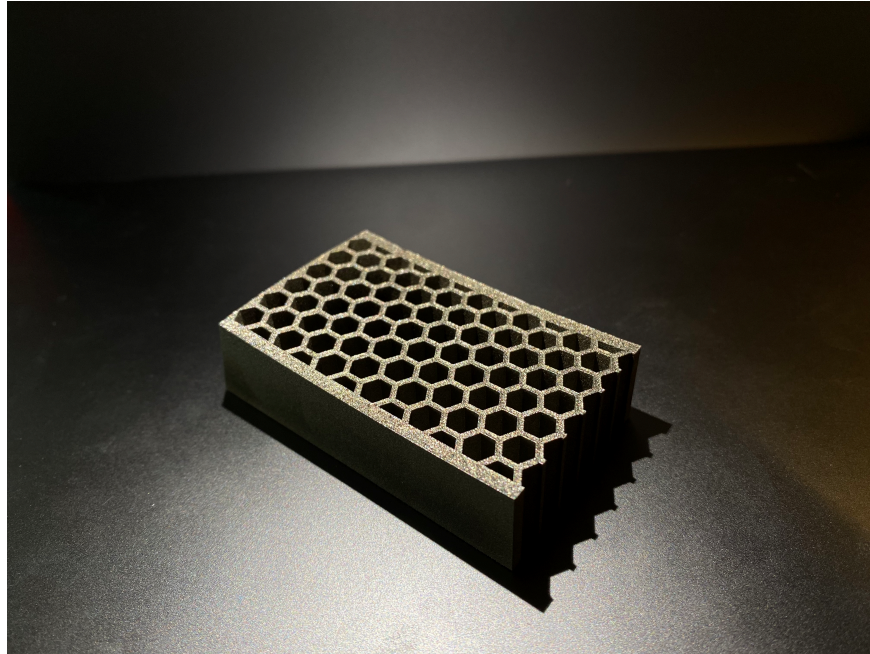




**CHALMERS**



# Additiv tillverkning av lättviktslösningar för elektrifierade drivlinor

Kandidatarbete inom industri- och materialvetenskap

Oskar Ekberg  
Amanda Kristensson  
Jacob Kylin  
Pontus Larsson  
Rasul Razae  
Alexandra Torsson

institutionen för industri- och materialvetenskap

Additiv tillverkning av lättviktslösningar för elektrifierade drivlinor

Oskar Ekberg  
Amanda Kristensson  
Jacob Kylin  
Pontus Larsson  
Rasul Razae  
Alexandra Torsson

© Oskar Ekberg, Juni 2022  
© Amanda Kristensson, Juni 2022  
© Jacob Kylin, Juni 2022  
© Pontus Larsson, Juni 2022  
© Rasul Razae, Juni 2022  
© Alexandra Torsson, Juni 2022

Examinator: Lars Nyborg  
Handledare: Mats Norell  
Rapportnummer: IMSX15-22-81

Chalmers tekniska högskola  
Institutionen för industri- och materialvetenskap  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige

Institutionen för industri- och materialvetenskap Göteborg,  
Sverige juni 2022



## Sammanfattning

Till syfte att undersöka möjligheterna att tillämpa additiv tillverkning (AM) på elektrifierade drivlinor för viktsbesparing av komponenterna, genomfördes en teoretisk undersökning i form av en litteraturstudie. Projektet fokuserade på de framtida möjligheter samt riskerna associerade med tekniken.

Arbetet påbörjades med att undersöka befintliga AM-metoder som använder metaller. Genom att studera möjligheterna, för- och nackdelarna samt begränsningarna för dessa tekniker valdes de tekniker som var relevanta för arbetet. De tekniker som ansågs vara relevanta utifrån studierna var DED, EB-PBF och L-PBF (både SLM och SLS). I samband med detta analyserades även ett flertal material relevanta för de valda tillverkningsmetoderna och metoder för att framställa materialet.

Vidare fortsatte arbetet genom att undersöka den elektrifierade drivlinan för att hitta komponenter som med fördel hade kunnat tillverkas genom en AM-metod. Fokuset här låg på att utifrån komponenterna i drivlinan och dess funktioner besluta för varje komponent ifall den var en kandidat för demonstrator i arbetet.

Resultatet av studierna visade att det finns möjligheter att använda AM för komponenterna i en drivlina, främst för viktreducering. Fördelen med AM jämfört med de traditionella metoderna är den stora designfriheten som den erbjuder. Genom att tillämpa topologi optimering (TO) eller cellulära strukturer (CL) som till exempel honeycomb-struktur kan vikten på en komponent reduceras avsevärt. Detta i sin tur kan påverka räckvidden för bilen vilket gör att det finns potential för användning av AM.

För att bekräfta resultaten av studierna bestämdes det att tillverka en demonstrator. Komponenten i den elektrifierade drivlinan detta beslutades att visa på var fälgarna på bilen, dels eftersom det är fyra fälgar vilket gör viktbesparningen större men också eftersom fälgen är så kallad ofjädrad vikt på bilen. Genom att minska den ofjädrade vikten på en bil blir andra komponenter omkring i drivlinan mindre belastade och dessa i sin tur kan då göras lättare. En fälg designades med cellulära honeycomb strukturen i dess ekrar med Autodesk Inventor vilket gav en viktbesparing på 25 % i hela fälgen.

För att skapa ett djupare förståelse inom gruppen om processen för tillverkning med AM och visa att de cellulära strukturen för viktreducering är tillämpbara, printades en del av ekern i fälgen som designades under arbetets gång. Detta gjordes mot slutet av arbetet i Materiallabbet på Chalmers tekniska högskola.

## Förord

Under vårtermninen 2022 har kandandidatarbetet IMSX-081, *Additiv tillverkning av lättvikslösningar för elektrifierade drivlinor*, utförts på instituten för industri- och materialvetenskap på Chalmers tekniska högskola. Projektgruppen som utfört arbetet är civilingenjörsstudenter inom maskinteknik samt automation och mekatronik. I rapporten beskrivs tillvägagångsätt samt tillverkning- och tillämpningsmöjligheter med AM.

Vi vill ge ett särskilt tack till Mats Norell för sitt stora engagemang och sin vägledning under hela arbetsprocessen. Projektgruppen vill också tacka Bala Malladi för sin hjälp med att tillverka vår komponent samt Lars Nyborg som koordinerade printingen och gjorde det möjligt.

# Innehåll

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>                                                | <b>2</b>  |
| 1.1      | Bakgrund . . . . .                                              | 2         |
| 1.2      | Syfte . . . . .                                                 | 3         |
| 1.3      | Precisering av frågeställningar . . . . .                       | 4         |
| 1.4      | Avgränsningar . . . . .                                         | 5         |
| <b>2</b> | <b>Metod</b>                                                    | <b>6</b>  |
| 2.1      | Etablera projekt . . . . .                                      | 6         |
| 2.2      | Miljöpåverkan av additiv tillverkning . . . . .                 | 6         |
| 2.3      | Kartläggning av tillverkningstekniker . . . . .                 | 6         |
| 2.4      | Material och defekter . . . . .                                 | 7         |
| 2.5      | Kartläggning av Drivlina och val av komponent . . . . .         | 7         |
| 2.6      | Tillämpning av AM . . . . .                                     | 7         |
| 2.7      | Konstruktion av komponent . . . . .                             | 7         |
| <b>3</b> | <b>Additiv tillverkning</b>                                     | <b>9</b>  |
| <b>4</b> | <b>Miljöaspekter</b>                                            | <b>10</b> |
| 4.1      | Energiförbrukning . . . . .                                     | 10        |
| 4.2      | Materialåtgång . . . . .                                        | 10        |
| 4.3      | Tillverkningsprocess . . . . .                                  | 11        |
| <b>5</b> | <b>Tillverkningstekniker</b>                                    | <b>12</b> |
| 5.1      | Powder bed fusion . . . . .                                     | 12        |
| 5.1.1    | Selective laser sintering och selective laser melting . . . . . | 12        |
| 5.1.2    | Electron beam powder bed fusion . . . . .                       | 14        |
| 5.2      | Direct energy deposition . . . . .                              | 15        |
| 5.3      | Binder jetting . . . . .                                        | 16        |
| 5.4      | Material jetting . . . . .                                      | 17        |
| 5.5      | Sheet lamination . . . . .                                      | 18        |
| 5.6      | Val av relevanta tekniker . . . . .                             | 19        |

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Material och defekter</b>                                      | <b>21</b> |
| 6.1      | Produktion av pulver . . . . .                                    | 21        |
| 6.1.1    | Gasatomisering . . . . .                                          | 21        |
| 6.1.2    | Plasma spheroidization . . . . .                                  | 21        |
| 6.1.3    | Mekaniska metoder . . . . .                                       | 21        |
| 6.1.4    | Kvalitet av pulver . . . . .                                      | 22        |
| 6.2      | Material relevanta för AM . . . . .                               | 22        |
| 6.2.1    | Ti-6Al-4V . . . . .                                               | 22        |
| 6.2.2    | Rostfritt stål & Snabbstål . . . . .                              | 23        |
| 6.2.3    | Nickel-legeringar . . . . .                                       | 24        |
| 6.2.4    | Aluminium-legeringar . . . . .                                    | 24        |
| 6.2.5    | Val av relevanta material . . . . .                               | 24        |
| 6.3      | Defekter . . . . .                                                | 25        |
| 6.3.1    | Viktiga egenskaper för utmattningstålig/stark komponent . . . . . | 25        |
| 6.3.2    | Processparametrar . . . . .                                       | 25        |
| 6.3.3    | Mäta defekter, kvalitetssäkra komponenter . . . . .               | 26        |
| 6.3.4    | Åtgärder för att öka kvalitet . . . . .                           | 27        |
| <b>7</b> | <b>Drivlina</b>                                                   | <b>28</b> |
| 7.1      | Uppbyggnad av elektrisk drivlina . . . . .                        | 28        |
| 7.2      | Elektrisk motor . . . . .                                         | 28        |
| 7.3      | Komponenter i växellåda . . . . .                                 | 28        |
| 7.4      | Komponenter efter växellåda . . . . .                             | 29        |
| <b>8</b> | <b>Val av komponent för demonstrator</b>                          | <b>30</b> |
| <b>9</b> | <b>Tillämpningar med AM</b>                                       | <b>31</b> |
| 9.1      | Tillämpning . . . . .                                             | 31        |
| 9.2      | Depositionsstrategi . . . . .                                     | 31        |
| 9.3      | Lättviktslösningar med AM . . . . .                               | 32        |
| 9.3.1    | Topologioptimering . . . . .                                      | 32        |
| 9.3.2    | Cellulära strukturer . . . . .                                    | 32        |
| 9.4      | Design for Additive Manufacturing . . . . .                       | 33        |

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>10 Process för att framställa en komponent</b>  | <b>35</b> |
| 10.1 CAD . . . . .                                 | 35        |
| 10.1.1 Stödstrukturer . . . . .                    | 35        |
| 10.2 STL/AMF konvertering . . . . .                | 36        |
| 10.3 Filöverföring till maskin . . . . .           | 36        |
| 10.4 Maskininställningar . . . . .                 | 36        |
| 10.5 Printning . . . . .                           | 36        |
| 10.6 Avlägsning och rensning av material . . . . . | 38        |
| 10.7 Efterbearbetning . . . . .                    | 38        |
| 10.8 Tillämpning . . . . .                         | 39        |
| <b>11 Diskussion</b>                               | <b>40</b> |
| <b>12 Slutsats</b>                                 | <b>42</b> |

## Förkortningar

**AM** - Additiv tillverkning (Additive manufacturing)  
**ASTM** - American society for testing and materials  
**BJ** - Binder jetting  
**CAD** - Computer aided design  
**CS** - Cellulära strukturer  
**DED** - Direct energy deposition  
**DFAM** - Design for additive manufacturing  
**DFM** - Design for manufacturing  
**EBM** - Electron beam melting  
**EB-PBF** - Electron beam powder bed fusion  
**HAZ** - Heat affected zone  
**HIP** - Hot isostatic pressing  
**HSS** - High Speed Steel  
**ICE** - Internal combustion engine  
**L-PBF** - Laser powder bed fusion  
**LSP** - Laser shock peening  
**LOF** - Lack of fusion  
**ME** - Material extrusion  
**MJ** - Material jetting  
**NDE** - Non destructive evaluation  
**PA** - Plasma atomization  
**PBF** - Powder bed fusion  
**PMDC** - Permanent magnet DC  
**PMSM** - Permanent magnet synchronous machine  
**PREP** - Plasma rotating electrode process  
**PS** - Plasma spheroidization  
**SLM** - Selective laser melting  
**SLS** - Selective laser sintering  
**SPS** - Spark plasma sintering  
**TO** - Topologisk optimering  
**UAM** - Ultrasonic additiv manufacturing  
**UIT** - Ultrasonic impact treatment  
**UV** - Ultraviolet



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Intresset för Additiv tillverkning (Additive manufacturing, AM), samt tillämpning av metoden i produktion, har ökat markant de senaste åren. Detta har gjorts genom att ta kompetensen som återfinns inom vetenskap och ingenjörsmässig kunskap in på en teknikdomän (Krishna m. fl., 2021). Anledningen till det ökade engagemanget från bland annat företag att tillämpa AM mer frekvent har att göra med den ökade kapaciteten till att optimera funktionen av diverse komponenter. AM har haft en betydande roll när det gäller utvecklingsmöjligheter inom försvars-, rymd-, marin-, bil-, samt andra verkstadsindustrier som arbetar med avancerade multifunktionella materialsystem.

Bakgrunden till detta projekt återfinns i tillämpning av AM i bilindustrin. I dagsläget går alltmer mot att tillverka elektrifierade bilar, men också då det är en av de mest konkurrenskraftiga industrierna i världen (Vasco, 2021). För att följa nya design- och marknadstrender krävs det att tillverkningsmetoderna är rätt i tiden vilket AM kan bidra med. AM förkortar design och utvecklingstid, ger flexibilitet i produktionen samt kan tillverka optimerade och skräddarsydda fordonsprodukter på begäran. En komponent av stort intresse i detta sammanhang är ett system som kallas "e-axle" vilket kombinerar transmission, motor och kraftelektronik (E-mobility Engineering, 2021). Detta system förenklar utformningen och service av drivlinan och kan bidra till färre delar och att flera funktioner kombineras till en enda komponent.

Med anledning av AM:s potential till att optimera tillverkning och skapa komplexa strukturer i dess komponenter, uppstår en nyfikenhet kring ifall det finns möjlighet till att viktreducera elektrifierade bilars drivlina. Ett fordon med högre vikt kommer konsumera en större mängd bränsle. I fallet av en elektrifierad bil, resulterar vikten i en nödvändighet av fler battericeller, vilket också resulterar i en viktökning (Edney, 2019). För att bryta denna onda cirkel krävs en viktreducering i andra komponenter i den elektrifierade bilen. Det tros att den möjligheten kan återfinnas i drivlinan.

Då AM antas kunna medföra en viktreducering via dess möjlighet till att skapa komplexa former, ges också utrymme för att studera material och komponentens egenskaper för att optimera vikten ytterligare. Vidare ges uppmärksamhet inom detta projekt även till miljöpåverkan, i och med miljösituationen i dagens samhälle.

## 1.2 Syfte

Detta arbete har i syfte att undersöka hur AM kan tillämpas för att framställa komponenter till en elektrifierad drivlina samt undersöka viktsbesparingsmöjligheter för komponenter tillverkade med AM. I mån av tid framställs en demonstrator i AM-labbet vid Chalmers tekniska högskola för att visa upp den framtagna konstruktionslösningen.

### 1.3 Precisering av frågeställningar

För att tydliggöra de problem som har undersökts så listas en precisering av frågeställningarna, utan innebörders ordning. Detta för att på ett konkret sätt vid senare del av projektet kunna klargöra att frågeställningen är uppnådd. Frågeställningarna är baserade på syftet som framkommit från arbetsbeskrivningen.

- Är det fördelaktigt att tillämpa AM gentemot traditionella tillverkningsmetoder på den elektrifierade drivlinan?
- Vilka förbättringspotentialer kan en komponent tillverkad med AM medföra till den elektrifierade drivlinan?
- Vilka risker är associerade med produktionsmetoden och hur är detta kopplat till drivlinans behov?

## 1.4 Avgränsningar

Projektets omfång avgränsas för att ge definition till arbetet. Dessa avgränsningar har som syfte att hålla projektet inom dess ramar och att på så sätt vägleda gruppen under processen. Generellt är dessa avgränsningar relaterade till projektets natur som ett kandidatarbete.

Med detta i åtanke har följande avgränsningar gjorts:

1. Projektet undersöker enbart komponenter i drivlinan till eldrivna personbilar.
2. Projektet tar inte hänsyn till produktionskostnader för komponenten.
3. Mekaniska lastfall och andra påfrestningar som temperatur och buller kommer inte beaktas.
4. Vid eventuell produktion av en komponent kommer komponenten utformas för att vara en lättviktslösning, andra egenskaper som temperaturledning och reduktion av buller kommer inte att tas i beaktning.
5. Vid eventuell produktion av en komponent sker detta med SLM (Selective laser melting), då detta är metoden tillgänglig för arbetet.
6. Arbetet fortgår under 16 veckor, våren 2022.
7. Enligt uppgiftsbeskrivningen så kommer enbart AM-lösningar i metall att studeras.

Första och andra punkten är avgränsningar som kommer ifrån examinator samt från uppgiftens beskrivning. Elektrifierade bilar och dess drivlina är ytterligare mer relevant att fokusera på i samband med att detta är en större marknad än andra eldrivna fordon. Lastfall, temperatur och andra påfrestningar är inte inom arbetets omfång, det hade varit av intresse för arbetet men information och data bedömdes vara svårtillgängligt. Arbetet avslutas efter 16 veckor då detta är tiden inom kursens omfång.

## 2 Metod

I detta avsnitt presenteras metodvalet för projektet där huvudfokus har varit att undersöka hur en lättviktslösning gjord med AM hade kunnat tillämpas på en komponent för en elektrifierad drivlina.

### 2.1 Etablera projekt

Under uppstarten av projektet genomfördes en bakgrundsstudie till AM och dess tillämpningar. Här definierades AM:s position på marknaden, dess historia samt vissa teknikers funktioner. Detta gjordes gemensamt inom hela gruppen för att respektive person skulle ha samma bakgrundsinformation till arbetet. Senare valde gruppen att upprätta ett Gantt-schema samt en planeringsrapport för att få en struktur på upplägget av både rapportskrivandet och få en överblick på vilka delar av AM som kommer att beröras under vilken tid.

Informationsinsamling skedde generellt genom en kvalitativ analys av artiklar och böcker för att undersöka AM-metoder, dess egenskaper och konsekvenser. Detta för att ta reda på hur och ifall det kan vara möjligt att använda för komponenter i en elektrifierad drivlina. Litteraturstudien gjordes genom digitala sökningar av vetenskapliga artiklar i bland annat söktmotorer samt databaser så som Knovel, Scopus och Chalmers bibliotek.

Vid uppstarten av projektet gjordes även allmänna avgränsningar kopplat till arbetets syfte och uppgiftsbeskrivning från kandidatarbetet *Additiv tillverkning av lättviktslösningar för elektrifierade drivlinor* gjord av Chalmers tekniska högskola.

