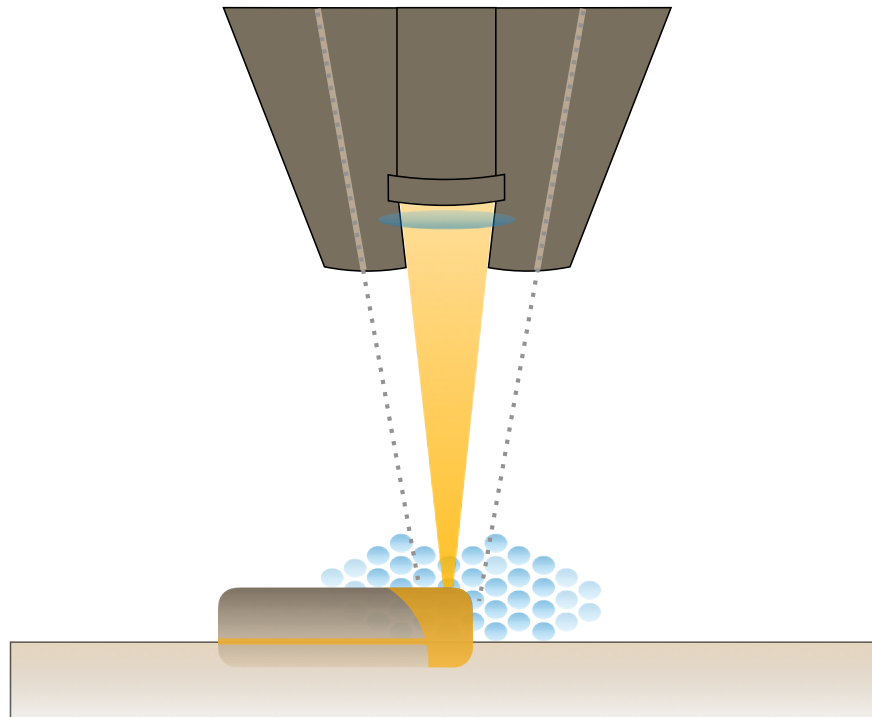




CHALMERS



Additiv tillverkning av lättviktslösningar för elektrifierade drivlinor

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Sandra Jaksic
William Johansson
Julia Johnsson
Sofia Jost auf der Stroth
Sofia Nilsson
Emilia Palm

Institutionen för industri- och materialvetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

Additiv tillverkning av lättviktslösningar för elektrifierade drivlinor.

Sandra Jaksic
Julia Johnsson
Sofia Jost auf der Stroth
Sofia Nilsson
Emilia Palm

© Sandra Jaksic, 2022.
© Julia Johnsson, 2022.
© William Johansson, 2022.
© Sofia Jost auf der Stroth, 2022.
© Sofia Nilsson, 2022.
© Emilia Palm, 2022.

Handledare: Mats Norell, Institutionen för industri- och materialvetenskap
Examinator: Lars Nyborg, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Kandidatuppsats 2022
Institutionen för industri- och materialvetenskap
Maskinteknik
Grupp 7
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefonnummer +46 31 772 1000

Omslagsbild: Omslagsbilden visar den additiva tillverkningsprocessen Direct Energy
Deposition.