### 2.2 Miljöpåverkan av additiv tillverkning

Kunskapsinhämtande i detta avsnitt var viktigt med hänsyn till de miljöaspekter som finns kring AM. Informationen som sammanställdes framkom som mest frekvent via Google Scholar och Knovel men även till viss del från vanlig sökmotor. Informationen var tänkt att användas som en grundläggande förståelse för vad AM har för effekter på miljön och var inte en betydande faktor för fortsatta studier, men något som valdes att ta med som bakgrund under projektets gång. Däremot valde gruppen att avgränsa sig till att inte fortsätta studera miljöaspekten alltför djupt eftersom det inte var det primära fokuset i rapporten och endast var till för grundläggande förståelse.

### 2.3 Kartläggning av tillverkningstekniker

I denna del av arbetet undersöktes de olika tillverkningsteknikerna som finns tillgängliga för AM. Fokuset i sökningen låg på att få information om hur teknikerna för AM med metaller fungerar på en grundläggande nivå och samtidigt presentera dess för- och nackdelar. Grundläggande information söktes främst genom Knovel där läroböcker inom AM användes. För mer specifik information om teknikerna hämtades kunskap från vetenskapliga artiklar via Knovel alternativt Scopus, samt företags hemsidor. Information om byggyta och pris var inte av intresse under sökningen och gruppen valde därför att avgränsa sig där. Vid sökning av för- och nackdelar valdes det att kolla på egenskaper som ytfinhet, noggrannhet, geometrisk frihet samt mekaniska egenskaper. Dessa för- och nackdelar ställdes i slutet av avsnittet mot varandra med hänsyn till drivlinans mekaniska egenskaper som resulterade i ett urval av kvarvarande tekniker. Detta var av intresse eftersom det behövdes för att ta reda på vilken tillverkningsteknik som skulle passa bäst för drivlinans komponenter och i vilken utsträckning ett byte från traditionella tillverkningstekniker till AM var aktuellt.

## 2.4 Material och defekter

Kunskapshämtning av material och defekter skedde främst genom att studera vetenskapliga artiklar, rapporter samt böcker via Knovel och Scopus. Avgränsningar som valdes att göra inte material som uppenbarligen inte skulle kunna ha en viss användning för en lastbärande komponent. Inom de metoder som fanns tillgängliga för att producera material relevanta för tillverkningsmetoderna genomfördes en allmän beskrivning av tillverkningsprocessen. För de material som undersöktes var det somliga egenskaper som var i fokus; vanliga användningsområden inom additiv tillverkning, mekanisk förmåga och dess eventuella tillämpning inom området.

De viktigaste defekttyperna och egenskaper som påverkar mängden defekter beskrevs, och sedan från detta beskrevs allmänna parametervärden för tillverkningsprocessen för att undvika defekter. En viktig avgränsning som gjordes var att vissa defekter som uppstår i samband med parametervärdena inte beskrevs.

Vidare undersöktes metoder för att kunna mäta och upptäcka defekter för att i sin tur kunna säkerställa en komponents kvalitet. Det valdes även att inte undersöka metoder som kräver att provet destrueras, alltså enbart NDE (Non Destructive Evaluation) metoder. Sist betraktades vanliga åtgärder för att öka kvalitet och motverka att viktiga defekter kvarstår efter tillverkning, här inkluderades vissa metoder vars tillämpning inte är lika vanlig.

## 2.5 Kartläggning av Drivlinan och val av komponent

Processen för att kartlägga drivlinan gick till så att en grundläggande förståelse bildades genom att studera videoklipp på Youtube, främst på drivlinans ingående komponenter. Därefter söktes information via söktmotorer för elektrisk motor, komponenter i växellåda samt komponenter efter växellåda. Den avgränsning som gjordes under avsnittet var att inte studera batteriet.

För att ta ett beslut kring val av komponent studerade gruppen kapitlet som berör komponenter för den elektrifierade drivlinan. Detta för att i ett första steg ta ett beslut i vilka komponenter som det finns möjlighet för att tillverka. Vidare gjordes en mer ingående informationsinsamling av de olika komponenterna och behandlade områden, så som egenskaper för komponenten, via diverse sökmotorer. En reducering av potentiella komponenter gjordes, samt en beskrivning på vilka förbättringsegenskaper de kvarvarande kan tillhandahålla. Slutligen togs ett beslut i vilken komponent som ska komma att tillverkas i AM baserat på de tillgängliga förbättringspotentialer som finns utifrån den information som har samlats in.

## 2.6 Tillämpning av AM

Tillämpning med AM är ett avsnitt där informationssökningen var inom områden som olika lättviktslösningar, design för AM och depositionsstrategi. Detta valdes att undersökas då det behövdes för att få information kring vilka sätt AM kan tillämpas på vald komponent. Under informationssökningen valde gruppen avgränsningar i form av att inte studera varje enskilt steg i den generella metoden för design för AM. Detta då denna information inte ansågs tillföra något för arbetet.

## 2.7 Konstruktion av komponent

Främsta metoden som användes under detta avsnitt var informationssökning via diverse sökmotorer samt användning av CAD-programmet Autodesk Inventor. Autodesk Inventor användes för att skapa en prototyp av en komponent som senare kan användas vid konstruktion. Komponenten valdes därefter att tillverkas med det som var tillgängligt, det vill säga SLM. Materialet som var tillgängligt att printa i var rostfritt stål. Tillverkningen skedde med hjälp av tillhandahållen handledare och

utfördes i laboratorium på Chalmers. Under arbetet valdes det att enbart tillverka komponenten som en fysisk demonstrator för att visa hur en tillämpning av lättviktslösning kan se ut. Därför avgränsade gruppen sig här och valde att inte studera vidare den tillverkade komponenten och dess hållfasthet som för rapporten annars är av intresse.

### 3 Additiv tillverkning

AM, tillsammans med tredimensionell utskrift, definieras i somliga fall som en del av den tredje industriella revolutionen (Dutta m. fl., 2019, s.1). Det den andra revolutionen hade i fokus var den nya eran av massproduktion och löpande band medan den tredje revolutionen, mer exakt år 2012, snarare innefattade mer komplexa produkter i mindre partier.

3D-skrivaren, som är en stor gren inom AM, uppfanns år 1986 av Charles Hull (NIHF, 2022). De allra första 3D-skrivarna återfanns i forsknings- och utvecklingslaboratorium men har med åren utvecklats såpass mycket att tillämpningarna är infinita. Hull jobbade till en början som utvecklare av lampor med UV-härdbara hartser och det var även då idén om 3D-skrivaren uppstod. Det som skulle komma att härda fotopolymerhartserna, enligt hans plan, var alltså UV-ljus.

Idag bygger processen på att addera material till varje lager för att tillslut uppnå den slutliga delens geometri och kallas därför en additiv process (Dutta m. fl., 2019, s.2). I jämförelse mot en konventionell bearbetningsprocess där arbetet påbörjas med ett materialblock för att sedan använda en materialbortagningsteknik för att skapa den slutgiltiga geometrin, även kallat en subtraktiv process. Även om 3D-skrivare och AM ofta förknippas med varandra är egentligen bara 3D skrivning en delmängd av vad AM egentligen innefattar. AM inkluderar även tekniker för att addera material till redan befintliga komponenter samt processer för att stärka dess egenskaper. Fördelen med AM är att tekniken kan tillverka komponenter direkt ifrån en CAD-modell vilket reducerar nödvändigheten i att använda flertal verktyg och processer för att färdigställa en komponent.

Anledningen till att många väljer att använda sig av AM är den stora designfriheten som de traditionella teknikerna inte kan erbjuda (Dutta m. fl., 2019, s.2-3). Andra fördelar som kommer med att använda AM är också minskad materialåtgång under produktionen och chansen för återtillverkning. I dagsläget ger det däremot inte en direkt ersättning av konventionella tillverkningsmetoder då det, i de flesta fall, inte går att tillverka stora partier på grund av den komplexitet som oftast återfinns i AM komponenter. Däremot reducerar AM tiden från design till marknad drastiskt och främjar innovation på marknaden. Företag behöver inte längre designa en komponenten lika beroende av hur tillverkningsprocessen ser ut, utan kan istället till större del designa utifrån komponentens ändamål (Gibson m. fl., 2014, s.40).

Under senare år har tekniken blivit desto mer utvecklad och AM har tillämpats på tillverkning av såpass komplexa produkter som jetmotorer och flygplan, även inom medicin-, olje-, gas- samt detaljindustrin och allmänna industrimarknader (Dutta m. fl., 2019, s.1-7). Användning av AM inom dessa industrier har visat sig vara fördelaktiga då de ofta behöver en liten volym av komponenter som samtidigt är av högre kostnad.



## 4 Miljöaspekter

I samband med klimatkrisen har det blivit allt mer attraktivt att bli miljövänlig. En av de förbättringspotentialer som marknadsförs med AM i relation till traditionella tillverkningsmetoder är just en ökad miljövänlighet. Utöver det är ett stort fokus för eldrivna fordon dess möjlighet till en förminskad miljöpåverkan, vilket gör det relevant att undersöka huruvida AM kan innebära en mindre negativ miljöpåverkan jämfört med traditionella tillverkningsmetoder.

För att studera denna aspekt närmare har därför detta projekt valt att införskaffa sig kunskap i vilka tillverkningsdelar i processen som kan anses vara till fördel i miljöaspekten vid användning av AM. För att göra arbetet mer lättöverskådligt har de olika processerna delats upp i mindre underrubriker.

### 4.1 Energiförbrukning

I jämförelse med traditionella tillverkningsmetoder har AM en stor potential till att spara material (Dutta m. fl., 2019, s.229-330). Traditionella tillverkningsmetoder utgår många gånger från ett materialblock som genomgår åtminstone några reducerande processer som svarvning eller slipning. Speciellt vid mer komplexa former behövs mycket material tas bort. I kontrast till detta har inte AM samma behov av att avlägsna samma mängd material då formen är nära dess slutliga form för många av de additiva metoderna. Att mängden material som behöver avlägsnas är mindre för AM resulterar i tre konsekvenser; mindre förbrukat material, reducerad användning av verktyg samt mindre energi förbrukat vid avlägsnning av material.

Produktionen kan med AM ske närmare slutkund än annars möjligt (Dutta m. fl., 2019, s.229-330). Att produktionen sker närmare slutkund innebär en fördel utöver den minskade ledtiden, nämligen den avsevärt förkortade transporten. En mer lokal produktion resulterar i en kortare leveranskedjan vilket sparar tid och energi. Därutöver tillåter AM att en komponent kan tillverkas på begäran från kund, vilket i sin tur sänker energiåtgången i den aspekt att behovet av reservlager samt lagerhållning sänks. AM tillåter även materialtillägg på befintliga delar samt komponenter som är i behov av reparation, återtillverkning eller förbättring vilket möjliggör en längre livcykel för somliga produkter.

AM öppnar upp potential för design av nyare delar som kräver mindre energi genom sin livscykel (Dutta m. fl., 2019, s.314). Exempelvis genom att tillverka lättviktslösningar på flyg och rymddelar vilket i sin tur sänker energiförbrukningen och därutöver minimerar utsläpp. Lättviktslösningar förbrukar dessutom mindre material, speciellt i jämförelse med den historiska tillämpningen av traditionella tillverkningsmetoder i flygindustrin.

En studie som gjorts beträffande AM:s potentiella inverkan på energiefterfrågan visar på att betydande energibesparingar finns inom sektorer såsom flyg- och rymdindustrin samt byggsektorn vid tillämpning av AM (Verhoef m. fl., 2018). Inom rymdsektorn beräknas energibesparingar kunna göras på 5-35%, detta främst genom viktbesparingar. Detta i hand med att byggsektorn ses kunna uppnå energibesparingar på 4-21% genom effektivisering av råvaru-, transport och användningsområden. Ur ett globalt perspektiv motsvaras en större tillämpning av AM kunna utgöra en energibesparing på 5-27% till år 2050 beroende på dess förmåga att anpassa sig till tillverkningsindustrin. På grund av nämnda procentuella besparingar som potentiellt kan göras anses det viktigt att tillämpa AM i energipolitiken. Detta för att göra en god långsiktig energiplanering och ses även som ett viktigt redskap för att uppnå Parisavtalet gällande klimatförändringar.

### 4.2 Materialåtgång

Vid tillämpning av AM, med avseende på materialbesparingar, finns ett flertal positiva konsekvenser värda att uppmärksamma. Dels minskas mängden skrot genom effektiv materialanvändning och dess förmåga att reparera skadade komponenter (Dutta m. fl., 2019, s. 229-330). En resulterande effekt är att behovet av råvarutillverkning samt att uppkomsten av skrot minskar. I de flesta fall kan inte

skrotmaterial återanvändas direkt och är i behov av en återvinningsprocess innan fortsatt användning, men detta görs mycket längre ner på strömkedjan och förbrukar i princip lika mycket energi som tillverkning av originalmaterial.

### 4.3 Tillverkningsprocess

Vid tillverkning av komponenter med AM finns flertal olika byggnadsprinciper samt materialvariationer att tillgå (Gebhardt och Hötter, 2016). Beroende på hur processen ser ut kan det finnas anledning till efterbearbetning där det exempelvis kan krävas lösningsmedel eller färg. Av denna anledning går det inte att tillämpa allmänna specifikationer för föreskrifter som ska tillhandahålla information för hur AM ska bedrivas på ett säkert sätt, heller inte vilka åtgärder som behöver tas för att ta personal och miljö i beaktning. Tillämpning av AM i tillverkningsprocesser kräver i somliga fall även väldigt specifika råmaterial vilket resulterar i fler materialberedningssteg (Kellens m. fl., 2017).

De positiva aspekterna utöver viktbesparingar som görs inom tillverkningsprocessen, är att det i majoriteten av fallen går att tillhandahålla fler funktioner vid användning av AM kontra traditionella tillverkningsmetoder. Det resulterar i ett lägre väsentligt behov av diverse verktyg (Dutta m. fl., 2019, s.2-3). Vidare så går det att i vissa fall förbise behov av att färga en komponent då det sker vid tillverkning. AM kan även ersätta traditionella tillverkningsmetoder och däribland även spara material inom områden såsom smide, gjutning och bearbetning för ett stort antal tillämpningar.

## 5 Tillverkningstekniker

American Society for Testing Materials (ASTM) klassificerar AM i sju olika kategorier:

- 1) Powder Bed Fusion (PBF)
- 2) Directed Energy Deposition (DED)
- 3) Binder Jetting (BJ)
- 4) Material Jetting (MJ)
- 5) Sheet Lamination
- 6) Material Extrusion (ME)
- 7) VAT Photopolymerisation

Av dessa sju kategorier finns fem användbara för metaller vilka är: MJ, PBF, BJ, DED och sheet lamination (Dutta m. fl., 2019, s.15-18). I detta avsnitt kommer dessa relevanta tillverkningstekniker beskrivas, med fördelar och nackdelar inkluderade. Vanliga tillämpningar och begränsningar av teknikerna undersöks, med fokus på tekniker tillämpbara på lastbärande komponenter. Detta sammanställs sedan och står till grund för en beslutsprocess där tekniker irrelevanta för den elektriska drivlinan blir bortvalda. Relevanta tekniker förs vidare, och undersöks hur de kan tillämpas på en komponent vald ur drivlinan.

### 5.1 Powder bed fusion

Powder bed fusion (PBF) tekniken grundar sig i att metallpulver tillverkas med olika egenskaper för att matcha dess tillämpning (Bourell m. fl., 2020, s.167). Tekniken fungerar på så sätt att komponenten printas ovanpå en metallplatta som sitter fast i byggkammaren. Över byggplattan sprids sedan metallpulvret med hjälp av en rulle, borste eller skrapa. pulvret är vanligtvis runt 20-200  $\mu\text{m}$  (Dutta m. fl., 2019, s 22-23). När det är färdigställt läser maskinen in byggytan med hjälp av den tillgängliga CAD-datan som tagits fram och följer det givna lagret från modellen. Pulvret sammanbinds slutligen med hjälp av en energikälla som smälter eller sintrar materialet. Metoden upprepas tills dess att den önskade komponenten är framtagen. Om begärs, skärs sedan komponenten bort från metallplattan som den printades på. Vanliga metoder för PBF är bland annat selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM) och electron beam melting (EBM) vilket förklaras vidare i avsnitt 5.1.1 och 5.1.2. I Figur 5.1.1 visas en schematisk bild av Laser powder bed fusion (L-PBF).

Användning av PBF möjliggör tillverkning av avancerade och solida komponenter (Dutta m. fl., 2019, s.23-56). Material som används vid PBF är flera, bland annat 300 maråldrat stål, rostfritt stål, titan, nickellegeringar och kobolt-krom vilket tillåter stor variation av materialegenskaper. Brister som är gemensamt hos SLS, SLM och EBM är att de printade komponenterna ofta får kvarvarande stress vid tillverkning. Den kvarvarande stressen är ett resultat av att materialet smälts lokalt samtidigt som stora temperaturvariationer uppstår. Andra tekniker kan uppnå samma ytfinhet som PBF men måste då oftast komplettera med en traditionell tillverkningsteknik utöver AM. Genom att välja en smalare elektronståle också skapa en bättre ytfinhet.

#### 5.1.1 Selective laser sintering och selective laser melting

Gemensamt för de två metoderna är att tekniken utförs i en kammare med ädelgas så som kväve eller argon (Herzog m. fl., 2016, s.372). I kammaren ska också syrehalten ligga under 0.1 % för att förhindra att materialet reagerar med omgivningen. Skillnaden mellan de två metoderna är att SLS sintrar metallpulvret medan SLM smälter metallpulvret. Genom att antingen smälta eller sintra uppstår skilda materialegenskaper för de två metoderna. I SLS smälts pulvret aldrig fullständigt, under sintringen höjs istället temperaturen i ugnen till strax under smältpunkten så att diffusion uppstår mellan partiklarna vilket till slut bildar en solid komponent (Brandt, 2016, s.166-167). Nackdelar med

att använda just SLS är den höga pulverkvalitet som krävs. Detta eftersom endast små pulverpartiklar som möjliggör snabb sintring används. Små pulverpartiklar hör också samman med en högre materialkostnad (Gibson m. fl., 2014, s.140).

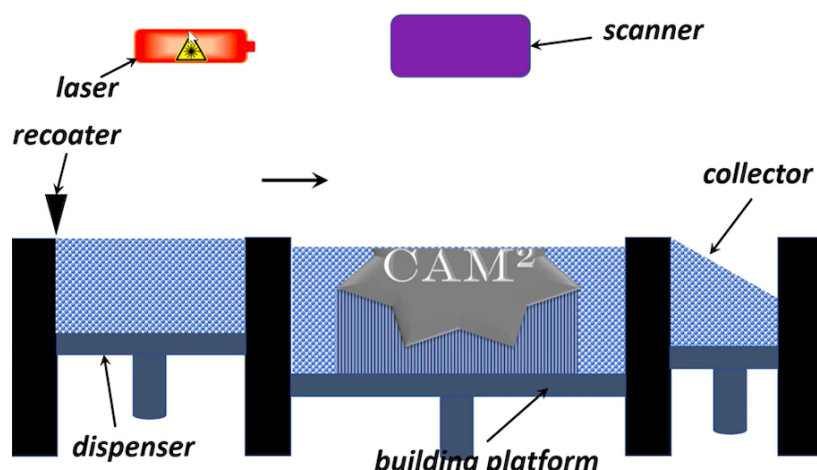
Det finns flera för- och nackdelar med SLM. Bland annat utvecklas inga grova korn i materialet eftersom pulvret smält och stelns hastigt rakt igenom, även mellan varje nytt lager (Zhang m. fl., 2020). Lasern har även en återsmältande effekt på de tidigare lagren vilket leder till ett mono-material, alltså material som enbart innehåller ett sorts material med samma smältpunkt genom hela. Då kornen är fina uppkommer också egenskaper så som ett mindre poröst material och färre föroreningar i varje lager. Fina korn är också gynnsamt då det leder till högre densitet (Bourell m. fl., 2020, s.155).