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2022

Abstract

The automotive industry is facing major challenges to switch from internal combustion engine operation to electric operation, where the conventional engine is replaced by an "e-axle", and transmission as well as power electronics are integrated in a compact solution. Continuing to develop the electric powertrain requires complex solutions, which places demands on today's traditional manufacturing methods. Additive manufacturing (AM), colloquially called 3D printing, is a manufacturing method that has received much attention in recent years due to its advantageous properties that can create geometrically smart and functional lightweight solutions. The purpose of this study is to visualize how it is possible to apply lightweight solutions to electric powertrains via AM. The aim is also to analyze why AM is not used in greater extent in industries today. The study includes some limitations such as; it will only address AM in metal, the study will only take passenger cars in consideration and specific cost analysis will not be addressed. The report is a literature study and the sources used are scientific articles, journals, books and websites. The discussion analyses whether it is appropriate to use AM on various components in the driveline, which results in it not being useful for larger parts that are exposed to large cyclic loads as it results in fatigue. Smaller components with complex geometries and design requirements, on the other hand, can be manufactured very well via AM. The performance is also discussed, which can be designed via truss structures to reduce noise in the driveline. The effect of reducing the weight of an electric car is both positive and negative, positive when it increases range but negative when regenerative braking gives energy back to the battery and benefits from higher weight. Other aspects of why AM is not used to a greater extent are because of the metal powder being very expensive, the production speed is low and AM is best suited for production in smaller series. The conclusion is that it is possible to create lightweight solutions using AM in metal but it is not always advantageous because of the limitations stated above.

Keywords: Additive manufacturing, lightweight solutions, electric powertrain, electric drivetrain

Sammandrag

Fordonsindustrin står inför stora utmaningar som innebär att ställa om från förbränningsmotordrift till eldrift, där den konventionella motorn byts ut mot en "e-axel", och transmissionen samt kraftelektroniken integreras i en kompakt lösning. Att fortsätta utveckla den elektriska drivlinan kräver komplexa lösningar vilket ställer krav på dagens traditionella tillverkningsmetoder. Additiv tillverkning (AM), även kallat 3D-printing i vardagligt tal, är en tillverkningsmetod som fått stor uppmärksamhet de senaste åren på grund av sina fördelaktiga egenskaper till att skapa geometriskt smarta och funktionella lättviktslösningar. Syftet med rapporten är att visualisera hur det är möjligt att applicera lättviktslösningar på elektriska drivlinor via AM. Syftet är också att analysera varför AM inte används mer i industrier idag. Studien innefattar ett antal begränsningar; Studien behandlar endast AM i metall, studien fokuserar endast på personbilar och tar inte hänsyn till specifika kostnadsanalyser. Rapporten baseras på en litteraturstudie och de källor som använts är vetenskapliga artiklar, tidsskrifter, böcker samt hemsidor. I diskussionen analyseras huruvida det är lämpligt att använda AM på olika komponenter i drivlinan, vilket mynnar ut till att det inte är användbart för större delar som utsätts för stora cykliska laster då det resulterar i utmattning. Mindre komponenter med komplexa geometrier och designkrav går däremot mycket bra att tillverka via AM. Vidare diskuteras prestandan, som via fackverkstrukturer kan konstrueras för att minska oljud i drivlinan. Effekten av att sänka vikten hos en elbil är både positiv och negativ, positiv då det ökar räckvidden men negativ då regenerativ inbromsning ger tillbaka energi till batteriet och gynnas av högre vikt. Andra aspekter till varför AM inte används i större utsträckning är för att metallpulver är väldigt dyrt, produktionshastigheten är låg och AM lämpar sig bäst för produktion i mindre serier. Slutsatsen är att det är möjligt att skapa lättviktslösningar med hjälp av AM i metall men det är inte alltid fördelaktigt på grund av de begränsningar som nämnts ovan.

Sökord: Additiv tillverkning, lättviktslösning, elektrisk drivlina.

Förord

Rapporten har utförts inom ramarna av ett kandidatarbete under våren 2022 vid Chalmers tekniska högskola. Projektgruppen som utfört arbetet har bestått av sex studenter som studerar vid civilingenjörsprogrammet inom Maskinteknik. Projektet genomförs vid Institutionen för industri- och materialvetenskap och är framtaget av professor Lars Nyborg som också är examinator, samt universitetslektor Mats Norell som är handledare. Vi vill rikta ett stort tack till er för all stöd och hjälp som vi fått under projektets gång. Utan er hjälp hade arbetet inte varit genomförbart.