Material som används inom SLM är bland annat stål, titan, koboltkrom, aluminium och nickel (Bourell m. fl., 2020, s.155). Problem som kan uppstå med materialvalet inom både SLS och SLM är att eftersom det blir ett monomaterial under smältningen finns inte möjligheten att kombinera olika material för att uppnå önskade egenskaper.

Till skillnad från andra tekniker kräver denna metod generellt ingen eller väldigt lite bearbetning av ytan efter att den har printats (Palermo, 2013). Om det skulle krävas är vanliga metoder värmebehandling eller blästring. Dessa efterbehandlingsåtgärder kan bland annat leda till att materialet krymper runt 3-4 % vilket i sin tur resulterar i möjliga förvrängningar. Termiska spänningar uppstår även på grund av smältningen under tillverkningen. Därför är det viktigt under dimensioneringen att ta hänsyn till detta för att inte riskera att komponenten blir av sämre kvalitet. Det gör också att robusta byggplattor är nödvändigt men även stödstrukturer för att förebygga detta.

Då både SLM och SLS använder sig av små strålar vid tillverkningen möjliggör detta produktion av komplexa geometrier med hög noggrannhet (Dutta m. fl., 2019, s.63). Att använda någon av dessa tekniker medför en längre processtid, på grund av upp- och nervärmningscyklerna (Gibson m. fl., 2014, s.140-143). Eftersom tekniken använder sig av en laserstråle kan enbart en punkt bearbetas åt gången vilket resulterar i en långsammare tillverkningsprocess. Processtiden ligger på  $< 0.2mm^3$  s.

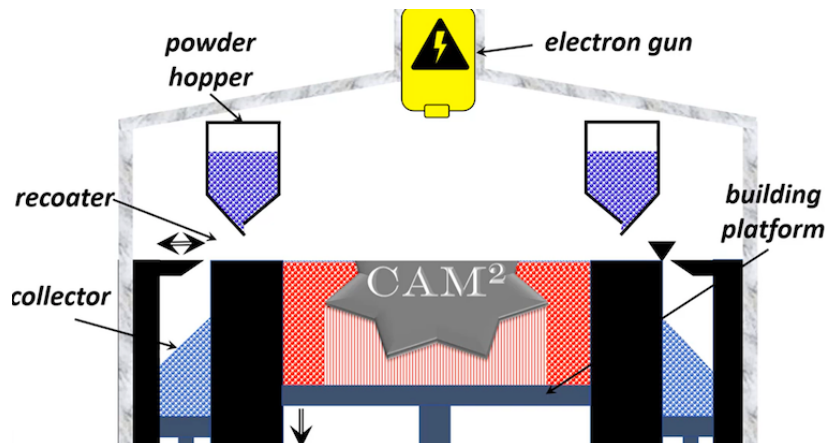
Exempel där teknikerna används är inom bland annat flygindustrin. Där byggs högkvalitativa komponenter av ett enda material (Palermo, 2013). Då industrin är liten och fokuset är att printa komponenter med bra kvalitet istället för i stora kvantiteter, sker printningen på plats vid behov och inget lagring av komponenter sker.



Figur 1: Schematisk illustration av Laser powder bed fusion. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

### 5.1.2 Electron beam powder bed fusion

En underkategori av powder bed fusion är Electron beam powder bed fusion (EB-PBF) där man smälter materialet med en elektronstråle gentemot att använda en laser (Bourell m. fl., 2020, s.205). Figur 2 visar en schematisk bild av processen.



Figur 2: Schematisk illustration av Electron beam powder bed fusion. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

Miljön som processen utförs i med EB-PBF är skilt från L-PBF på så sätt att istället för att blåsa ädelgas på materialet medans maskinen arbetar, sker hela processen i ett vakuum. Eftersom processen utförs i vakuum så finns möjligheter att använda metaller som reagerar snabbt med syre utan att metalloxider bildas (Körner, 2016, s.362). Genom att använda sig av en uppvärmd kammare minskar risken för att eventuella restspänningar uppkommer vid temperaturskillnaderna. Det bidrar också till en ren och kontrollerad miljö för metoden (GE Additive, u. å).

Viktigt för denna metod är att förhindra rökbildning då detta leder till att elektronerna studsar mot rökpartiklarna. (Körner, 2016, s.362). För att förhindra elektrostatisk laddning och rökbildning i pulvret så tillsätts en liten mängd helium till kammaren. Temperaturen på materialet värms upp försiktigt genom att stråla en ofokuserad elektronstråle över materialet för att sintra pulvret en aning, för att också förhindra rökbildning ifall små partiklar blir för varma.

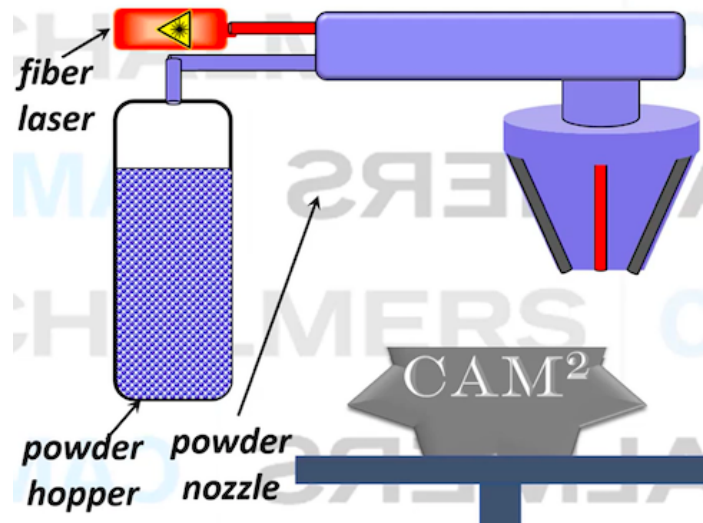
Rent koppar är ett förhållandevis svårt material att arbeta med inom L-PBF eftersom det är väldigt reflekterande. Detta leder till att laserstrålen reflekterar mot materialet och på så sätt inte värmer upp materialet tillräckligt. Med EB-PBF tas 85-90 % av elektronernas hastighet upp av materialet vilket gör det fördelaktigt att använda den här metoden (Bourell m. fl., 2020, s.401).

Ett annat problem med koppar är att den reagerar fort med syre för att bilda kopparoxid men eftersom processen sker i vakuum så kommer den här reaktionen ske mycket långsammare (Bourell m. fl., 2020, s.401). Då koppar har väldigt bra termiska egenskaper så gör det att den här metoden är fördelaktig att använda vid tillverkning av komplexa radiatorsystem (Carvill, 1994).

EB-PBF kan användas på samma metaller som andra PBF-metoder, det enda som krävs är att materialet har en god elektrisk konduktivitet för att kunna värmas upp (Körner, 2016, s.361). Det är relativt enkelt att återanvända det metallpulver som inte har blivit ihopsvetsat men det kräver att det silas för att hålla en god kvalitet. Dock bör det tänkas på att metallen kan ha blivit upphettad så att dess egenskaper kan ha ändrats med tiden.

## 5.2 Direct energy deposition

Direct energy deposition (DED) är en metod där material smälts av en energikälla (Bourell m.fl., 2020, s.220). DED smälter inte ett redan utplacerat lager likt PBF-teknikerna, utan materialet smälts när det avsätts. Figur 3 visar en illustration på metoden där energikällan (I detta fall laser), pulverdeponerare och pulvrets behållare är markerade.



Figur 3: Schematisk illustration av Directed Energi Deposition. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

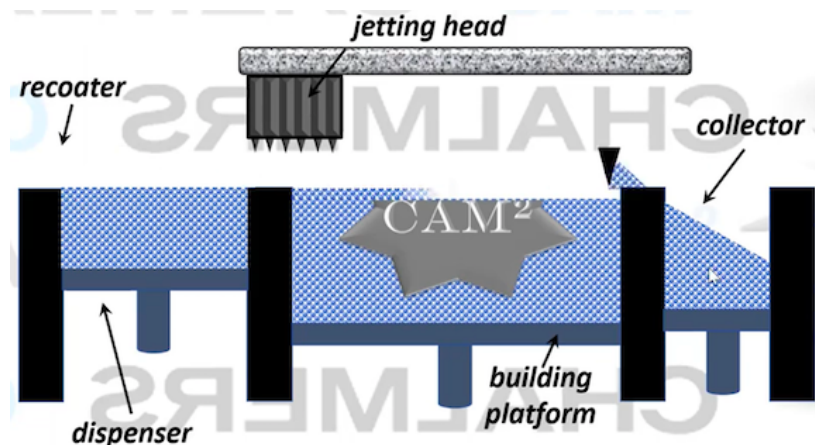
DED-tekniken med användning av pulvermatning är vanlig och de flesta metaller finns redan i denna form (Gibson m.fl., 2014 s.245). Konsekvenser av att använda sig av pulver är att en viss del av pulvret aldrig smälts under processen. Därför måste detta pulvret fångas, helst rent, för att kunna återanvändas. Trådmatning däremot får inte samma spill så som pulver utan är 100 % effektiv. Trådmatningen är som mest fördelaktig vid tillverkning av mindre komplexa geometrier och som inte behöver ha övergångar i tjocklek (Gibson m.fl., 2014, s.251-252). Trådmatning leder ofta till att det är svårt att både vara någrann och samtidigt få låg porositet vid printing. Det är också enklare att få fram fler typer av material i pulverformat. Vid användning av trådmatning är det i de flesta fallen viktigare att materialet inte är poröst och därför är det inte lika viktigt att printingen blir exakt. Tråd och pulvermatning bör därför väljas med hänsyn till komponentens syfte.

DED används idag vanligen till att skapa komplexa geometrier snarare än att användas för lagning och applicera beläggningar likt andra tekniker (Gibson m.fl., 2014, s.245). Vid printing av komplexa geometrier krävs även stödstrukturer som för många andra tekniker. Tekniken kan också användas för att skapa cellulära strukturer vilket möjliggör printing av lättviktslösningar (Bourell m.fl., 2020, s.220). Den är också kapabel till att producera snabbare än PBF-metoden och är även lätt att skala upp till stora volymer. Komponenter gjorda med DED har dålig ytfinhet och kräver ytterligare bearbetning. Metoden är även betydligt dyrare jämfört med andra tekniker.

Exempel på tillämpningar där DED används är bland annat inom företaget AeroMet som med hjälp av tekniken producerade rib-on-plate”komponenter med titanpulver för rymdfarkoster (Gibson m.fl., 2014, s.254-255). I många fall där rymdkomponenter konstrueras tas 80 % av det ursprungliga materialet bort för att skapa komponenten vilket leder till mycket material som går till spill. Genom att AeroMet istället använde sig av DED metoden kunde materialspillet minskas drastiskt.

### 5.3 Binder jetting

Metoden använder en modifierad version av bläckstrålsteknik som används i vanliga 2D-skrivare (Dutta m. fl., 2019, s.18). Binder jetting (BJ) använder en rad olika material som metaller, polymerer och keramik (Gibson m. fl., 2014, s.213). Metoden går ut på att sprida ett lager av pulver liknande PBF med ett ombeläggningsblad, sedan droppas ett bindemedel ovanpå pulvret som binder samman dem där så önskas. Därefter flyttas delen ner och ett nytt lager läggs på, på så sätt byggs en modell som följer en CAD geometri lager på lager (Dutta m. fl., 2019, s.18). Detta kan ses i Figur 4 för illustration.



Figur 4: Schematisk illustration av binder jetting. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

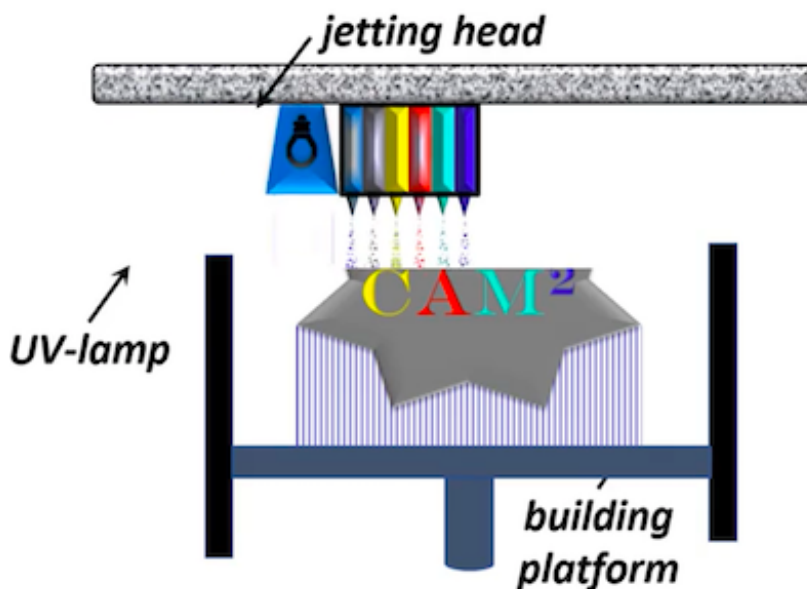
Efter avslutad process rengörs det överskottspulvret med lufttryck (Dutta m. fl., 2019, s.19). Den printade geometrin har sämre mekaniska egenskaper samt innehåller en stor mängd porositeter. Därför läggs den i en ugn för sintring. Därefter infiltreras porositeter i delen med en flytande metall som till exempel brons för att ytterligare förstärka den. Efter sintring krymper delen med ca 20 % (Varotsis, u. å). Beroende på de slutliga kraven på geometrin kan den efterbearbetas.

BJ har sina för- och nackdelar. Fördelarna med BJ är att till skillnad från andra additiva tekniker använder metoden ingen värme under själva byggprocessen (Dutta m. fl., 2019 s.20). Denna metod är oftast mer kostnadseffektiv, kan printa större delar och är betydligt snabbare jämfört med andra AM tekniker. Den har också många fördelar som att flera olika delar kan byggas samtidigt på en enda platta. Under tillverkning av komponenten behövs det inget extra stöd eller byggplatta då delarna stöds av löst pulver i byggkammaren. Eftersom det under printningen inte är värme involverat har delarna inte kvarvarande stress eller snedvridningsproblem. Med denna metod kan en mängd olika material användas och det finns även möjlighet att printa i färg. Det oanvända pulvret kan även återanvändas (Gibson m. fl., 2014, s. 206-207). Dock finns det några begränsningar för metoden. Då delen är porös efter tillverkningen som nämnts tidigare, behövs extra processer så som sintring och infiltration göras vilket leder till ökad processtid. De extra processerna kan leda till krympning av delen så vid design och dimensionering måste detta tas i åtanke (Dutta m. fl., 2019, s.20).

## 5.4 Material jetting

Material jetting (MJ) fungerar på samma sätt som en 2D-skrivare. Ett liknande skrivhuvud som används för vanliga skrivare med bläckstråleutskrift dispenserar ljuskänsliga smältmaterial som stel-  
nar under ultraviolet (UV) ljus och på sätt byggs delen lager för lager (Varotsis, 2022) vilket visas i Figur 5.

Tekniken använde ursprungligen värmehärdande fotopolymerer (akryl) i flytande form. På senare tid har tekniken utvecklats och kan även i viss mån använda metaller, men till följd av det finns det inte vid skrivande tidpunkt många vetenskapliga källor om MJ i metall.



Figur 5: Schematisk illustration av material jetting. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

I MJ värms först den flytande materialet till en viss temperatur för att uppnå den önskade viskositeten (Varotsis, 2022). Därefter rör sig skrivhuvudet över byggplattan och en stor mängd små droppar sprutas ut på förutbestämda platser. En UV ljuskälla som är kopplade till skrivhuvudet används sedan för att stelna vätskan och bygga det första lagret av delen. Efter att första lagret är byggt flyttas delen nedåt och ett nytt lager på samma sätt läggs på och denna process fortsätter tills delen är färdigbyggd.

Det som är unikt med MJ är att metoden disponerar material på ett linjemässigt sätt (Varotsis, 2022). Flera skrivhuvud är kopplade sida vid sida på samma bärare och deponerar material på hela byggplattan på en enda passering. Då det används flera skrivhuvud kan det möjliggöra användning av olika material samt olika färger vid samma printning tillfälle och på samma geometri.

Fördelarna med MJ är att lagren som läggs är väldigt tunna jämfört med andra tekniker eftersom materialet som sprutas ut ur skrivhuvudet är på nanoskala, detta medför en hög precision av de önskade dimensioner och en fin ytfinitet (Varotsis, 2022). Multimaterial och färg funktioner gör det möjligt att skapa realistiska och haptiska prototyper. Delar som printas med denna metod är framförallt för icke-funktionella prototyper då de har dåliga mekaniska egenskaper.

Mycket av printingen relaterad till metaller med denna metod är fokuserad kring elektroniska tillämpningar såsom spårbildning, lödning och anslutningar (Gibson m. fl., 2014, s.181). MJ fungerar på samma sätt som BJ med skillnaden att istället för bindemedlet en smält metall sprutas ut från skrivhuvudet. För MJ med metaller behöver delen sintras för att uppnå den önskade densitet och egenskaper. Tekniken kräver också mycket längre tid att printa ut då lagren som läggs är väldigt tunna. Det är

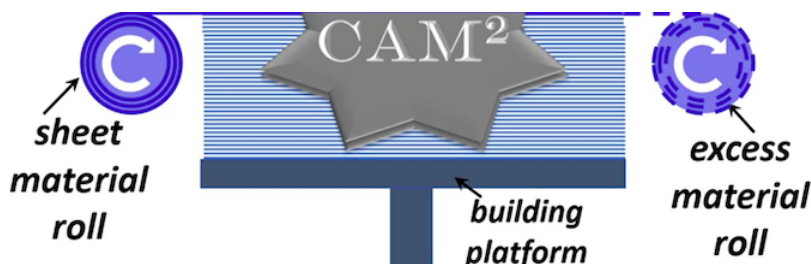


begränsad till små geometri och metoden är relativt dyrt att använda (3DEO, 2020). Metaller som hittills har använts med denna metod är koppar, aluminium, tenn, kvicksilver och olika lödningar (Gibson m. fl., 2014, s.182).

## 5.5 Sheet lamination

Sheet lamination är en teknik där lager på lager lamineras med metallfilmer och bygger upp en komponent (Dutta m. fl., 2019, s.22).

Det finns två tillvägagångssätt; antingen fästa alla metallpapper för att skära ut en kontur eller skära ut konturen direkt och sedan fästa dem. Metallfilmer skärs vanligtvis med en CO<sub>2</sub>-laser (Gibson m. fl., 2014, s.218). En illustration kan ses i figur 6. Två viktiga faktorer för att filmerna faktiskt ska fästas är atomiskt rena metallytor samt direkt kontakt mellan metallytorna (Gibson m. fl., 2014, s.231).



Figur 6: Schematisk illustration av sheet lamination. Används med tillåtelse av Eduard Hryha.