Sandra Jaksic

Julia Johnsson

William Johansson

Sofia Jost auf der Stroth

Sofia Nilsson

Emilia Palm, *Göteborg, 2022.*

Innehåll

Begreppslista	xi
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Problemformulering	3
2 Metod	5
2.1 Forskningsdesign	5
2.2 Litteraturstudie	5
3 Additiv tillverkning	7
3.1 Bakgrund till additiv tillverkning	7
3.2 Processer inom additiv tillverkning	8
3.3 Selective Laser Sintering	9
3.3.1 Historia	9
3.3.2 Teknik	10
3.3.3 Material	11
3.3.4 Begränsningar	11
3.3.5 Tillämpningar och industrier	12
3.4 Selective Laser Melting	12
3.4.1 Historia	12
3.4.2 Teknik	12
3.4.3 Material	13
3.4.4 Begränsningar	14
3.4.5 Tillämpningar och industrier	14
3.5 Electron Beam Melting	14
3.5.1 Historia	14
3.5.2 Teknik	15
3.5.3 Material	16
3.5.4 Begränsningar	16
3.5.5 Tillämpningar och industrier	17
3.6 Directed Energy Deposition	17
3.6.1 Historia	17
3.6.2 Teknik	17

3.6.3	Material	19
3.6.4	Begränsningar	19
3.6.5	Tillämpningar och industrier	19
3.7	Binder Jetting	19
3.7.1	Historia	20
3.7.2	Teknik	20
3.7.3	Material	21
3.7.4	Begränsningar	21
3.7.5	Tillämpningar och industrier	22
3.8	Additiv tillverkning i produktion	22
3.8.1	Kostnad	22
3.8.2	Produktionshastighet	22
3.8.3	Additiv tillverknings påverkan på värdekedjan	23
4	AM och konstruktion	25
4.1	Bakgrund	25
4.2	Utformning av lättviktslösningar	26
4.3	Metoder för utformning av lättviktslösningar	27
4.3.1	Topologioptimering	27
4.3.2	Topologioptimering med gitterstrukturer	27
4.4	Mekanisk prestanda	28
4.4.1	Mikroskopiska aspekter	28
4.4.1.1	Defekter	29
5	Elektriska drivlinor	31
5.1	Bakgrund	31
5.2	Elektrisk drivlina	31
5.2.1	Batteriet	32
5.2.2	Spänningsomvandlare (DC-AC)	32
5.2.3	Laddare	32
5.2.4	Enväxlad växellåda	33
5.2.5	Elektrisk motor	33
5.2.5.1	Borstad motor	33
5.2.5.2	Borstlös motor	33
5.2.5.3	Permanentmagnet synkronmotor (PMSM)	34
5.2.6	Asynkronmotor	34
5.3	Komponenter i drivlinan	34
5.3.1	Transmission	34
5.3.1.1	Transmissionshuset	34
5.3.1.2	Kugghjul	35
5.3.2	Elektrisk motor	36
5.3.2.1	Motorhuset	37
5.3.2.2	Stator & Rotor	37
5.3.2.3	Permanenta magneter	37
5.3.2.4	Kopparlindningar	38
5.4	En jämförelse av en elektrisk och en konventionell drivlina	38
5.5	Viktreducering i dagens läge	39

6	Diskussion	41
6.1	AM-processernas möjligheter och begränsningar	41
6.1.1	Dimensioner	42
6.1.2	Geometrier	42
6.1.3	Material	43
6.1.4	Hållfasthet	43
6.1.5	Produktionshastighet	43
6.1.6	Kostnadsperspektiv	43
6.2	Tillämpning av additiv tillverkning	44
6.2.1	Additiv tillverkning av komponenter i drivlinan	44
6.2.2	Miljöpåverkan	45
6.2.3	Användning av additiv tillverkning inom fordonsindustrin idag	46
7	Slutsats	49
8	Rekommendationer	51
	Litteraturförteckning	53

Begreppslista

Förkortning	Begrepp	Definition
AM	Additive Manufacturing	Additiv tillverkning
SLS	Selective Laser Sintering	En additiv tillverkningsmetod som baseras på en metallpulverbädd och sintrar ihop pulvret med laser.
SLM	Selective Laser Melting	En additiv tillverkningsmetod som baseras på en metallpulverbädd och smälter ihop pulvret med laser.
PBF-LB	Powder Bed-Fusion-Laser Beam	Standardterminologi för SLM enligt ASTM/ISO.
EBM	Electron Beam Melting	En additiv tillverkningsmetod som baseras på en metallpulverbädd och smälter ihop pulvret med elektronstråle.
PBF-LB	Powder Bed-Fusion-Electron Beam	Standardterminologi för EBM enligt ASTM/ISO.
DED	Directed Energy Deposition	En additiv tillverkningsmetod som baseras på en metallpulverbädd som sammanfogas med laser- eller elektronstråle.
BJ	Binder Jetting	En additiv tillverkningsmetod som baseras på en metallpulverbädd och använder bindemedel för att sammanfoga pulvret.
TO	Topology Optimization	En matematisk metod som optimerar placering av material inom ett design utrymme för givna påfrestningar.
LTO	Lattice Topology Optimization	En matematisk metod som optimerar tjocklek på element i en given cellstruktur inom ett design utrymme för givna påfrestningar.

Innehåll

FEM	Finita Element Metoden	En numerisk metod för att approximativt beräkna partiella differentialekvationer med hjälp av ett beräkningsnät av noder och element.
-----	---------------------------	--

1

Introduktion

Dagens fordonsindustri står inför en stor omställning i takt med den ökade efterfrågan av elektriska fordon. En stor utmaning som de elektriska fordonen ställs inför är just viktbesparing. När det kommer till tillverkningsmetoder i kombination med design är additiv tillverkning en mycket bra metod för viktreducering. Mycket forskning sker just nu inom detta område och industrin har börjat implementera detta i sina kommersiella fordon (3Dnatives, 2021).

Det är därför intressant att undersöka de möjligheter additiv tillverkning bidrar till när det kommer till att reducera vikten på en elektrisk drivlina, till exempel genom att optimera topologin för en komponent. Denna rapport syftar till att belysa samband mellan additiv tillverkning och elektriska drivlinor samt att analysera de begränsningar och möjligheter som existerar vid implementering av tillverkningsmetoden i fordonsindustrin.

1.1 Bakgrund

I samband med den stora utvecklingen som sker inom additiv tillverkning pågår samtidigt en stor omställning i fordonsindustrin där elektriska drivlinor börjar bli alltmer förekommande. Detta ställer stora krav på produktionen för att ställa om till att tillverka nya typer av produkter. Additiv tillverkning öppnar upp en större frihet när det kommer till strukturdesign som inte går att jämföra med traditionella tillverkningsmetoder (Gibson, Rosen & Stucker, 2021). Elektriska drivlinor skapade genom additiv tillverkning i metall skulle kunna leda till att de blir mer kraftfulla, kompakta och framförallt lättare. Därav finns det ett behov att ta reda på vilka möjligheter som finns inom additiv tillverkning, för att kunna utnyttjas till skapandet av lättviktslösningar på elektriska drivlinor.

Additiv tillverkning, förkortat AM, är det samlingsnamn för den teknik som tidigare benämnts som “Rapid Prototyping” och som i folkmun vanligtvis benämns som 3D-tillverkning (Gibson m. fl., 2021). Additiv tillverkning syftar till en transformativ metod som används för industriell produktion för att exempelvis möjliggöra skapandet av lättare, starkare delkomponenter och system. Processen utgörs av, som namnet antyder, att addera material lager för lager för att skapa ett objekt. Den autonoma processen utgår ifrån en 3D-modell, som definieras digitalt av programvara med datorstödd design. Därefter konverteras 3D-modellen

till tvådimensionella tvärsnitt för att styra hårdvara som avsätter material lager på lager, i exakta geometriska former. Varje efterföljande lager binder till det föregående skiktet genom smält material eller delvis smält material för att skapa slutprodukten. Ju tunnare de skapade tvådimensionella tvärsnitten är, desto närmare kommer den slutgiltiga delkomponenten att efterlikna CAD-modellen (GE Additive, 2021). Detta avviker från traditionella metoder som skärande bearbetning, där metoden syftar till att avverka material från ett redan befintligt arbetsstycke av råmaterial.