Vid tillverkning med Sheet lamination av metall används ultrasonic additive manufacturing (UAM) (Dutta m. fl., 2019, s.22-23). Först klipps en tunn metallfilm ut som placeras över byggytan, därefter trycker och vibrerar ett svetshorn med ultraljudsvibrationer för att fästa materialet. UAM är en hybridmetod där ultraljudssvetsningen kombineras tillsammans med CNC-fräsning (Gibson m. fl., 2014, s.219). Varje lager svetsas fast för att sedan bearbetas med CNC maskinen, vanligtvis är ett lager fyra metallfilmer. Detta upprepas sedan tills dess att komponenten är komplett. UAM är således en adderande och subtraherande teknik. Eftersom det är en metallskiva som svetsas fast krävs det inte heller några stödstrukturer och i dagsläget används material så som koppar, aluminium eller titan.

Fördelaktiga aspekter med tekniken är att eftersom låga temperaturer används i kombination med additiva och subtraherade tekniker finns potential att bygga komplexa komponenter men även bygga in elektronik som är känslig för värme (Gibson m. fl., 2014, s.229). Begränsningarna ligger istället på att stödmaterial saknas i de kommersiella systemen och flera komplexa komponenter med överhäng kan därför inte byggas.

Nackdelarna med metoden är att material med lägre smältpunkt inte kan användas då de inte hade svetsats fast utan att börja smälta (Dutta m. fl., 2019, s.22-23). Däremot gör svetsningsmetoden det enkelt att kombinera flera material i samma komponent. Fördelen med att kunna svetsa ihop flera olika material i en och samma komponent är att unika kunskaper kan fås. Bland annat används UAM till att sammanfoga koppar och aluminium för att få rätt termiska egenskaper men samtidigt reducera vikten genom att alternera mellan aluminium och koppar (Fabrisonic, 2021). På samma sätt kan material kombineras för att uppnå elektriska eller kemiska egenskaper. Tekniken har också fördelen att den kan bygga stora volymer med hög bygghastighet. Däremot kräver tekniken efterbearbetning vilket leder till mycket skrot.

## 5.6 Val av relevanta tekniker

För att avgöra vilka tekniker som är relevanta måste komplexitetsnivå och mekaniska egenskaper tillhörande de olika teknikerna betraktas. Utifrån teknikernas begränsningar och fördelar utfördes en sällning. Tekniker som väljs att ha kvar är de som anses vara relevanta för komponentens ändamål, det vill säga en komponent i drivlinan.

I Tabell 1 kan en sammanfattning av för- och nackdelar ses av det som tidigare skrivits om respektive teknik. Denna Tabell används för att få en överblick av det mest centrala hos respektive teknik.

Trots att MJ har många bra funktioner och är bättre än andra AM-tekniker i många faktorer, exempel precision av geometrin, möjlighet att ha olika material samt olika färger i en och samma modell under printningen och har homogena mekaniska och termiska egenskaper är metoden mest lämpad till icke-funktionella prototyper. Detta på grund av att delar printade med denna metod har dåliga mekaniska egenskaper. Eftersom materialen som används i metoden är ljuskänsliga, degraderar mekaniska egenskaper ytterligare med tiden. Då en betydande faktor för komponenterna i drivlinan är att de ska ha goda mekaniska egenskaper elimineras denna teknik.

Sheet lamination har uteslutits då de ej uppfyller kravet när det kommer till att bygga komplexa komponenter som samtidigt har tillräckligt höga mekaniska egenskaper. Dessutom har tekniken inte möjlighet till att bygga nätstrukturer vilket är ett sätt att få till en lättviktslösning för komponenten. Ett alternativ till nätstrukturer hade varit dess fördel att kombinera material för att på så sätt göra komponenten enklare. Detta ansågs dock som irrelevant för komponenterna i drivlinan.

BJ valdes främst bort på grund av att komponenter gjorda med denna teknik är mycket porösa, vilket inte är önskvärt. Efterbearbetning kan också leda till krympning vilket måste tas till hänsyn vid val av dimensioner. Trots detta har tekniken positiva egenskaper som att den är snabb och kostnadseffektiv, samt att inga stödstrukturer behövs. Detta väger dock inte upp för de negativa då en porös komponent är sämre än en snabb och kostnadseffektiv, när det kommer till drivlinans komponenter.

SLM och SLS är tekniker som är fördelaktiga när det kommer till att skapa komponenter som behöver stor geometrisk frihet men samtidigt har en hög ytfinhet. SLM/SLS har också en hög noggrannhet vilket behövs vid konstruktion av komponent med hög detaljnivå eller vid cellulär struktur. Komponenterna är inte heller porösa till skillnad från de som printas med hjälp av till exempel BJ, vilket är en viktig egenskap för komponenter hos drivlinan. På grund av dessa positiva mekaniska egenskaper lämpar sig metoden för printing av komponenter hos en drivlina.

EBM är lik SLM/SLS vilket även gör denna till en lämplig teknik att gå vidare med. Det som urskiljer EBM är att den har något sämre ytfinhet samt noggrannhet men är fortfarande bättre än tekniker, exempel BJ och sheet lamination. Genom att använda EBM uppstår mindre restspänningar i komponenten i jämförelse med SLM/SLS på grund av att printingen utförs i vakuum. Både EBM och SLM/SLS har höga kostnader under sin tillverkning men då detta inte är något som tas i beaktning under valet är detta något som förbises.

DED har flera positiva egenskaper lämpade för komponenter inom drivlinan. Bland annat kan denna teknik bygga komplexa geometrier snabbare än bland annat EBM och SLM/SLS. Komponenter printade med denna teknik är heller inte porösa vilket är en eftertraktad mekanisk egenskap. Bygghastigheten är också snabb i jämförelse med andra tekniker. Negativa aspekter av DED tekniken är bland annat att det blir en grövre yta under tillverkning vilket leder till att efterbearbetning krävs. Det behövs också tas hänsyn till materialvalet då materialet som spricker lätt vid temperaturskillnader inte kan användas.

Sammanfattningsvis har det valts att gå vidare med teknikerna EBM, SLS/SLM samt DED för att undersöka vidare vilken av teknikerna som skulle vara mest lämpad för printning av en komponent i drivlinan. Resterande metoder är därför uteslagna och kommer inte att diskuteras vidare inom arbetet.

Tabell 1: Sammanfattning av tillverkningstekniker

| Tillverkningstekniker                                | Fördelar                                                                                                                                                                                                                                                   | Nackdelar                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Electron beam powder bed fusion                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Enkelt att använda med snabbt oxiderande metaller</li> <li>-Mindre restspänningar på grund av arbetsmiljö i vakuum</li> <li>-Hög ytfinhet</li> </ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sämre ytfinhet och noggrannhet än SLS och SLM</li> <li>-Liten byggyta</li> <li>-Hög kostnad</li> <li>-Få material att välja på som dessutom måste vara elektriskt ledande</li> <li>-Lång tillverkningstid</li> </ul> |
| Selective Laser sintring och Selective Laser Melting | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Stor geometriks frihet</li> <li>-Hög ytfinhet</li> <li>-Hög noggrannhet</li> <li>-Lite efterbearbetning</li> </ul>                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Hög kostnad</li> <li>-Lång tillverkningstid</li> <li>-Liten byggyta</li> <li>-Kan ej kombinera material</li> </ul>                                                                                                   |
| Direct energy deposition                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Snabb tillverkning</li> <li>-Kan kombinera olika material</li> <li>-Kan bygga komplexa geometrier</li> </ul>                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Få material finns i trådmatning/pulver</li> <li>-Grövre yta</li> <li>-Måste ta hänsyn till om material spricker lätt vid stelning</li> </ul>                                                                         |
| Binder jetting                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Allt pulver används utan avfall</li> <li>-Inget stöd för strukturen behövs</li> <li>-Flera olika delar kan byggas på en enda platta</li> <li>-Snabb och kostnadseffektiv</li> <li>-Brett materialområde</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Detaljen är porös och kräver extra efterbearbetning</li> <li>-Bearbetningen kan leda till krympning</li> </ul>                                                                                                       |
| Material jetting                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Hög noggrannhet</li> <li>-Stor geometrisk frihet</li> <li>-Hög ytfinhet</li> <li>-Multimaterial</li> <li>-Möjlighet att printa i färg</li> </ul>                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Långsam tillverkning på grund av tunna lager</li> <li>-Begränsade till små geometrier</li> <li>-Dåliga mekaniska egenskaper hos komponenten</li> <li>-Hög kostnad</li> </ul>                                         |
| Sheet lamination                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Kan bygga storskaligt</li> <li>-Materialet smälts inte</li> <li>-Kort tillverkningstid</li> <li>-Kan kombinera olika material</li> </ul>                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Mycket skräpmaterial</li> <li>-Material med låg smältpunkt kan ej användas</li> <li>-Kan bygga in elektronik som är känslig mot värme</li> </ul>                                                                     |

## 6 Material och defekter

Det finns två stora huvudgrupper av material inom AM, den ena gruppen är material i pulverform och är mest förekommande, den andra är material i trådform. Ytterligare en mindre grupp kommer från ultrasoniska metoder där tunn metallplåt används. I detta kapitel presenteras produktionen av pulver för AM, vilka material som är relevanta samt de defekter som kan uppstå.

### 6.1 Produktion av pulver

Bland tillverkningsmetoderna för AM är det vanligast att en pulverbaserade metod används (Bourell m. fl., 2020, s.167-168). För de valda teknikerna är alla pulverbaserade. Metaller i pulverform tillverkas i många olika syften och endast en liten del av denna stora marknad åtgår till additiv tillverkning. I samband med tillverkningsmetodernas natur och krav på komponenter med goda mekaniska egenskaper behövs pulver av hög kvalitet. Det finns många olika tillverkningsmetoder för pulver varav inte alla är lämpliga för additiv tillverkning.

#### 6.1.1 Gasatomisering

Den vanligaste metoden för pulvertillverkning är atomisering av olika slag, bland dessa är gasatomisering mest förekommande (Dutta m. fl., 2019, s.78-79). Metoden innefattar oftast att en smälta matas genom ett munstycke, ibland även med trycksatt gas som driver på. Vanligast är dock att gravitation får driva flödet av material. Smältan träffas sedan av gas med hög hastighet för att separera partiklarna i mindre droppar, som vid stelning blir pulver. Många atomisationsprocesser är liknande och kan producera olika kvaliteter, nämnvärt är plasma atomization (PA). Metoden använder metalltråd som utgångsmaterial och en plasma-blåslampa för att smälta materialet tillsammans med en trycksatt gas. Detta resulterar i ett atomiserat pulver. Generellt kräver metoder som producerar högre kvalitet av pulver mer tid som resulterar i högre kostnad. Beroende på hur reaktivt materialet är används olika gaser, exempelvis luft, kvävgas, helium eller argon.

#### 6.1.2 Plasma spheroidization

Plasma Spheroidization (PS) är en process som använder sig av högintensiv energi för att producera pulver av hög kvalitet (Sehhat m. fl., 2022). Metoden används för att förfina pulver av sämre kvalitet tillverkat genom exempelvis en mekanisk metod. Pulvret matas genom ett av flera munstycken, beroende på materialkvaliteten. Varje enskilt pulver smälts sedan och återformas till en sfärisk form. Pulvret har god kvalitet med få satelliter eller interstitiella partiklar. På grund av den mindre partikelstorleken associerad med metoden är processen långsammare vilket resulterar i en högre tillverkningskostnad.

#### 6.1.3 Mekaniska metoder

Som ett första steg i processen av att producera pulver för AM kan mekaniska metoder användas (Dutta m. fl., 2019, s.79-80). I många fall är det inte lämpliga, och metoderna nämnda ovan, med undantaget av PS, använder sig inte av förarbetat pulver. Mekaniska metoder innebär att krossa och slipa material för att få de i pulverform. En egenskap av pulver producerat med mekaniska metoder är att formen är varierande och vanligtvis inte sfärisk.

#### 6.1.4 Kvalitet av pulver

För att få en jämn deposition av material och undvika defekter är ett konstant flöde av material viktigt. I de fall pulvret finns i många olika storlekar och former kan detta resultera i att olika mängder material deponeras. Alltså är pulverflöde och pulvrets förmåga att packas viktigt för komponentens kvalitet.

Pack-densiteten kommer slutligen att påverka lagertjocklek och krympning i PBF processer som i sin tur har en effekt på vilka defekter som kan uppstå (Dutta m. fl., 2019, s.84). Pulvrets morfologi påverkar här även hur det blir utspritt, där olika former kan innebära att pulverpartiklarna fastnar på varandra för att skapa olika densiteter och eventuell porositet. Även för DED är det viktigt att använda pulver av nära sfärisk form för att garantera ett konstant flöde av material.

Viktiga egenskaper som påverkar kvalitet är följande (Bourell m. fl., 2020, s.168-171).

- **Partikelstorlek** är en viktig parameter för de tillgängliga tillverkningsmetoderna. För många metoder krävs en diameter på pulvret mellan 20-200  $\mu\text{m}$ . Många pulvertillverkningsmetoder tillverkar pulver i en större storlek, en fin storlek är ofta räknat som under 1 mm i diameter. Egenskapen sätter en undre gräns på den minimala lagertjockleken och påverkar även ytfinheten av den färdiga komponenten.
- **Particle Size Distribution** är en av de viktigaste egenskaperna som beskriver fördelningen av pulvrets olika storlekar. Egenskapen kommer ha stor påverkan på hur väl pulvret flyter. Ofta är pulverstorleken normalfördelad, ju lägre standardavvikelse i ett pulver desto högre är dess pris och kvalitet.
- **Morfologin** för pulvret, alltså dess form i mikroskala, är relevant för många egenskaper. Oftast föredras sfäriskt pulver för att förbättra hur pulvret flyter samt hur det smälts ihop. Problematiken återfinns i att många metoder producerar pulver av ojämn form.
- **Satelliter** är en defekt i pulver som kan uppstå vid exempelvis atomisation. Defekten innebär att en mindre pulverpartikel har smälts ihop med den större partikeln under stelning. Det kan resultera i att flödet av partiklar påverkas, men kan även påverka densiteten i den färdiga komponenten.
- **Interstitiella partiklar** är mindre smutspartiklar som samlats mellan pulver som kan påverka flödet negativt. Inklusioner/Interstitiella partiklar kan uppstå från osmälta partiklar. En partikel utan bindning till material i närheten kan vara utgångspunkten för en spricka.

## 6.2 Material relevanta för AM

Historiskt sett har få metaller kunnat tillämpas på additiv tillverkning för att metodens krav inte stämt överens med den materialkvalitet som gått att producera (Bourell m. fl., 2020, s.167-168). Över tid har fler material tillkommit för additiv tillverkning. Vanligast bland dessa metaller är legeringar baserade på titan, aluminium, stål och nickel. Olika metaller lämpar sig även för olika tillverkningsprocesser och användningsområden.

### 6.2.1 Ti-6Al-4V

Titan är ett av de mest förekommande materialen inom additiv tillverkning, speciellt för PBF-tekniker (Bourell m. fl., 2020, s. 333). Komponenter producerade i titan kan ge liknande och i många fall bättre mekaniska egenskaper än dess traditionellt tillverkade motsvarighet. Legeringen Ti-6Al-4V är dominerande och framkom från användning i rymd och sjukvårdsindustrin. För rymdindustrin presenterar titan möjligheter genom att det har en högre styvhet per vikt än många andra material. Sjukvårdsindustrin har tillämpat materialet genom att producera biokompatibla proteser.

Bland de valda tillverkningsteknikerna, DED och SLM-PBF, fungerar båda för titan och används ofta (W. . Liu m. fl., 2020, Saboori m. fl., 2017). Gemensamt för teknikerna är att komponenterna håller god hållfasthet och kan produceras med hög ytfinhet. Snabb nedkylning leder till finare materialstruktur och tillhörande bättre hållfasthet än traditionella metoder. Kvarvarande stress i materialet kommer göra det starkare i statisk belastning, dock förkortar det töjningen innan brott. Genom att komponenten genomgår HIP kan dessa spänningar åtgärdas och porositet minskas.

Delar gjorda med DED kan vara av en högre styrka än traditionellt producerande motsvarighet (Saboori m. fl., 2017), detta till följd av de höga kylningshastigheterna som leder till en finare mikrostruktur. För höga cykelantal är det viktigt att porositet i allmänhet inte finns, även inne i kroppen. För lägre cykelantal är det ytan som är största faktorn (Kan m. fl., 2022).

### 6.2.2 Rostfritt stål & Snabbstål

Stål är ett av de material som är vanligast förekommande inom industri som använder sig av traditionella tillverkningsmetoder. Inom AM är det också förekommande men inte till en fullt lika stor utbredning då stålet lätt kan bli sprött på grund av snabba temperaturförändringar (Bourell m. fl., 2020 s.354-355). Därför används främst ställegeringar som är enkla att svetsa med och som tål att temperaturen ändras fort utan att de mekaniska egenskaperna tar allt för mycket skada.

#### Snabbstål

Snabbstål är ett material som används främst i sammanhang där hög värme utvecklas exempelvis vid borrar och fräsning (Höganäs, 2022). På grund av materialets egenskaper som hög slitstyrka, seghet och hårdhet är det ett lämpligt val för komponenter utsatta för krävande miljöförhållanden.

En av de vanligaste typerna av snabbstål för AM heter M2 High Speed Steel (HSS). HSS legeringen innehåller volfram, molybden, krom, vanadin, kol, magnesium och kisel som utgör upp till 18-19 % av stålet (Kempen m. fl., 2014). Det är dessa legeringsämnen som ger HSS utmärkt nötningsbeständighet och temperaturegenskaper. Den höga hårdheten i materialet resulterar i en lägre formbarhet. Materialet anses även vara icke-svetsbart vilket har lett till att det inte har varit lika stor fokus på att använda AM med denna metall (Saewe m. fl., 2019). Med ett ökat behov av att använda AM för nya tillämpningar har intresset för nya legeringar som HSS växt.

Där höga mekaniska egenskaper är av betydelse används ofta varianter av HSS-stål, exempelvis M2 och M3 (Höganäs, 2022). Utmaningen med att använda L-PBF för detta material är att höga termiska spänningar kan orsaka sprickor och delaminering. För att eliminera riskerna för sprickbildning och delaminering bör de termiska spänningarna reduceras. Detta kan åstadkommas genom att förvärma basplattan till en viss temperatur (Kempen m. fl., 2014).

#### Rostfria stål

Rostfria stål är något som används mycket inom till exempel bil-, medicin- och energiindustrin. Rostfria stål används ofta där krav på styrka och/eller hög korrosionsresistans är viktigt. Materialet är redan 100 % återvinningabart och passar bra att använda med AM-metoder som PBF och DED (Johnson m. fl., 2008). Vanliga defekter inom additiv tillverkning för stål är att delen kan ha olika blandningar av ferrit, austenit och martensit på grund av att avsvälningen i materialet kan variera. Detta kan bidra till lokala svagheter som behöver efterbehandling för att lösas (Wang och Su, 2021).

Generellt för additiv tillverkning så är porositet en vanlig defekt men med optimala maskininställningar så kan en densitet på 99.9 % uppnås i flera byggriktningar (Tolosa m. fl., 2010).

I somliga fall finns det också resultat som visar på att AM är bättre än traditionellt tillverkade (varmt smidda) testbitar av samma material (Wang och Su, 2021). Olika byggriktningar används i de här fallen för att få bättre resultat i sträckgräns och töjning jämfört med andra. Hårdhet har också testats och resultaten är likvärdiga med traditionellt framtagna testbitar i samma material. Vidare så är lack of fusion (LOF) defekter också vanliga för stål där materialet inte helt smälts. Då bildas luft eller gasfickor inom materialet som kan leda till intern sprickbildning under dynamisk last.