Den första utvecklingen av de metoder som ligger bakom additiv tillverkning började redan på 80-talet i Japan. Metoden grundade sig i att härda fotopolymerer genom att utsätta materialet för ljus, för att kunna ändra dess egenskaper, och på så sätt forma till tredimensionella kroppar (Gibson m. fl., 2021). Sedan dess har AM gjort stora framsteg och ses som en metod med stor potential när det kommer till att digitalisera produktutveckling och tillverkningstekniker. De kommersiella AM-maskiner som existerar idag använder sig som sagt av en lagerbaserad metod, och den största skillnaden mellan maskinerna är vilket material som kan användas, hur lagren skapas, samt hur skikten binder till varandra. Dessa skillnader har stor betydelse när det kommer till faktorer så som materialegenskaper och mekaniska egenskaper samt noggrannheten hos den slutgiltiga produkten (Gibson m. fl., 2021).

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att ge insikt i och analysera möjligheter och begränsningar för att applicera lättviktslösningar på elektriska drivlinor via additiv tillverkning i metall. Syftet är också att undersöka varför additiv tillverkning inte används mer inom dagens fordonsindustri. Målet är att skapa ökad förståelse för hur dessa metoder kan implementeras och på så sätt ge potentiella möjligheter för viktreducering hos elektriska drivlinor och därmed bidra till exempelvis minskad miljöpåverkan.

1.3 Avgränsningar

Projektet omfattar 15 högskolepoäng och är tidsbegränsat med ett slutdatum den 12 maj. Då additiv tillverkning även är ett mycket omfattande område medför detta att arbetet har ett antal avgränsningar. En av dessa avgränsningar är att den slutgiltiga rapporten endast kommer att inkludera metoder inom additiv tillverkning i metall. Arbetet kommer inte att djupare analysera de ekonomiska aspekterna, som exempelvis specifika kostnadsanalyser för de valda tillverkningsmetoderna. En ytterligare avgränsning är att endast analysera elektriska drivlinor hos elektrifierade personbilar.

1.4 Problemformulering

De frågor som kommer att besvaras i kandidatarbetet baseras på syftet och är följande:

Lättviktslösningar kan utformas på flera olika sätt, där additiv tillverkning kan bidra till möjligheten till realisering. För att kunna optimera tillverkningen av lättviktskonstruktioner behöver fördelar och nackdelar med olika metoder inom additiv tillverkning analyseras.

Hur kan olika metoder inom additiv tillverkning appliceras för att skapa lättviktslösningar?

Tillämpade kunskaper inom additiv tillverkning i metall och inom lättviktslösningar kan användas för att optimera elektriska drivlinor, exempelvis kunna åstadkomma viktreducering för elbilar.

Hur kan lättviktslösningar tillämpas i elektriska drivlinor via AM?

Additiv tillverkning används av flera stora företag och industrier i dagsläget men det är fortfarande vanligare att andra mer traditionella tillverkningsmetoder används.

Varför används inte additiv tillverkning i större utsträckning inom fordonsindustrin idag?

2

Metod

I följande kapitel presenteras den forskningsmetodik som har nyttjats under arbetet. All kunskapsproduktion har baserats på en litteraturstudie för att kunna besvara frågeställningarna.

2.1 Forskningsdesign

Arbetet grundade sig i en tillämpad och kvalitativ forskningsmetodik. Tillämpad forskning handlar om att hitta en lösning till ett specifikt praktiskt problem som till exempel samhället eller ett företag står inför (Kothari, 2004). I detta fall var problemet som behandlades den höga vikten av elektriska drivlinor. Detta problem påverkar samhället bland annat ur ett miljöperspektiv. Det är även ett problem som företag står inför eftersom deras mål är att tillverka produkter som accepteras och uppskattas av samhället.

Då studien var av kvalitativ typ, innebär det att fokus har varit på att analysera källor på djupet, där kvantitet av data har mindre betydelse (Kothari, 2004). Detta lämpar sig bra då syftet med projektet var att undersöka redan befintlig teknik och få en djupgående förståelse för att kunna observera gemensamma tillämpningsområden. Projektet började med en kortare inledande litteraturstudie, med syfte att belysa problemet och temat för projektet. Detta bidrog till att projektets syfte och frågeställning kunde utvecklas och slutdefinieras. När projektets syfte blev fastställt påbörjades en mer djupgående litteraturstudie där metoder för additiv tillverkning, utformningen av lättviktskonstruktioner samt elektriska drivlinor undersöktes. Slutligen analyserades hur och vilka slutsatser som kunde dras baserat på resultatet från denna analys. Processen var iterativ, vilket innebar att alla moment var återkommande, och då även att frågeställningen omdefinierades under projektets gång.

2.2 Litteraturstudie

Projektets uppbyggnad och utformning utgörs av en litteraturstudie. En litteraturstudie är en metodisk, systematisk och kritisk granskning av litteratur utifrån ett vetenskapligt syfte. Litteraturen som användes var vetenskapliga publikationer, avhandlingar, artiklar och böcker i vetenskapliga tidskrifter. Tidigt i

arbetet gav litteraturstudien en grundläggande förståelse om additiv tillverkning, elektrifierade drivlinor och utformning av lättviktskonstruktioner, och i den senare delen av arbetet utgjorde litteraturstudien ett underlag för diskussion och analys. Databaser från Chalmers bibliotek och Google Scholar är två sökmotorer som användes frekvent och iterativt under processens gång.

I en litteraturstudie är källkritik (Nationalencykpedin, 2022) en väsentlig del som togs i beaktning. Källkritik är en central vetenskaplig metod för att bedöma huruvida uppgifterna från en viss källa är trovärdig och tillförlitlig. Det finns tre olika kriterier för källkritik: tidskriteriet, beroendekriteriet samt tendenskriteriet. Tendenskriteriet, är en bedömning av upphovsmannen har för intresse att påverka eller om det finns risk att källan på något vis har en förvrängd bild av verkligheten. Beroendekriteriet, där man bedömer samstämmiga källors interna beroende av varandra, samt tidskriteriet som innebär att ju närmre i tiden en källa är skriven, desto mer trovärdig är dess uppgifter.

Sökord:

Binder Jetting, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Electron Beam Melting, Selective Laser Melting, Direct Energy Deposition, Laser Powder Deposition, Lättviktslösning, Lättviktskonstruktion, Topologioptimering, Fackverkstopologioptimering, Elektrisk drivlina, Electric powertrain, Electric driveline, Batteri, AC-DC-converter, Elmotor, Brushed motor, Brushless motor, Permanent Magnet Synchronous Machine, One gear transmission, Charger, Transmission, Finite element, Fatigue, Additive manufacturing, Lattice structure, Metals, Defects, Microstructure, Fatigue performance, Surface roughness, Flaw size, Low cycle fatigue, Anisotropy, Heterogeneity, Properties, Design for additive manufacturing (DfAM), Topology optimisation, Lattices, Lightweight structures, Lightweight design, Honey comb structure, Truss structure, Additive manufacturing cost, Additive manufacturing post processing.

3

Additiv tillverkning

En viktig del i litteraturstudien är att undersöka hur metoderna inom additiv tillverkning kan appliceras för att vidare analysera deras möjligheter. Kapitlet avser att beskriva samt ge större inblick i de olika tillverkningsmetoder som existerar inom additiv tillverkning. De metoder som kapitlet syftar till att ge större insyn i är *Binder Jetting*, *Beam Metal Deposition*, *Selective Laser Sintering*, *Selective Laser Melting* samt *Electron Beam Melting*. Kapitlet inleds med en bakgrund och historien bakom additiv tillverkning i stort samt de processer som förekommer. Därefter följer en mer djupgående beskrivning samt en redogörelse för teknik, material, begränsningar och tillämpningar för respektive teknik.