### 6.2.3 Nickel-legeringar

En av de vanligaste legeringarna som används inom AM är nickel-legeringen Inconell-718 (Huynh m. fl., 2022 s.88). Fördelen med legeringen är dess goda svetsbarhet samt termiska egenskaper. Den är också stabil vid höga temperaturer. Nickelbaserade superlegeringar har väldigt goda mekaniska egenskaper upp till 90% av dess smältpunkt. Detta gör materialet passande för tillverkning med AM till exempel inom flygindustrin för delar till motorerna. Traditionella metoder som gjutning och smidning har blivit etablerade för Inconell-718 men det finns potential för en snabbare produktion samt mer komplexa geometrier när det används inom AM, speciellt med pulverbäddsmetoder (Bortoluci Ormastroni m. fl., 2022). Det som gör processen snabbare är att vid traditionell tillverkning av produkter gjorda av Inconell-718 behöver först gjutas och sedan bearbetas med en avverkande metod för att uppnå slutresultatet. Detta medför längre ledtid för produkten jämfört med om den tillverkas med AM (Bilgin m. fl., 2020).

Legeringen är användbar inom flera olika sorters tekniker för AM till exempel EB- och SLM-PBF (Nishikawa m. fl., 2022). Beroende på vilken teknik som används för materialet så får det också olika mekaniska egenskaper. SLM- och EB-PBF är de metoder som ger bäst egenskaper för denna legering. När laser används är hastigheten och styrkan av lasern viktig för materialet, en för låg hastighet kan ge upphov till att gas fångas in i materialet och skapar porer (Huynh m. fl., 2022 s.90). Är hastigheten för hög så kan lasern missa att smälta allt material vilket också påverkar hållfastheten negativt. Styrkan på lasern behöver följa hastigheten, en högre hastighet kräver högre styrka.

### 6.2.4 Aluminium-legeringar

Materialet aluminium är ett bra alternativ för additiv tillverkning. Vissa utmaningar har varit relaterade till materialet till följd av dess höga reflektivitet och termiska konduktivitet. Ofta används SLM-PBF för att tillverka komponenter i aluminium. Den höga reflektiviteten innebär då (runt 95% för standard våglängd 1064  $\mu\text{m}$ ) att en högre energiintensitet frekvent används (Artzt m. fl., 2020). En högre termisk konduktivitet innebär också att mycket av värmen i smältan sprids till andra delar av materialet. Kombinationen av dessa egenskaper har i många fall inneburit att det varit svårt att tillämpa en laser med lägre effekt än 150 W (Louvis m. fl., 2011 s.276). Materialet har även fördelen att en högre energiintensitet och skrivarhastighet kan användas tillsammans, som resulterar i en högre bygghastighet. Den högre bygghastigheten av aluminium gör det till ett mindre kostsamt material att tillverka med AM (Buchbinder m. fl., 2011). Om en hög energiintensitet inte tillämpas resulterar det i en komponent med hög porositet.

Ytterligare ett problemområde som kan ge upphov till defekter för aluminium är dess goda förmåga att bilda ett tunt oxidskikt på ytan av materialet (Louvis m. fl., 2011 s.283). Detta oxidskikt bildas även vid låga syrehalter och kan påverka mängden defekter genom att material inte sammanbinds. Trots dessa negativa egenskaper kan komponenter med god hållfasthet skapas med låg porositet. Bra mekaniska egenskaper fås generellt genom att ha en hög effekt på laser tillsammans med en hög skrivarhastighet. Komponenter producerade på detta sätt kan ha mekaniska egenskaper bättre än traditionellt smidda komponenter.

### 6.2.5 Val av relevanta material

Utifrån de material som vanligtvis används i en drivlina finns det olika tillämpningar för de material beskrivna ovan. Inom vissa delar av drivlinan där högre temperatur är vanliga kan en nickellegering med fördel användas, då dessa även i AM har väldigt god temperaturbeständighet. I andra fall är inte nickellegeringar av stort intresse, då dess höga pris och mekaniska egenskaper kan ersättas av andra material.

För många vanliga tillämpningar kommer rostfritt stål att lämpa sig väl. Rostfritt stål och titan lämpar sig väl i frätande miljöer och där goda mekaniska egenskaper behövs. I fall där en lägre vikt

inte är av stort behov kan rostfritt stål väljas över titan, men just för drivlinan är vikten av stor betydelse. I de fall där det är färre krav på hållfasthet är aluminium även ett lämpligt val.

## 6.3 Defekter

En stor del av att producera en komponent är att kunna säkra kvaliteten av delen och tillhörande tillverkningsmetod. För AM har det framkommit egna specifikationer och föreskrifter för att certifiera komponenter producerade med AM från ASTM (Sprinkle, 2020). Många olika defekter finns för AM vilka inte är helt olika de som finns i svetsning. Defekterna kan påverka en komponents mekaniska hållfasthet och dess livslängd negativt. Några av de mest betydelsefulla egenskaperna är porositet, termiska spänningar och ytfinhet. Defekter kan uppstå från många anledningar där ett av de viktigaste områdena är val av processparametrar. För att kunna säkra kvaliteten av en komponent behöver tillförlitliga metoder för att upptäcka fel finnas. Många metoder existerar, där ett flertal använder icke-destruktiva metoder för att få en uppfattning om en komponents struktur.

### 6.3.1 Viktiga egenskaper för utmattningstålig/stark komponent

- **Porositet** är den faktor som har identifierats som viktigast för additiv tillverkning. Porer är en stor anledning till varför mekaniska brott uppstår på grund av att små sprickor kan initieras och dras vidare från en större eller mer avlång por (Tryon m. fl., 2020).
- **Ytfinhet** är av stor betydelse för livslängden hos en komponent producerad med AM. Många defekter är lokaliserade kring ytan och sprickor kan initieras från dessa. Här finns i vissa fall ofullständigt bundet pulver som kan leda till sprickor (Dutton m. fl., 2020, s. 12).
- **Termiska spänningar** förekommer för många AM metoder i samband med de stora temperaturgradienterna som uppstår när lokala delar har en avsevärt högre temperatur (Dutton m. fl., 2020, s. 10). Spänningarna kan leda till exempelvis delamination eller sprickor i komponenten.

### 6.3.2 Processparametrar

För AM finns många processparametrar som behöver fastställas för varje specifik komponent, material och tillverknings teknik. De vanligaste processparametrarna, som är liknande för de flesta processerna är; energidensitet, lagertjocklek, skrivarhastighet, hatch spacing.

Processval, som det finns många av för AM, utgör en stor anledning till varför defekter kan komma att uppstå. Ett viktigt begrepp är energiintensitet som påverkar många material och tillhörande egenskaper olika. En stark laser, en laser som använder en hög effekt, tillsammans med en långsam skrivarhastighet leder till en hög energiintensitet. En hög energiintensitet är fördelaktig för vissa material, exempelvis aluminium, men inte lika tillämpbar på andra, exempelvis stål (Louvis m. fl., 2011). En högre laserstyrka kan generellt innebära att bygghastigheten kan höjas utan att energiintensiteten påverkas negativt. En låg energiintensitet kommer istället resultera i ofullständig smältning eller LOF. För material med hög reflektivitet, till exempel guld, silver eller koppar, är ett byte från laser till elektronstråle relevant för att öka absorptionen av energi. Aluminium är ett material precis på gränsen för denna reflektivitet. En för hög energiintensitet kan leda till en stor och svårkontrollerad smälta av material som kan resultera i deformationer eller delamination som ett resultat av den snabba avkylningshastigheten och resulterande kvarvarande spänningar. En högre energiintensitet kan även leda till förlust av legeringsmaterial för vissa ämnen som aluminium, magnesium, mangan, zink och krom (Dutta m. fl., 2019, s.28). Utöver det innebär mer komplexa och tunna väggar som byggs med AM desto större är risken för att defekter uppstår under produktionen (du Plessis m. fl., 2020 s.12). Deformationer och vibrationer som uppstår i en komponent kan i sin tur göra att pulver omfördelas och leder till porositet.



Ytfinhet är en av de viktigare aspekterna som kommer avgöra om en komponent har en god mekanisk hållfasthet eller inte. Detta för att många sprickor initieras vid ytan, som ett resultat av en ojämn yta. Efter att en dragprovstav polerats och jämförts med den obearbetade staven, båda tillverkade med L-PBF i Ti-6Al-4V uppvisade den bearbetade staven en utmattningsspänning mer än dubbelt så hög den av den obearbetade provstaven (Wycisk m. fl., 2014). Den obearbetade staven hade en ytfinhet på 12 mikrometer från en lagertjocklek på 30 mikrometer och laser på 200 Watt. En lägre gräns för den ytfinhet en komponent uppvisar är kopplad till pulverstorleken och tillhörande lagertjocklek, där ytfinheten vanligen blir finare än lagertjockleken och/eller pulverstorleken. Andra parametrar med inflytande över ytfinheten är hatch spacing. En liten hatch spacing eller lagertjocklek leder till en bättre ytfinhet då endast ett par pulverpartiklar smälts med en tillhörande liten smälta. Skrivarhastigheten är också en parameter med inflytanden på ytfinheten. En hög skrivarhastighet leder till en ojämn yta i många fall, i vissa fall som en följd av en inkomplett smältning, men oftare på grund av att en stor smal smälta kan bilda mindre droppar och tillhörande dålig yta. Dessa fyra viktiga parametrar för en god ytfinhet, pulverstorlek, hatch spacing, lagertjocklek, skrivarhastighet resulterar allihopa i att en låg ytfinhet är kostsamt. Det är därför i många fall fördelaktigt att tillverka en komponent med sämre ytfinhet och sedan efterbearbeta med exempelvis shot peening.

Från termiska spänningar kan många defekter uppstå. Det ger i många material en med ett par procent, med tillhörande nedsatt förlängning innan brott. Som en följd av de termiska spänningarna kan även delamination eller sprickor uppkomma (Kempen m. fl., 2014). För att förhindra att sprickor uppstår kan en uppvärmning av basplattan minska den termiska övergången från materialet genomgår och skapa en jämnare temperaturfördelning som i sin tur minskar de termiska spänningarna. Defekten gör komponenten oanvändbar eller påverkar dess utmattningsförmåga avsevärt. En vanlig åtgärd för att förhindra att sprickor eller delamination sker är efterbehandlingar genom exempelvis hot isostatic pressing (HIP). Denna process minskar de termiska spänningarna i komponenten samtidigt som små porositeter stängs.

### 6.3.3 Mäta defekter, kvalitetssäkra komponenter

Många system existerar för att undersöka en komponents kvalitet där flertalet använder icke-destruktiva metoder. En vanlig metod mäter defekter genom röntgen i tre dimensioner för att få en omfattande bild. En annan vanlig undergrupp av kvalitetssäkrande metoder är in-situ granskning (Kim m. fl., 2018, s.657). In-situ granskning innebär att depositionen eller bindningen av materialet granskas i realtid vilket ger möjligheter som att ändra depositionsstrategi för att korrigera för defekter eller maximera vissa egenskaper.

Den vanligaste metoden passande för att undersöka defekter hos komplexa komponenter gjorda med AM har visat sig vara röntgen tomografi på grund av dess effektiva användning av tid och kostnad (du Plessis m. fl., 2020, s.9-11). Röntgen kan undersöka vart defekterna är placerade men också storleken på de. AM-tekniker utförda med pulver har visat sig vara speciellt komplexa när det kommer till de defekter som kan komma att uppstå. Bland annat gäller det porstorlek samt pordistribution i komponenten men även formen på porerna. En viktig del till att man också väljer att använda sig av detta är för att förbättra sina processparametrar eftersom de hjälper till att minska defekterna i produktion.

In-situ granskning använder flera olika sensorer, ofta termiska för att undersöka smältan eller härdningsprocessen. Från kunskap om hur smältan uppför sig, i kombination med omgivning och andra egenskaper kan då beslut fattas om de defekter som uppstår (Kim m. fl., 2018, s. 659). I vissa fall kan även depositionsstrategin eller andra parametrar ändras under tillverkningsprocessen för att korrigera för vissa defekter som uppstått eller för att förändra egenskaperna hos komponenten. För större komponenter är detta extra relevant då vid röntgenbaserade metoder tappar effekt vid en viss tjocklek, på detta sätt kan istället varje del av tillverkningsprocessen granskas genom kameror och sensorer, som sedan kan ge värdefull information kring hur defekter utvecklas och under vilka svårigheter.

### 6.3.4 Åtgärder för att öka kvaliteten

En åtgärd för att öka kvaliteten hos en komponent är bland annat att använda sig av HIP. Det är en teknik där ytterligare förtätning av materialet bildas (Campbell och F, 2008, s.619). Fördelar med att använda denna typ av teknik är att mikrostrukturen i metalldelarna förbättras samtidigt som den stänger till porer i materialet (du Plessis m. fl., 2020, s.9-10). Detta görs genom att producera ett isostatiskt tryck i en kammare full av gas, det vill säga applicera ett jämnt tryck över hela komponenten. HIP är också en teknik som är mer mottaglig till att göra komplexa strukturer. För exempelvis titan ligger temperaturen i kammaren på 850 - 950 °C i ett tryck på omkring 103 MPa i cirka två till tre timmar.

Trots HIP teknikens effektivitet när det kommer till förbättrad kvalitet har det visat sig att andra tekniker också behövs tas i beaktning, speciellt när det kommer till porer precis under ytan samt ytans grovhet (du Plessis m. fl., 2020, s.10-11). Detta för att stärka de mekaniska egenskaperna ytterligare. Bland de två vanligaste teknikerna för metall är shot peening samt laser shock peening (LSP). Shot peening är en teknik där upprepande höghastighets kulor skjuts på materialet (Yadroitsev m. fl., 2021, s.245-276). Detta i sin tur skapar tryckspänningar under ytan. Stötarna från kulorna har visat sig leda till minskning av defekter på materialets yta samtidigt som mikrostrukturen förbättrades. LSP å andra sidan är en teknik som är mer vanlig att använda sig av inom AM för att förbättra de mekaniska egenskaperna. Den skjuter en pulserande laser på materialet som leder till kvarvarande kompressionsspänningar i materialet. Hur effektivt LSP är beror på vilken laserenergi som används, laserpunktsstorleken och laserpulslängden. Att använda sig av LSP leder till förbättrade mekaniska egenskaper och tekniken har visat sig vara effektiv när det kommer till att minska kvarvarande spänningar.

Behandlingar för att förbättra de mekaniska egenskaperna hos produkter gjorda genom svetsning görs med Ultrasonic impact treatment (UIT) (Yadroitsev m. fl., 2021, s.245-276). Likt de andra teknikerna i det föregående stycket skjuts även här mot materialet men nu istället med högfrekvanta ultraljudsvågningar. Ultraljudet korrigerar deformationer i materialet och förbättrar utmattningshållfastheten. I ett test utfört på komponenter gjorda med L-PBF av visade sig UIT även leda till förbättrade egenskaper som bättre ytfinhet och mindre porositet. Nackdelar som uppstår vid användandet är att ultraljudet kan göra att pulver fastnar längs kanterna av materialet vilket ger en sämre noggrannhet.

## 7 Drivlina

I detta kapitel förklaras drivlinans uppbyggnad och dess komponenter.

### 7.1 Uppbyggnad av elektrisk drivlina

Drivlinan kan delas in i ett par grupper; motorn, transmissionen och komponenter efter transmissionen (Lesics, 2017). Det var inte inom arbetets omfång men innan motorn finns det en omvandlare och ett batteri, två väldigt viktiga komponenter för bilens funktion. Processen initieras genom att batterier skickar likström till omvandlaren som konverterar likströmmen till växelström. Växelströmmen går i sin tur vidare till en motor, vanligtvis en induktionsmotor eller PMSM-motor (Permanent Magnet Synchronous Machine-motor) (Karthik, 2020). Motorn omvandlar strömmen till rotation, och sedan växlas varvtalet ner genom en transmission. Efter transmissionen kommer en drivaxel som överför och utväxlar rotationen till en differential. Differentialen har som uppgift att låta fordonets hjul rotera med olika hastigheter, vilket krävs vid en sväng då de yttre hjulet har en längre väg att röra sig. Det gör även att bilen kan hantera situationer då grepp med vägbanan äventyras. Från differentialen går drivaxlar till hjulen som ska driva fordonet. Ett hjul består av en fälg och ett däck som bär last och överför rotation.

### 7.2 Elektrisk motor

Motorns uppgift är att driva fordonet framåt eller bakåt. De elektriska motorerna har möjligheten att återvinna energi när fordonet bromsar genom att vända på det magnetiska fältet i motorn (Day, 2014). Det finns flera olika sorters motorer, men de vanligaste typerna som används inom bilindustrin är induktionsmotorn samt PMSM-motorn (Hanejko, 2022). Motorerna består utav en stator och en rotor, statorn omsluter rotorn (Badin, 2013). En PMSM-motor har magneter i statorn och beroende på hur magneterna placeras får motorn en varierande reluktans. Både PMSM-motorn och induktionsmotorn är starka och har en hög effektivitet. PMSM-motorn är relativt ny men den har potential till att bli både lättare och medge högre prestanda (Hanejko, 2022). Rotorn för en PMSM-motor kan vara intressant att tillverka med AM eftersom den behöver håll med bra precision där magneterna placeras.

### 7.3 Komponenter i växellåda

I detta kapitel uppmärksammas elektrifierade bilars komponenter i dess växellåda och deras ändamål.

- Transmissionshuset är den komponent som omsluter kugghjulen, tillhörande axlar och håller oljan. Oljan har syftet att kyla och minska friktion mellan roterande komponenter i transmissionshuset. Många komponenter är även monterade utanpå huset, exempelvis oljefilter och tillhörande pump.
- En serie av kugghjul befinner sig i transmissionshuset och utför dess största funktion, att överföra och utväxla rotation från motorn till drivaxeln och sedan hjulen (Lesics, 2017). Kugghjulen är ofta sneda kugghjul för att minska lasterna på dess tänder. Kugghjulens uppgift är att få rätt utväxling ifrån motorns varvtal till hjulens varvtal.
- Lager sitter runt axlarna för att de ska rotera med minskad friktion och håller den på plats.
- Axel överför roterande kraft, de går ifrån motorn till kugghjul samt från växellåda till hjul.

Till skillnad från traditionella drivlinor har inte elektrifierade drivlinor samma behov av en transmission med flera växlar (Farfan-Cabrera, 2019). Detta då det effektiva spannet av varvtal på en elmotor är mycket större, cirka tre gånger så stort som hos en förbränningsmotor.

## 7.4 Komponenter efter växellåda

Detta underkapitel ämnar att beskriva komponenterna efter transmissionen i en drivlina.

- Ut från växellådan kommer en axel som kallas för **transmissionsaxeln**, och har som syfte att överföra rotationen från transmissionen till differentialen (Peng, 2021). Denna axel har för elbilar ofta endast en eller två utväxlingsmöjligheter från transmissionen, och är på så sätt betydligt enklare än motsvarande axel för en traditionell drivlina med en internal combustion engine (ICE). Axeln bärs upp av lager för att minska friktionen vid rotation.
- En **differential** tillämpas i drivlinor där det önskas att utgående axlar ska kunna ha olika hastigheter (Whitehead, 2021). Det vanligaste förekommande tillfället då detta är relevant är för drivlinor som behöver kunna svänga, där det är nödvändigt för de utgående axlarna att rotera med olika hastigheter. Differentialen får in rotation från transmissionsaxeln och utifrån behovet av rotationshastighet i vardera hjul roterar ett kugghjul inne i differentialen för att möjliggöra detta.
- Ut från differentialen kommer två **drivaxlar**, kopplade till varsitt hjul (Harvan, 2021). Drivaxeln har som syfte att överföra rotation utan att ändra rotationshastigheten, det vill säga utan en utväxling.
- På drivaxeln monteras hjulet som består av ett däck och en **fälg**, där däckets är i kontakt med marken (WheelsASAP, u. å). Från drivaxeln överförs rotationen till fälgen som i sin tur är kopplat till däckets. Fälgar är uppbyggda av ett centrum med ekrar ut till fälgbanan som är en tunn profil, däckets monteras utanpå fälgbanan.

## 8 Val av komponent för demonstrator

Detta kapitel har som syfte att diskutera möjligheter och svårigheter för AM, för några relevanta komponenter i den elektrifierade drivlinan. Valet görs främst för att kunna producera en demonstrator och visa AM:s förmåga.

Vid slutet av drivlinan finns fälgen, en av de ofjädrade komponenterna i drivlinan. Att en komponent är ofjädrad innebär att det befinner sig efter dämpningssystemet och är alltså odämpad. Eftersom hjulet är ofjädrad vikt finns det fördelar att göra detta lättare då en lägre ofjädrad vikt ger bättre köregenskaper (Frishfelds m. fl., 2018). En lättare vikt kan reagera snabbare på oregelbundna vägar vilket ökar kontakten med marken som leder till bättre väggrepp samt styrning. Däcken kan även få längre livslängd eftersom det blir mindre oscillationer av en lättare fälg. Accelerationen kan öka något med lättare fälgar då tröghetsmomentet hade varit lägre. Fälgen är en komponent som belastas med en stor roterande last från drivaxeln samt en punktlast från kontakten med marken. Att tillverka komponenten med AM hade kunnat ge vissa fördelar, främst genom att göra den lättare. Komponenten gjuts vanligen först i aluminium och sedan bearbetas anläggningsytor för att förbättra ytfinheten. Fälgen i dess yttre delar är tunnväggig redan idag och hade inte troligtvis inte klarat av att vara tunnare eller med andra struktur. I ekrarna kan fackverksstrukturer inkorporeras för att minska vikten av fälgen. I detta sammanhang hade fälgen lämpats som en demonstrator.

En annan relevant komponent från den elektrifierade drivlinan är dess transmissionshus. Transmissionshuset tillverkas traditionellt med gjutning och följande efterbearbetning (Magma, 2018). Karakteristiskt för ett hus är dess form som redan är relativt topologiskt optimerad, med stödstrukturer inbyggda i formen. Komponenten är solid, vilket ger vissa förbättringsmöjligheter för tillverkning genom additiva metoder. För transmissionshuset finns det möjlighet att integrera vissa funktioner, exempelvis en förmåga att leda kylarvätska genom delar som blir extra varma eller att förbättra akustiska egenskaper för materialet. Transmissionshuset utsätts inte för stora laster, något som även talar för att AM kunnat tillämpas med viss fördel. Däremot är det även en komponent som kan presentera vissa svårigheter. För att kunna göra huset lättare behöver tunnväggiga strukturer användas, vilket i kombination med den allmänna designen av ett transmissionshus innebär att arean per höjdenhet är låg vilket innebär utnyttjandet av byggvolym är låg. Att byggd area per höjdenhet är liten innebär i sin tur att produktionstiden (och tillhörande kostnad) är hög. Utöver det medförs vissa risker för att komponenten går sönder under tillverkning som följd av de höga tunna väggarna då höga tunna väggar kan skjuva sig enkelt (Kranz m. fl., 2015).

Drivaxeln är också bra att titta på men den är svårare att tillverka på grund av dess form, men i större serier är detta inte ett lika stort problem. Den blir utmattningsskänslig i samband med att kugghjulen är integrerade. Drivaxlar tar en främst skjuvande last, vilket AM är lämpad för att hantera. Många drivaxlar har tillverkats ihåliga genom smidning med goda resultat vilket talar för att AM hade kunnat vara lämplig (Schmieder och Kettner, 1997). Lasterna för axeln är koncentrerade längre ut i axeln, längs dess rand, som har resulterat i att strukturen närmare centrum utsätts för näst intill ingen last. Detta resulterar i en optimerad topologi som blir starkare med radien. Ett problem med denna struktur är att den största lasten kommer vara på ytan av axeln, ett av AM:s problemområden är just ytfinhet och de sprickor som kan uppstå som ett resultat av defekter nära ytan. Efterbehandling i form av slipning och HIP-behandling kan vara nödvändiga steg för att ge en välfungerande komponent.

Den komponent som valts att tas vidare för att producera som demonstrator är fälgen. Fälgen lämpar sig som demonstrator då det verkar finnas förbättringspotential att göra den lättare med AM. Komponenten överför ett moment och är punktlastad, som en följd av roterande lasten är fälgen känslig för utmattning. Topologin för komponenten kan troligtvis optimeras för att minska vikten, särskilt i ekrarna där lasten inte är lika stor. I ekrarna hade då en fackverksstruktur eller liknande tillämpats för att minska fälgens vikt, detta i samband med de överhäng som är vanliga i en fälg lämpar sig inte DED för att producera fälgen som beskrivet ovan. De andra valda teknikerna kan producera komponenter med både överhäng och detaljerade strukturer.

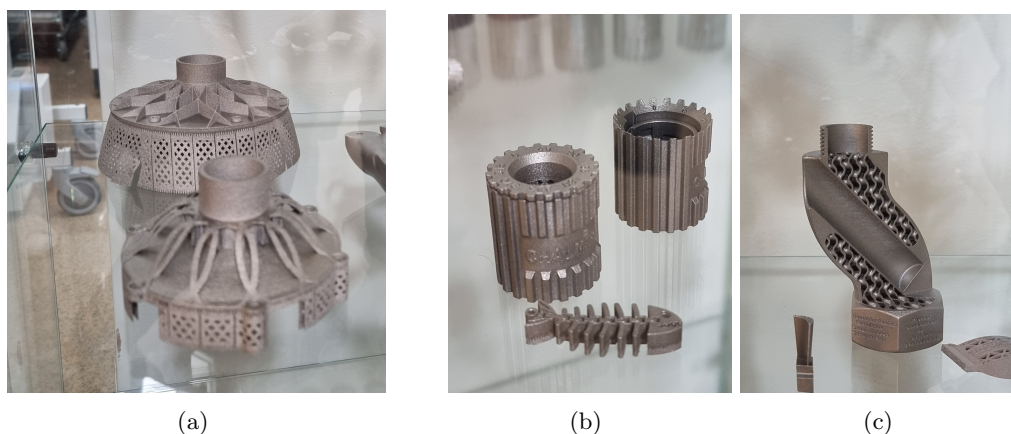
## 9 Tillämpningar med AM

I detta avsnitt undersöks på vilka sätt AM kan tillämpas för att skapa en lättviktslösning för det valda komponenten. Detta kommer att göras genom att undersöka tillämpningar så som depositionsstrategi, olika strukturer samt hur design för AM görs. Det kommer även att undersökas vilka tillämpningar som tidigare gjorts på drivlinans komponenter och vilken förbättringspotential det medfört.

### 9.1 Tillämpning

Tidigare tillämpningar av AM i fordonsindustrin har bland annat gjorts av BMW. De har använt AM för att tillverka små men komplexa komponenter för olika fordonskomponenter men också för att utföra utveckling och validering ("The BMW Group", u. å). Andra företag som tilläpbat AM på fordonskomponenter är Porsche som valde att printa ett e-drivhus med en viss form av cellulära stukturer ("E-drive housing", 2020). Printningen skedde med tekniken SLS och därefter användes topologioptimering. Detta resulterade i att e-drivhuset fick en reduktion i vikt på ca 40 % av den sammanlagda vikten och en reduktion på 10 % av hela drivlinan. Det visades också att genom att använda AM, kunde komponenter integreras i varandra vilket resulterade i en tillverkningstid på 20 minuter mindre än vanligt och 40 färre steg under tillverkningsprocessen.

Trots de få tillämpningar av AM som har gjorts och testats på drivlinans komponenter har det som gjorts visat positiva resultat och i framtiden beräknas AM för drivlinans komponenter vara bland det största segmentet (Boissoneault, u. å). Detta pågrund av att drivlinans komponenter har tillräckligt hög komplexitet för att det ska vara ekonomiskt värt att producera med AM. Det är även viktigt för den elektrifierade drivlinan att kunna konsolidera komponenterna för att minska antalet delar och på så sätt reducera vikten. Dessa faktorer blir viktigare eftersom batteriet i bilarna kräver en lättare vikt. Som nämnts tidigare med AM går det att printa komplexa geometrier. Längre ner i Figur 7 visas några komplexa geometrier som är printade med SLM-metoden.



Figur 7: Komplexa geometrier printade med SLM-metoden

### 9.2 Depositionsstrategi

Gemensamt för teknikerna är att depositionsstrategin är av stor betydelse för det önskade resultatet. Genom att välja depositionsstrategi kan mekaniska egenskaper för komponenten påverkas avsevärt. Depositionsstrategin innefattar det mönster materialet smälts i, i varje lokalt lager. Många olika strategier finns vilka utgår från principen av att strukturen är starkast i den riktning materialet smälts i (Saboori m. fl., 2017, s.14). Den vanligaste depositionsstrategin innefattar att först skanna från vänster till höger, sedan höger till vänster för att ge en anisotropisk struktur i det lagret. Nästkommande

lager skannas med en liknande metodik fast depositionsriktningen vrids 90 grader (deposition från upp till ner, ner till upp). Rätt strategi för komponenten skapar bättre mekaniska egenskaper.

### 9.3 Lättviktslösningar med AM

För att kunna reducera vikten på den valda komponenten behöver olika lättviktslösningar undersökas. De två vanligaste metoderna inom AM för att reducera vikt är topologioptimering och cellulära strukturer vilket kommer presenteras nedan (Plocher och Panesar, 2019, s.2).

#### 9.3.1 Topologioptimering

Med topologisk optimering (TO) menas att material distribueras på ett optimalt sätt. Genom att en programvara utvärderar spänningsfördelningen när material tas bort eller läggs till kan den avgöra vilka effekter det resulterar i (Dutta m. fl., 2019, s.428). Programvaran utför bland annat beräkningar för FEM, känslighetsanalyser och optimeringsteg flera gånger om tills det önskade resultatet fås (Plocher och Panesar, 2019, s.6). Där efter kan material placeras där det behövs extra styrka och mindre där lasterna ej är lika påfrestande.

Vanligtvis utförs topologisk optimering i två steg (Carolo, 2020). I det första steget kör man programvaran för att få reda på den optimala geometrin och visa den bästa designen medans i den andra körningen fixar man de sista detaljerna på komponenten. Topologisk optimering är också något som ökat inom bilindustrin.

#### 9.3.2 Cellulära strukturer

Cellulära strukturer (CS) är strukturer som är gjorda av repetitiva enhetsceller (Nsiempba m. fl., 2021, s.1-2). De olika typerna av cellulära strukturer som tillämpas inom AM i dagsläget är bland annat honeycomb, open-cell foam, closed-cell foam samt gitter. AM har idag bidragit till att öka användningen av CS då den kan tillverka mer komplicerade strukturer genom dess lager-för-lager teknik till skillnad från de traditionella tillverkningsteknikerna. Den har även uppvisat mer flexibilitet i jämförelse med andra traditionella strukturer (Liu m. fl., 2019). Tillämpningar av CS finns bland annat där viktreducering har stor betydelse men det används också för att avleda värme och energi. Andra anledningar till att det finns intresse av att använda CS är att minimera produktionstiden (Plocher och Panesar, 2019, s.8).

Av teknikerna som valdes att gå vidare med är SL-tekniken den som har visat vara bäst lämpad för att konstruera cellulära strukturer, detta på grund av dess höga precision under printningen (Liu m. fl., 2019). För att kunna garantera att cellerna håller den mikroprestanda som är förväntad krävs också att topologioptimering utförs på de enskilda cellerna. Andra tekniker har haft svårt att framställa denna struktur med och med de traditionella teknikerna var det i princip omöjligt. Längre ner presenteras några av de vanligaste CS.

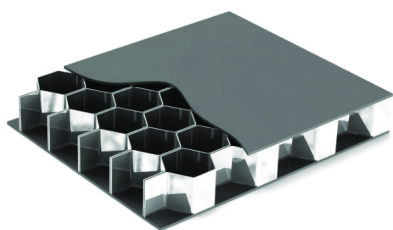
**Gitter** struktur (Figur 11) som är en kategori till CS, ska främst göras i samband med att spara vikt utan att minska hållfastheten mycket, inte för att spara tid. Volymreduktioner på mellan 70 till 85 procent ger en motsvarande reduktion i tillverkningstid på 49 till 59 procent. Gitterstrukturer är två- eller tredimensionella mikrostrukturer som består av antingen balkar eller noder (W. . Liu m. fl., 2020).

**Honeycomb** är en kategori av cellulära strukturer med regelbundna och periodiskt upprepade uppsättningar av hexagonala celler (Rupani m. fl., 2017), se Figur 8. Honeycomb strukturen har en hög styrka till viktförhållande och hög styvhet. Honeycomb har en tunn metallplafilm på respektive sida av strukturen, på så sätt tätar till de öppna cellerna som ger bättre mekaniska egenskaper, exempelvis 30 % högre styvhet än vanliga metallplåtar (så kallad honeycomb sandwich). I kompo-

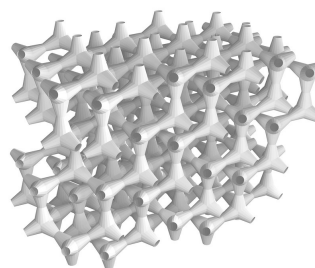
nenter där låg vikt är ett designkrav med tunna plåtar brukar det orsakas böjproblem på grund av belastning så är honeycomb en passande lösning.

**Open-cell foam** är metallceller som är delvis eller helt anslutna till varandra ("Difference Between Open Cell Aluminum Foam and Closed Cell Aluminum Foam", u. å) se Figur 9. Closed-cell foam är istället celler som sitter ihop och är oberoende cellstrukturer. Både open- och closed-celler har egenskaper till exempel värmeisolering och ljudabsorption. Dessa strukturer är dock mer porösa än honeycomb strukturen vilket inte är lämpligt vid högre belastningar. Closed-cell foam kan inte användas ihop med PBF-teknikerna.

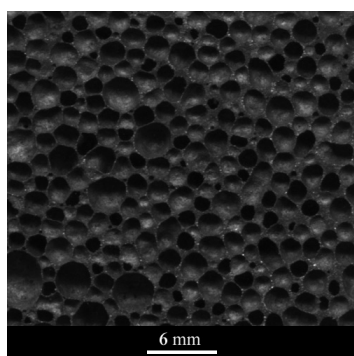
Eftersom fälgen är en komponent som behöver ha starka mekaniska egenskaper och tolerera vikt i olika lägen kan därför cellurlära strukturer vara en möjlig lösning för att behålla dessa egenskaper samtidigt som man uppnår en viktreducering.



Figur 8: Honeycomb struktur. Bild av Rumiya N. Kamaliev, 2017



Figur 9: Open-cell foam. Bild av Jonathan L. Lin, 2009



Figur 10: Closed-cell foam. Bild av CORE-materials, 2002



Figur 11: Gitterstruktur i en komponent. Bild av OpenFAB, 2019

## 9.4 Design for Additive Manufacturing

Tillverkning av en produkt med hjälp av AM kräver en viss design även om friheten är väldigt stor. Arbetet för att tillverka komponenten utgår från en CAD-modell och komplexa former eller strukturer kan användas utan att använda sig utav DFM (design for manufacturing) (Bourell m. fl., 2020, s.21-22). Istället finns här andra krav under design for additive manufacturing (DFAM) som det behöver användas. DFAM utförs vanligtvis i fem generella steg vilket kan ses i Figur 12. I de fem stegen ingår bland annat metoder för designarbete, minska antalet delar i sammansättningen, topologioptimering samt olika designval när det kommer till strukturer för materialet (Iso-Junno m. fl., 2018).





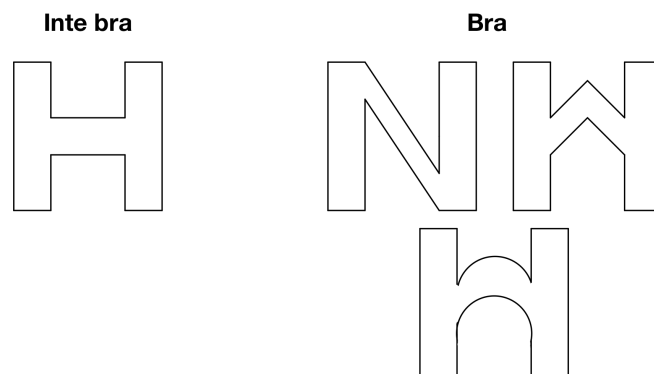
Figur 12: Generell metod för DFAM

Vid DFAM bör det första som studeras vara bildformat och storlek (Waters, 2019, s.39-42). Detta eftersom storleken kan påverka vilken tillverkningsteknik som anses vara mest lämplig men också i vilken orientering som komponenten ska användas. Beroende på vilken maskin som också finns tillgänglig kan byggytan vara en begränsande faktor som behövs tas hänsyn till. Ett exempel är komponenter som är långa och smala. Komponenter som är detta och samtidigt tillverkade med laserpulverbäddsteknikerna får termiska spänningar som förvärras med längden på komponenten om den printas horisontellt. Därför ska dessa istället printas vertikalt för att undvika detta, men samtidigt leder detta till att fler stödstrukturer kan behövas användas vilket leder till ökade kostnader.

Andra intressanta aspekter som måste tas hänsyn till vid DFAM är hur tunna väggar som kan byggas med de olika teknikerna. Detta är också en aspekt som har betydelse vid printing av lättviktslösningar. Av de tekniker som har den tunnaste vägg tjockleken, är EBM som kan producera väggar så tunna som 100 mikrometer (Waters, 2019, s.43). Detta är på grund av att tekniken kan hantera värme spänningar på ett effektivt sätt. Tekniker som inte kan producera lika tunna väggar är exempel binder jetting som istället kan producera väggar så tunna som tre millimeter. Anledningen till att den inte kan producera tunnare är på grund av porositeten hos produkten innan dess att den efterbehandlats.

Efter detta, bör det studeras former och orientering i designen. Vid tillverkning av hål i väggar som står vertikalt går det bland annat inte göra hålen cirkulära utan något stöd, detta på grund av att risken för kollaps är väldigt stor (Waters, 2019, s.44-46). Att orientera produkten så att väggen istället är horisontell minskar problemet för att konstruktionen kollapsar. Detsamma gäller för rektangulära och kvadratiska hål då dessa också lätt kollapsar om väggen är vertikal. Om det nödvändigtvis inte behövs att använda någon av de föregående formerna är det bättre att forma hålet likt en droppe då detta minskar risken för kollaps avsevärt.