3.1 Bakgrund till additiv tillverkning

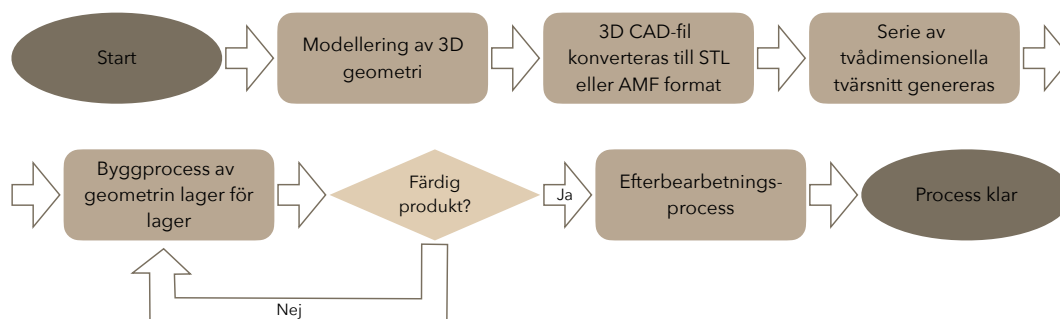
Den historiska utvecklingen av additiv tillverkning (AM) är svår att definiera då flera hävdar att aktivitet kopplat till denna metod, i form av att sammanfoga material, existerade redan på 1950-talet. Det var inte förrän 1984 då flera parallella patent lämnades in som additiv tillverkning kom att kommersialiseras. Patenten beskrev då en metod för att skapa en tredimensionell modell genom att lägga till material lager för lager. Även om flera av patenten grundade sig i samma koncept var det patentet av Charles Hull som gav störst intryck och därmed blev grunden till den första kommersialiserade tekniken inom additiv tillverkning (Gibson m. fl., 2021). Metoden som utvecklades av Charles Hull var stereolitografi som innebär att härdning av polymert material sker genom ultraviolett ljus. Två år efter att patentet tagits fram, år 1986, startar Hull tillsammans med andra företaget, 3D Systems som kom att bli det första företaget i världen som använde AM. Ytterligare ett år framåt säljer 3D Systems sin allra första kommersiella 3D-utskrivare Stereolithography printer, SLA (3D SYSTEMS, u. å.). Efter kommersialiseringen av SLA introducerades ytterligare en teknik, nämligen *Selective Laser Sintering* (SLS) av DTM CORP. Teknikerna är relativt lika då de båda använder laser för att sammanfoga polymerer och används fortfarande idag för tillverkning av prototyper (AM Power, 2019).

Efter den första utvecklingen av AM implementerade flera företag tekniken och flera metoder inom AM har tillkommit. Några av de företag som jobbar med AM idag inkluderar bland annat Höganäs, HUBS, GE Additive, EOS och ExOne. Företaget EOS menar att AM bidrar till övertygande fördelar som att

produktutveckling, produktionsanpassning och marknadsinträde kan uppnås snabbare till en lägre kostnad. I takt med dagens digitalisering av industrin och hållbarhetsmål inom produktion anses AM vara en teknik som kommer att användas alltmer i framtiden (EOS, 2022).

3.2 Processer inom additiv tillverkning

Additiv tillverkning innefattar ett antal olika tekniker som har förmågan att skapa geometriska former i en automatiserad process genom att översätta digital modelldata. Alla additiva tillverkningsprocesser drivs av en grundläggande princip, men det finns skildringar när det kommer till hur lagren skapas samt hur de binds samman (Gibson m. fl., 2021).