Horisontella överhäng är också ett kritiskt moment vid DFAM då även detta kan resultera i en kollaps vid tillverkning (Waters, 2019, s.57-58). För att undvika detta går det att antingen designa sneda eller böjda överhäng. I Figur 13 visas den sämre designen till vänster samt de tre bättre lösningarna till höger. Det är också viktigt vid design med stöd att stöden skall kunna tas bort på ett enkelt sätt utan att förstöra konstruktionen. Skarpa hörn och kanter bör undvikas så långt som möjligt eftersom detta skapar stress hos komponenten. För att undvika detta går det att använda faser eller radier på skarpa kanter och hörn.



Figur 13: Överhäng

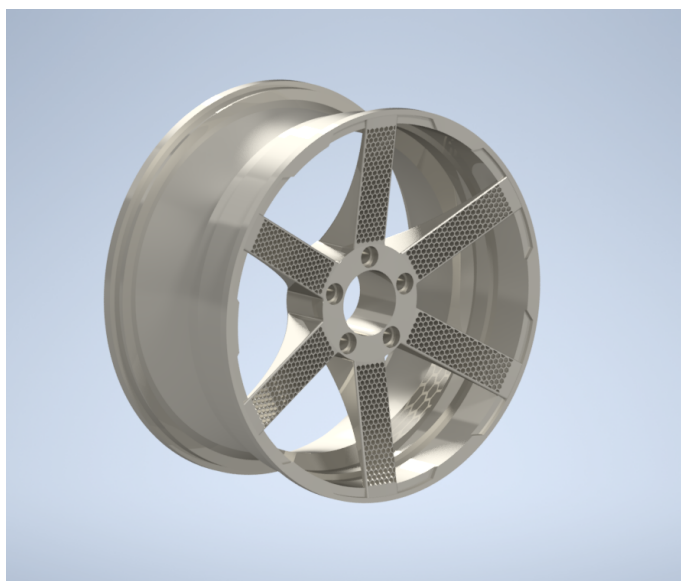
## 10 Process för att framställa en komponent

Under detta kapitel kommer tillverkningsprocessen för AM att kartläggas. Vanligtvis delas proceduren upp i åtta olika steg, från designande av CAD-modell fram till tillämpning. Dessa steg kommer att beskrivas ingående under kommande underrubriker. Stegen kommer dessutom att tillämpas på den komponent som beslutas aktuell för detta arbete. Det valdes att enbart printa en del av fälgen, i detta fall en del av en eker, för att demonstrera hur det hade kunnat se ut i praktiken.

### 10.1 CAD

För att tillverka en CAD-modell finns ett flertal olika program, till exempel Autodesk Inventor. Med hjälp av AM är det möjligt att få ner antalet komponenter genom att i designsteget välja att inkludera flera komponenter i en komplicerad design, som annars hade varit svår att tillverka med traditionella metoder (Dutta m. fl., 2019, s.196-198). I kontrast mot traditionell tillverkning finns en större frihet och design för prestanda istället för tillverkning är relevant. Den interna strukturen är också intressant vid design eftersom viktbesparingar kan bli stora för gods som inte är solitt.

När CAD-modellen relevant för gruppen gjordes var det viktigt att göra en design med lägre vikt. Valet blev en honeycomb-struktur i ekrarna på fälgen som kan ses i Figur 14, detta för att visa möjligheter med AM. Viktbesparingen med honeycomb-struktur jämfört med solida ekrar är i detta fallet 1.5 kilogram på en 16 tum stor fälg i aluminium. Den minskningen motsvarar 25 % totalt och varje ekers vikt minskas med 47 %. Att göra beräkningar på hållfastheten för fälgen var utanför projektets omfång.



Figur 14: Gruppens CAD-modell

#### 10.1.1 Stödstrukturer

Stödstrukturer är en viktig del för att uppnå ett bra resultat eftersom komponenten byggs upp på en tom yta. Där den inte får stöd på egen hand, behövs det extra pelare till bottenplattan för att lyfta upp komponenten så den inte kollapsar. De kan antingen optimeras för bäst resultat på produkten eller för att använda så lite material som möjligt för stödstrukturerna (Waters, 2019). Det är även viktigt att de är lätta att ta bort från slutprodukten samt lämna så små spår som möjligt på ytan. För överhäng som till exempel en bro är det inte optimalt att använda ett stöd, det är bättre att

ändra designen genom att lägga till faser i ändarna av bron, alternativt ha extra material under i en vinkel. På komponenten som gruppen printade behövdes det inte några stödstrukturer då det enbart printades en del av en eker. Den tillverkade komponenten är formad som ett rätblock med honeycomb-struktur vilket redan är stabil utan hjälp.

## 10.2 STL/AMF konvertering

När CAD-modellen är konstruerad krävs det att filen görs om till ett filformat för att vald maskin ska kunna tillverka komponenten ("The additive manufacturing process", u. å). Det krävs att komponenten har en sluten geometri, alltså att en insida och utsida går att definiera. Den konverterade filen kan sedan bearbetas med mjukvara för att dela upp geometrin i tvådimensionella tvärsnitt som bygger upp komponenten lager för lager.

STL (Stereolithography) och AMF (Additive manufacturing file format) är filformat som i princip används i alla AM maskiner och därför måste CAD filen konverteras till de filformaten. (Gibson m. fl., 2014, s.46). Med andra ord är det en typ av geometrisk klon som AM maskinen kan avläsa. Vanliga problem som kan uppstå vid en konvertering är om designen är komplex och problem i filen tolkas som komplexitet snarare än konverteringsfel. Med gruppens CAD-fil var det inte några problem med konverteringen, den var redo för att printas som den såg ut.

## 10.3 Filöverföring till maskin

I detta steg av tillverkningsprocessen förs STL/AMF konverteringen över till maskinen (Gibson m. fl., 2014, s.47). Här finns möjligheten att välja vart i maskinen komponenten ska printas och vilket orientering den ska ha, detta eftersom det ofta väljs att printa flera komponenter inom samma maskin. Här är det möjligt att ta hänsyn till om komponenten som printas kommer att krympa eller expandera under tillverkningsprocessen, detta genom att skala upp eller ner den givna modellen. Det är viktigt att bestämma åt vilket håll produkten ska bli tillverkad på då det påverkar ytstrukturen samt byggtiden.

## 10.4 Maskininställningar

Alla maskiner kräver förinställningar i mjukvaran, vissa fler och andra färre (Gibson m. fl., 2014 s.47). Antalet inställningar kan bero på vilka material maskinerna kan använda. Det går till exempel att välja lagertjockleken och hur högt varje lager är. Desto mer flexibel en maskin är desto fler parametrar krävs för en optimal produktion. Även om inställningarna är inkorrekta så kommer det fortfarande resultera i att en del tillverkas, men resultatet kommer förmodligen vara dåligt.

De maskininställningar som valdes vid printing av ekern var sådana som redan var definierade. Genom att ange det tillgängliga materialet, rostfritt stål (316L), valdes lämpliga parametrar av maskinen.

## 10.5 Printning

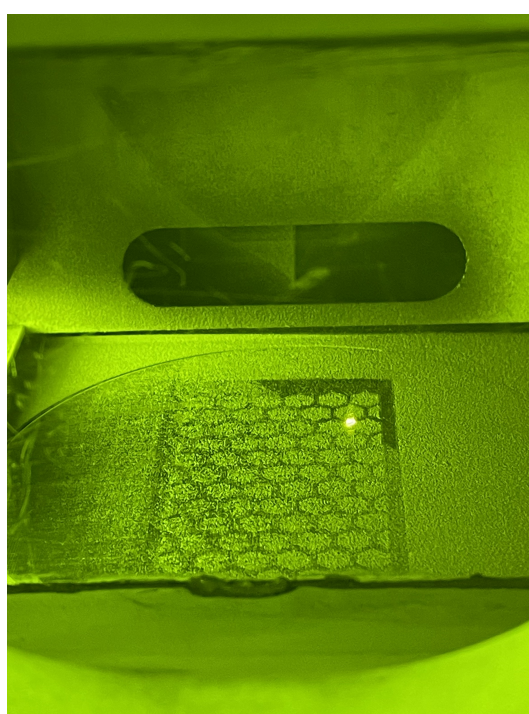
Under printningsfasen av komponenten styrs majoriteten av processen med datorer men kan även kräva manuell kontroll, interaktion, samt beslutstagande inom somliga områden (Gibson m. fl., 2014, s 48). När dessa delar är gjorda kan processen sedan gå över till byggnadsfasen. Här utförs den lagerbaserade tillverkningen. Det som samtliga AM-maskiner har gemensamt är att de har; en mekanism för att skapa skikt, justerbara plattformar i höjd eller deponeringshuvden, spridningsmekanismer och skikttvärsnittsbildning. Materialavsättning och skiktbildning kombineras i vissa maskiner samtidigt som andra väljer att skilja på dem. Upplevs proceduren problemfri kommer konstruktionen att fortgå och upprepa skikttningsprocessen enda till komponenten är fullständig.

Vid konstruktion av detta projekts komponent, som kan ses i Figur 15, tillgodosågs gruppen med information gällande printningsprocessen specifikt riktat till denna komponent som ska tillverkas av gruppen. Under printingen av ekern var det somliga saker som behövdes tas i beaktning.

Bland annat var de första två till tre lagrena under printingen något tjockare samt smältes flertal gånger. Detta för att minimera risken för att den ska delaminera från byggplattan och för att inte riskera att den åker upp när den börjar krympa något. Ifall ett tillfredsställande resultat har uppnåtts på de första lagrena så kan en rensningsprocess att börja utföras samtidigt som syrenivån sjunker mot noll. Anledningen till att en sänkning av syrenivån görs är för att oxidation inte ska ske. Fortsättningsvis för resterande lager ligger syrenivån på omkring 20 %. Det är att föredra att ha ett pulver på mellan 20 - 45 mikrometer i diameter då för små pulverpartiklar kan riskera att flyga iväg, men även ifall de är för stora finns det risk för att de blir för tunga. Vidare är det också viktigt att ta byggplattan i beaktning och i fallet för detta projekts komponent valdes en något tjockare byggplatta för att få lägre spänningar under byggandet. Slutligen behövde även komponentens placering att tas i beaktning, i detta fall placerades ekern i mitten av byggplattan, då den i annat fall kunde komma att bli mer oval desto längre ut den placerades på byggplattan.



(a)



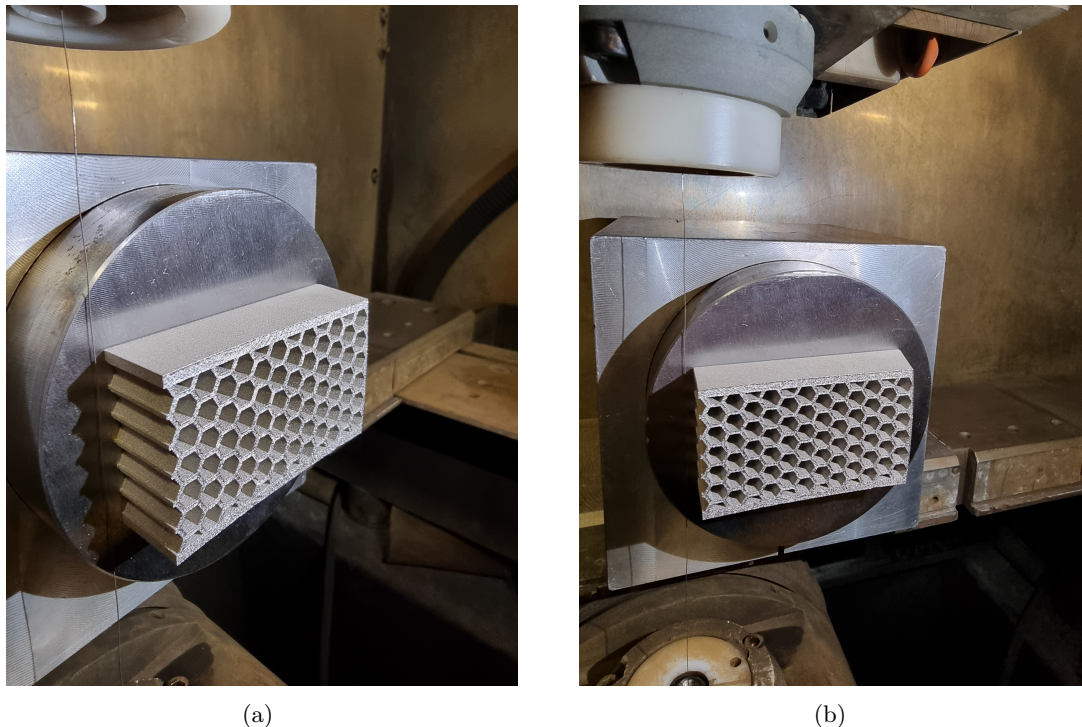
(b)

Figur 15: Printer (a) och komponenten under printning (b)

## 10.6 Avlägsning och rensning av material

Det optimala är ifall komponenten är färdig efter byggnadsfasen i AM-maskinen, med ett lågt behov av manuell efterbearbetning i form av avlägsning och rensning av material ("The additive manufacturing process", u. å). Annars kommer det finnas behov av avsevärt stor mängd efterbearbetning innan komponenten kan anses vara färdig. I samtliga fall krävs det att komponenten avlägsnas från byggplattformen där den tillverkades alternativt att material behöver tas bort runtom den part som framställdes.

Inom några AM-processer adderas även ytterligare material i byggnadsfasen än det som behövs för komponenten för att tillverka sekundärt stödmaterial. För metallstrukturer används en tråd-EDM-maskin vilket är en maskin högaktuell för att avlägsna komponenten från bottenplattan och dess stöd, se Figur 16. Vid borttagning av överflödigt material från komponenten söks en viss operatörsskicklighet då en felaktigt gjord borttagning, exempelvis genom misskötsel, kan leda till skador på komponenten (Redwood, u. å). Tillverkningsprocesskedjan ser olika ut för olika komponenter och kräver då vidare olika saneringskrav men kan däremot kortfattat sägas som att samtliga komponenter går under krav i detta skede av processen (Gibson m. fl., 2014, s.49). Rensning av material kan ses som ett övergående processstadium som mer utvecklat kommer att gås igenom under nästkommande rubrik.



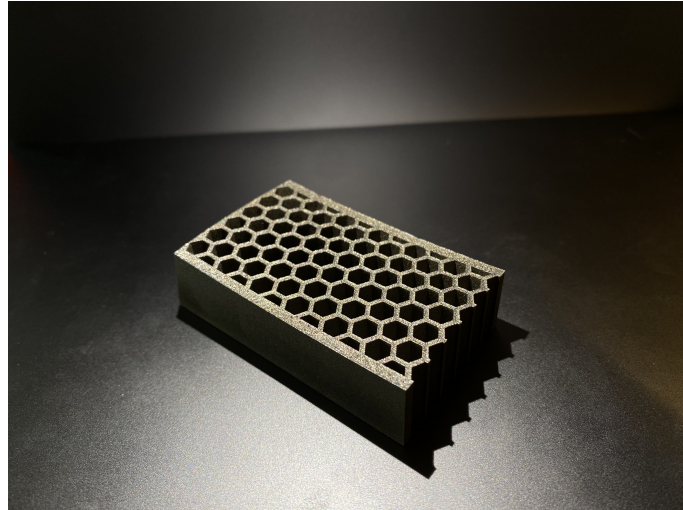
Figur 16: Färdigprintade demonstrator som behöver avlägsna byggplattan

## 10.7 Efterbearbetning

Efterbearbetning innefattar de processer som utförs på komponenten efter tillverkningen. Ofta inkluderar detta att bearbeta alla ytor som finns kvar på komponenten och sker oftast manuellt (team, 2020). Det som sker under den del innefattar allt från slipande efterbearbetning i form av polering eller sandpapper till appliceringar av beläggningar (Gibson m. fl., 2014, s.49). Det som är aktuellt för respektive komponent baseras främst på användningsområde, vissa komponenter kräver ibland mindre efterbearbetning än andra. Hos komponenter med högre krav innefattas det noggrannare hantering vid framställning av precision och ytfinhet. Efterbehandlingen kan i somliga fall även innefatta en kemisk eller termisk behandling för att uppnå sökta egenskaper. I de fall där komponenten som fram-



ställs är väldigt ömtålig kan en infiltration och/eller ytbeläggningar vara av intresse för att minska risken för fraktion. Ovan nämnda tekniker utförs i majoriteten av fallen manuellt, däremot finns det verktyg såsom CNC-fräsning, poleringsbaljor och bakugnar som kan komma till användning vid mer automatisk efterbearbetning. För demonstratorn, som kan ses i Figur 17, krävdes viss efterbearbetning. För att få en finare yta som inte är ojämn, valdes det att slipa ytorna.



Figur 17: Gruppens demonstrator

## 10.8 Tillämpning

I detta stadie är produkten redo för användning. Det som börs ha i åtanke är att även ifall produkter kan ha liknande material, i jämförelse med de som finns tillgängliga från andra tillverkningstekniker, så kommer de inte gå under samma standardiserade materialspecifikationer (Gibson m. fl., 2014, s.49). Detta då vissa AM processer exempelvis kan skapa hålrum inom strukturen vilket kan resultera i brott vid mekanisk påfrestning. I somliga fall kan strukturerna falla på grund av att materialet inte binder, länkar eller kristalliserar på rätt sätt. I och med att AM-produkter kan komma att bete sig annorlunda än traditionellt tillverkade produkter kan det resultera i en bättre eller sämre lämpad lösning beroende på användningsområdet. Detta är något som bör tas i hänsyn vid design. Framstegen inom AM sker i en såpass rask takt är designers därmed i behov av att vara insatta inom området för att märka av när AM blir tillgängligt för nya områden att tillämpa det i. Inom AM är det viktigt att heller inte ta genvägar ifall riktiga komponenter är det som eftersträvas, alla delar av processen måste värderas lika högt och hanteras med omsorg och noggrannhet (team, 2020).

## 11 Diskussion

Som vi ser i resultatdelen så finns det både för- och nackdelar med AM. Bland fördelarna är den miljömässiga aspekten, där delar kan produceras med en lägre materialanvändning. En lägre materialanvändning sparar på råvaror och tillhörande energi som annars hade funnits i produkten.

Det finns ytterligare miljömässiga fördelar i att komponenter producerade med AM kan produceras med mindre montering och närmare slutkund än vad annars är vanligt. Fabriker kan då placeras lokalt med samma förinställningar och producera likvärdiga delar. I dagsläget skickas material och komponenter runt i världen till olika specialister inom sitt specifika område vilket leder till många och långa transporter vilket har en stor negativ miljöpåverkan. Enligt Verhoef m.fl., 2018 så kan också viktreduceringen som kan åstadkommas bidra till en kraftig minskning av energiförbrukningen inom flyg- och rymdindustrin vilket också inom det långa loppet kommer leda till att den globala energiförbrukningen reduceras.

Tidsmässigt och kostnadsmissigt så är traditionell tillverkningsindustri för tillfället mer effektiv. I samhället idag är den traditionella tillverkningsindustrin väldigt uppbyggd av maskiner som snabbt och effektivt kan förvandla råmaterial till standardiserade bitar som är färdiga att använda. Om AM skulle kunna skalas upp för att tillverka snabbare blir tekniken mer relevant och ett möjligt alternativ mot den traditionella tillverkningsindustrin utöver specialiserade tillämpningar. Som tidigare nämnt finns det många komponenter inom drivlinan relevanta för AM, om teknikens kostnad varit lägre hade AM kunnat implementeras i en större skala.

För prototyp-tillverkning och tillverkning i låga serier är AM väl lämpad gentemot traditionella tillverkningsmetoder. För prototyper där en ny form skapats som det inte finns verktyg inom företaget för att tillverka, är AM ett bra alternativ för effektivitet i kostnad, tid och designfrihet. Flyg- och rymdindustrin har sedan länge varit användare av AM för dess förmåga att tillverka komponenter med många funktioner inkorporerade i en ovanlig form. Industrier med hög budget och krav på komponenter i låga antal och unik form, har en bra utgångspunkt i AM.

En mer utbredd tillämpning av AM hade kunnat ge många fördelar i olika områden i och med att funktioner kan integreras i komponenterna. I och med att funktioner integreras tillför detta ett mervärde i komponenten. Detta mervärde kan innebära att teknikens kostnad blir rättfärdigad i fler sammanhang.

Förbättringspotentialer som visats på den elektrifierade drivlinan har varit få men stora. Bland annat ser vi i ett resultat från Porsche att genom att använda sig av AM och topologioptimering på dess drivhus kunde de minska vikten med 40 %. Tekniken som användes var cellulära strukturer vilket nämns ovan i resultatet. Där kan vi också se att beroende på vilken typ av cellulära strukturer som tillämpas kan det fås upp till 30 % bättre styvhet med honeycomb sandwich samtidigt som vikten reduceras.

Vid design av fälgen valde vi att använda oss av cellulära strukturer för att skapa en lättviktslösning. Vid resultatet i CAD-avsnittet kan vi bland annat se att tillämpningen av honeycomb strukur i ekrarna lett till en total minskad vikt på 25 % i fälgen och minskad vikt på varje eker med 48 %. Resultatet av förbättringspotentialen av fälgen hade varit något mer tillförlitligt om även de mekaniska egenskaperna undersökts för att se hur de cellulära stukturerna hade påverkat hållfastheten.

Av resultatet i kapitlet tillverkningstekniker studerades flera för- och nackdelar associerade med produktionsmetoden och de olika tekniker som finns inom AM. Det som kunde konstateras var att olika tekniker inom AM passar olika bra beroende på vilken komponent som skall produceras.

Faktorer som framgick som viktiga för drivlinans komponenter är bland annat bra mekaniska egenskaper och att avancerade detaljer ska kunna produceras utan att komponenten blir porös. Det vi kan se var att risker som uppkom kring teknikerna var bland annat grov yta, krympningar, porositet och begränsningar i geometrier. Dessa risker skulle i många fall innebära att en komponent inte skulle kunna användas för drivlinan. En följ som inte är stöttålig kan inte tillämpas i produktion. Speciellt riskabelt kan detta vara eftersom stora delar av följerna är tunnväggig vilket i sin tur innebär att de defekter som uppstår exklusivt uppstår vid ytan. Som beskrivet ovan är defekter vid ytan av stor betydelse. I samband med detta finns det goda möjligheter att bedöma komponentens kvalitet och därmed ge en god försäkran om en defektfri komponent. Detta kan göras genom exempelvis röntgentomografi. Vilka defekter och utmaningar som uppstår varierar mellan teknikerna. För DED är det exempelvis svårare att få en bra ytfinhet som kan användas, med L-PBF är det dock en större mängd termiska spänningar som för en tunnväggig komponent kan resultera i skjuvning. Beroende på vilken teknik det gäller kan dessa risker variera. Alla dessa parametrar är viktiga för komponenter i drivlinan eftersom de påverkar komponentens prestanda.

De tekniker som hade flest negativa faktorer för tillverkning av komponenter i en drivlina valdes att uteslutas eftersom för mycket komplikationer hade uppkommit hos komponenterna. Efter uteslutningen ansågs DED, EBM och SLS/SLM vara de tekniker bäst lämpade. Men även dessa visade sig ha sina brister så som att materialet kan spricka vid DED-tekniken. Detta anses dock inte vara de brister med störst påverkan på drivlinans komponenter.

I nuläget är resultatet något bristfälligt då beroende på komponent kan olika risker uppstå kring produktionsmetoden och det som tagits upp är det mest generella. Därför kan vissa risker som är associerade ha undgått. Andra faktorer som också kan påverka resultatet är vilken sorts efterbehandling som används på komponenten. Men genom att beakta de redovisade riskerna vid design kan många av dessa undvikas.



## 12 Slutsats

Sammanfattningsvis visar studien på att det finns förbättringspotential för viktreducering hos komponenter tillverkade med AM. Genom att tillämpa det på en komponent i en elektrifierad drivlina kan det medföra längre räckvidd och mindre slitage på andra komponenter. Det finns ett flertal tekniker som fungerar olika bra beroende på vilken komponent de tillämpas på, för gruppens demonstrator blev det L-PBF. Det gruppen ville visa med demonstratorn var att det finns goda möjligheter för tillverkning utav komplexa strukturer, i detta fall honeycomb-struktur som medför en stor viktbesparing.

För att uppnå ett ännu bättre resultat med studien kan det vara intressant att undersöka hållfastheten hos komponenterna. Eftersom en stor del av materialet försvinner så påverkas helt klart de mekaniska egenskaperna, det som behöver undersökas är hur mycket som går att ta bort med minimal påverkan.

Det skulle också vara bra att undersöka hur den ekonomiska delen ser ut, om företag till exempel kunnat livnära sig på att enbart tillverka produkter med denna metod. Vi vet även inte hur möjligheten till en storskalig produktion ser ut eller om tekniken lämpar sig bättre till prototyp-tillverkning som den används mycket till idag.

## Referenser

- 3DEO. (2020, 22. december). *Intro to Metal Additive Manufacturing (AM) Processes - Material Jetting*. Hämtad 1 mars 2022, från <https://www.3deo.co/manufacturing/intro-to-metal-additive-manufacturing-am-processes-material-jetting/>
- The additive manufacturing process*. (u. å). <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>
- Artzt, K. ., Siggel, M. ., Kleinert, J. ., Riccius, J. ., Requena, G. . & Haubrich, J. . (2020). Pyrometric-Based Melt Pool Monitoring Study of CuCr1Zr Processed Using L-PBF. *Materials*, 13(20), 4626. <https://doi.org/10.3390/ma13204626>
- Badin, F. . (2013). *Hybrid Vehicles: From Components to System*. Editions Technips.
- Bilgin, G. M., Tuzemen, C. ., Tigli, C. . & Gulcan, Y. N. (2020). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of SLM-Produced Inconel 718 and Hastelloy-X Alloys. *Structural Integrity of Additive Manufactured Materials & Parts*, 340–351. <https://doi.org/10.1520/stp163120190133>
- The BMW Group*. (u. å). <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0243462EN/25-years-of-3d-printing-at-the-bmw-group:-pioneers-in-additive-manufacturing-methods?language=en>
- Boissoneault, T. (u. å). Automotive, AM [<https://www.3dprintingmedia.network/wp-content/uploads/2021/03/3dpbm-AMFocus2021-eBook-Automotive-AM-Spread.pdf>].
- Bortoluci Ormastroni, L. M., Lopez-Galilea, I. ., Pistor, J. ., Rutttert, B. ., Körner, C. ., Theisen, W. ., Villechaise, P. ., Pedraza, F. . & Cormier, J. . (2022). Very high cycle fatigue durability of an additively manufactured single-crystal Ni-based superalloy. *Additive Manufacturing*, 54, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102759>
- Bourell, D. . L. ., Frazier, W. ., Kuhn, H. . & Seifi, M. . (2020). *ASM Handbook, Volume 24: Additive Manufacturing Processes* (Vol. 24). ASM International.
- Brandt, M. . (2016). *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials)* (1. utg.). Woodhead Publishing.
- Buchbinder, D. ., Schleifenbaum, H. ., Heidrich, S. ., Meiners, W. . & Bültmann, J. . (2011). High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia*, 12, 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035>
- Campbell, F. . C. . & F, C. . (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International.
- Carolo, L. . (2020, 19. augusti). *What Is Topology Optimization? – Simply Explained*. <https://all3dp.com/2/topology-optimization-simply-explained/>
- Carvill, J. . (1994). *Mechanical Engineer's Data Handbook* (First Edition). Butterworth-Heinemann.
- CORE-materials. (2002). *Closed-cell foam*. <https://openfabpdx.com/2019/01/09/3d-printed-lattices-and-generative-design/>
- Day, A. . J. . (2014). *Braking of Road Vehicles*. Elsevier Gezondheidszorg.
- Difference Between Open Cell Aluminum Foam and Closed Cell Aluminum Foam*. (u. å). <https://www.metalfoamweb.com>
- du Plessis, A. ., Yadroitsava, I. . & Yadroitsev, I. . (2020). Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights. *Materials & Design*, 187, 108385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>
- Dutta, B., Babu, S. & Jared, B. H. (2019). *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*. Elsevier Gezondheidszorg.
- Dutton, B. ., Vesga, W. ., Waller, J. ., James, S. . & Seifi, M. . (2020). Metal Additive Manufacturing Defect Formation and Nondestructive Evaluation Detectability. *Structural Integrity of Additive Manufactured Parts*, 1–50. <https://doi.org/10.1520/stp162020180136>
- E-drive housing*. (2020, 17. december). <https://www.tuningblog.eu/en/categories/cars-from-az/p-cars-from-az/porsche/3d-printer-from-porsche-315608/>
- Edney, B. . (2019). Materials to Reduce Weight & Improve Efficiency in Electric Vehicles. *PCMI manufacturing*. Hämtad 16 april 2022, från <https://www.pcmi-mfg.com/blog/materials-to-reduce-weight-improve-efficiency-in-electric-vehicles>

- E-mobility Engineering. (2021). *E-axles*. <https://www.emobility-engineering.com/eaxle-transmission/> (Maj 2021)
- Fabrisonic. (2021, 16. november). *Fabrisonic 3D Printing — 3D Printing Without Melting*. <https://fabrisonic.com>
- Farfan-Cabrera, L. I. (2019). Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends. *Tribology International*, 138, 473–486. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.029>
- Frishfelds, V. ., Timuhins, A. . & Bethers, U. . (2018). Benefits of magnesium wheels for consumer cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 355, 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/355/1/012023>
- GE Additive. (u. å). *EBM Technology*. Hämtad 8 mars 2022, från <https://www.ge.com/additive/ebm>
- Gebhardt, A. . & Hötter, J. . (2016). *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Hanser Publications.
- Gibson, I. ., Rosen, D. . & Stucker, B. . (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (2nd ed. 2015). Springer.
- Hanejko, F. . (2022, 24. januari). *Permanent Magnet vs Induction Motor: Torque, Losses, Material*. Hämtad 4 april 2022, från <https://www.horizontechnology.biz/blog/induction-vs-permanent-magnet-motor-efficiency-auto-electrification>
- Harvan. (2021, 22. mars). *The Importance of Driveline Parts & Components for Off-Road Vehicles & Heavy Trucks*. <https://www.harvan.com/blog/driveline-parts-components-military-off-road-vehicles-trucks/>
- Herzog, D. ., Seyda, V. ., Wycisk, E. . & Emmelmann, C. . (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Huynh, T. ., Mehta, A. ., Graydon, K. ., Woo, J. ., Park, S. ., Hyer, H. ., Zhou, L. ., Imholte, D. D., Woolstenhulme, N. E., Wachs, D. M. & Sohn, Y. . (2022). Microstructural Development in Inconel 718 Nickel-Based Superalloy Additively Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11(1), 88–107. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00811-0>
- Höganäs. (2022). *Wear resistance High-speed and Tool steel powders*. <https://www.hoganas.com/sv/powder-technologies/pressing-sintering/products/wear-resistance-high-speed-and-tool-steel/>
- Iso-Junno, T. ., Mäkelä, K. ., Mäntyjärvi, K. . & Jokelainen, T. . (2018). A Short Glance on Metal 3D AM. *Key Engineering Materials*, 786, 348–355. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.786.348>
- Johnson, J., Reck, B., Wang, T. & Graedel, T. (2008). The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy*, 36(1), 181–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.028>
- Kamalieva, R. N. (2017). *Honeycomb*. [https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-structure-Honeycomb-structures-are-highly-laborious-in-manufacturing-and\\_fig3\\_316849097](https://www.researchgate.net/figure/Honeycomb-structure-Honeycomb-structures-are-highly-laborious-in-manufacturing-and_fig3_316849097)
- Kan, W. H., Gao, M. ., Zhang, X. ., Liang, E. ., Chiu, N. S. L., Lim, C. V. S. & Huang, A. . (2022). The influence of porosity on Ti-6Al-4V parts fabricated by laser powder bed fusion in the pursuit of process efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7-8), 5417–5438. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08374-8>
- Karthik. (2020, 30. december). *Types of Motors used in Electric Vehicles*. Hämtad 19 april 2022, från <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>
- Kellens, K. ., Mertens, R. ., Paraskevas, D. ., Dewulf, W. . & Duflou, J. R. (2017). Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? *Procedia CIRP*, 61, 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153>
- Kempen, K. ., Vrancken, B. ., Buls, S. ., Thijs, L. ., Van Humbeeck, J. . & Kruth, J. P. (2014). Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6). <https://doi.org/10.1115/1.4028513>
- Kim, H. ., Lin, Y. . & Tseng, T. L. B. (2018). A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 645–669. <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2017-0048>
- Kranz, J. ., Herzog, D. . & Emmelmann, C. . (2015). Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S14001. <https://doi.org/10.2351/1.4885235>

- Krishna, R. ., Manjaiah, M. . & Mohan, C. . (2021). Developments in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 37–62. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822056-6.00002-3>
- Körner, C. . (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews*, 61(5). <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
- Lesics. (2017, 30. maj). *How does an Electric Car work ? — Tesla Model S*. <https://www.youtube.com/watch?v=3SAxXUIre28>
- Lin, J. (2009). *Open-cell foam*. <https://www.flickr.com/photos/jonolist/3323526494>
- Liu, Guessasma, Zhu & Zhang. (2019). Designing Cellular Structures for Additive Manufacturing Using Voronoi–Monte Carlo Approach. *Polymers*, 11(7), 1158. <https://doi.org/10.3390/polym11071158>
- Liu, W. ., Chen, C. ., Shuai, S. ., Zhao, R. ., Liu, L. ., Wang, X. ., Hu, T. ., Xuan, W. ., Li, C. ., Yu, J. ., Wang, J. . & Ren, Z. . (2020). Study of pore defect and mechanical properties in selective laser melted Ti6Al4V alloy based on X-ray computed tomography. *Materials Science and Engineering: A*, 797, 139981. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139981>
- Louvis, E. ., Fox, P. . & Sutcliffe, C. J. (2011). Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019>
- Magma. (2018). *Casting a perfect gearbox housing for a very special car*. Hämtad 2022, från <https://www.magnasoft.de/en/solutions/core-and-mold/reference/Casting-a-perfect-gearbox-housing-for-a-very-special-car/>
- NIHF. (2022, 22. mars). *NIHF Inductee Charles Hull, Who Invented the 3D Printer*. <https://www.invent.org/inductees/charles-hull>
- Nishikawa, H. ., Furuya, Y. ., Kitano, H. ., Nakamura, T. ., Kuwabara, K. ., Kanegae, Y. ., Kang, D. S. & Aota, K. . (2022). In-situ observation of microstructurally small fatigue crack initiation and growth behaviors of additively-manufactured alloy 718. *Materials Science and Engineering: A*, 835, 142682. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142682>
- Nsiempba, K. M., Wang, M. . & Vlasea, M. . (2021). Geometrical Degrees of Freedom for Cellular Structures Generation: A New Classification Paradigm. *Applied Sciences*, 11(9), 3845. <https://doi.org/10.3390/app11093845>
- OpenFAB. (2019). *Gitterstruktur*. <https://www.flickr.com/photos/core-materials/3841089898>
- Palermo, E. . (2013, 13. augusti). *What is Selective Laser Sintering?* <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- Peng, A. . (2021, 13. juli). *Transmission Shafts: A complete Guide*. <https://www.dekmake.com/transmission-shafts-a-complete-guide/>
- Plocher, J. . & Panesar, A. . (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, 183, 108164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>
- Redwood. (u. å). *The additive manufacturing process*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>
- Rupani, Jani & Acharya. (2017). Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review. *Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review*, 2(4). <https://doi.org/10.1712/ijdsr.17013>
- Saboori, A. ., Gallo, D. ., Biamino, S. ., Fino, P. . & Lombardi, M. . (2017). An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Applied Sciences*, 7(9), 883. <https://doi.org/10.3390/app7090883>
- Saewe, J. ., Gayer, C. ., Vogelpoth, A. . & Schleifenbaum, J. H. (2019). Feasibility Investigation for Laser Powder Bed Fusion of High-Speed Steel AISI M50 with Base Preheating System. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(3), 101–107. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-0828-y>
- Schmieder, F. . & Kettner, P. . (1997). Manufacturing of hollow transmission shafts via bulk-metal forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(1), 113–118. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)00156-8](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(97)00156-8)
- Sehhat, M. H., Chandler, J. . & Yates, Z. . (2022). A review on ICP powder plasma spheroidization process parameters. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 103, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105764>

- Sprinkle. (2020, 9. september). *The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing*. <https://sn.astm.org/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html>
- team, S. (2020, 6. juni). *The Additive Manufacturing Process*. <https://blog.spatial.com/additive-manufacturing-process>
- Tolosa, I., Garciandía, F., Zubiri, F., Zapirain, F. & Esnaola, A. (2010). Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8). <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2631-5>
- Tryon, R. G., McDaniels, R. ., Chern, A. ., Oja, M. ., Dey, A. ., Awad, I. . & Duty, C. . (2020). Probabilistic Computational Fatigue and Fracture Modeling of Additive Manufactured Components. *Structural Integrity of Additive Manufactured Parts*, 507–525. <https://doi.org/10.1520/stp162020180094>
- Wang, Y. & Su, Z. (2021). Effect of micro-defects on fatigue lifetime of additive manufactured 316L stainless steel under multiaxial loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 111, 102849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102849>
- Varotsis. (u. å). *Introduction to binder jetting 3D printing*. Hämtad 28 mars 2022, från <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- Varotsis. (2022). *Introduction to material jetting 3D printing*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/#what>
- Vasco, J. C. (2021). Additive manufacturing for the automotive industry. *Additive Manufacturing*, 505–530. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818411-0.00010-0>
- Waters, C.E.A.M. &. (2019). *Additive Manufacturing for Designers: A Primer*. SAE International.
- Verhoef, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C. ., García Nodar, B. . & van Wijk, A. J. (2018). The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, 112, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.034>
- WheelsASAP. (u. å). *What’s the difference between Rim and Wheel?* <https://wheelsasap.com/whats-the-difference-between-rim-and-wheel/>
- Whitehead, E. . (2021, 29. juni). *The Different Drive Shaft Components*. <https://www.driveshaftfulsa.com/blogs/news/the-different-drive-shaft-components>
- Wycisk, E. ., Solbach, A. ., Siddique, S. ., Herzog, D. ., Walther, F. . & Emmelmann, C. . (2014). Effects of Defects in Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V on Fatigue Properties. *Physics Procedia*, 56, 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.120>
- Yadroitsev, I. ., Yadroitsava, I. ., Plessis, A. . D. . & MacDonald, E. . (2021). *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals (Additive Manufacturing Materials and Technologies)* (1. utg.). Elsevier.
- Zhang, W. N., Wang, L. Z., Feng, Z. X. & Chen, Y. M. (2020). Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review. *Optik*, 207, 163842. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163842>