Figur 3.1: Tillverkningsprocessens fem grundläggande steg för additiv tillverkning

Denna princip kan delas upp i fem grundläggande steg, vilket kan ses i *Figur 3.1*, där det första steget syftar till genereringen av en tredimensionell modell av komponenten som ska skapas. Denna definieras med hjälp av programvara med datorstödd design som exempelvis Catia. Det andra steget avser att konvertera datan till ett filformat som är anpassat till att kunna styra AM-maskinen. De två filformaten som anses vara standard och accepteras av alla typer av AM-maskiner är formatet *Additive Manufacturing File*, AMF, eller *Standard Triangulation Language*, STL (Mahamood m. fl., 2021). Utifrån datan skapas en serie av tvådimensionella tvärsnitt som har ändamål att styra programvaran i AM-maskinen, vilket kännetecknas som det tredje steget i processen. Innan modellen bryts ner i dessa tvådimensionella tvärsnitt måste detaljorientering för byggprocessen optimeras, vilket görs utifrån ett antal parametrar. Därefter tillhandahålls stödstrukturer om metoden kräver det och tvärsnitten skapas på lika avstånd för att ge grund till skapandet av komponenten (Gibson m. fl., 2021).

Det fjärde steget avser producerandet av detaljen, vilket är den process som skiljer sig något åt mellan de olika teknikerna. Gemensamt för alla tekniker i detta steg är att delen tillverkas genom att material avsätts i lager utifrån det tvärsnitt som kommer från den ursprungliga datan. Detta tillåter den digitala geometrin att reproduceras till en fysisk modell utan att tillverkningsprocesser behöver justeras. Det sista och femte steget i processen är efterbearbetningsprocessen. I följande

steg avlägsnas eventuella stödstrukturer och löst pulver. Produkten rengörs även och eventuell efterbehandling av delen genomförs. (Gibson m. fl., 2021)

De olika tillverkningstekniker som förekommer kan delas in i tre större områden vilka är stereolitografi, smältning och sintring. Stereolitografi, som är den första tekniken inom AM som skapades, avser en process där fotopolymerer härddas genom att utsättas för ultraviolett laser för att skapa keramiska delar som klarar extrema temperaturer. Den andra metoden, smältning, syftar till att materialet smälts fullständigt. Detta område behandlar *Powder Bed Fusion-Laser Beam* som i detta arbete kommer att benämnas som *Direct Laser Metal Sintering* och använder laser för att smälta lager av metallpulver. En ytterligare metod som behandlar detta område är *Powder Bed Fusion-Electron Beam* som är standardbeteckningen för metoden, men i arbetet kommer begreppet *Electron Beam Melting* att användas. Metoden använder en elektronstråle för att smälta pulverbädden. Det sista och tredje området, sintring, menas med att materialet sammanfogas genom höga temperaturer utan att bli flytande. Denna metod behandlas i tekniken *Selective Laser Sintering* som använder laser på pulver av termoplast för att sammanfoga partiklarna (TWI, u. å.-a). De tre områdena yttrar sig i de tekniker som existerar innan AM vilket kommer att beskrivas mer detaljerat i följande kapitel. De olika tekniker som kommer att behandlas i denna rapport är *Selective Laser Melting*, *Selective Laser Sintering* och *Direct Laser Metal Sintering* vilka ingår i standardbeteckningen *Powder Bed Fusion-Electron Beam*, *Electron Beam Melting* som har standardbeteckningen *Powder Bed Fusion-Electron Beam*, *Directed Energy Deposition* samt *Binder Jetting*.

3.3 Selective Laser Sintering

I detta kapitel presenteras metoden *Selective Laser Sintering*, även förkortat SLS, som är en metod inom additiv tillverkning som funnits i ca 35 år. SLS baseras på en pulverbäddsteknik vid framtagandet av komponenter. Den additiva tillverkningsmetoden *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) kommer även att presenteras då metoden använder sig av samma teknik som SLS fast endast för metallpulver. *Powder Bed Fusion-Laser Beam* är standardbeteckningen för de två metoderna, men kommer att beskrivas som SLM och DMLS eftersom att dessa beskriver grundkonceptet av tekniken. Kapitlet inkluderar SLS ursprung, hur tekniken fungerar, vilka material som kan användas, metodens begränsningar och i vilka industrier metoden kan appliceras i (David Cullen, 2019).

3.3.1 Historia

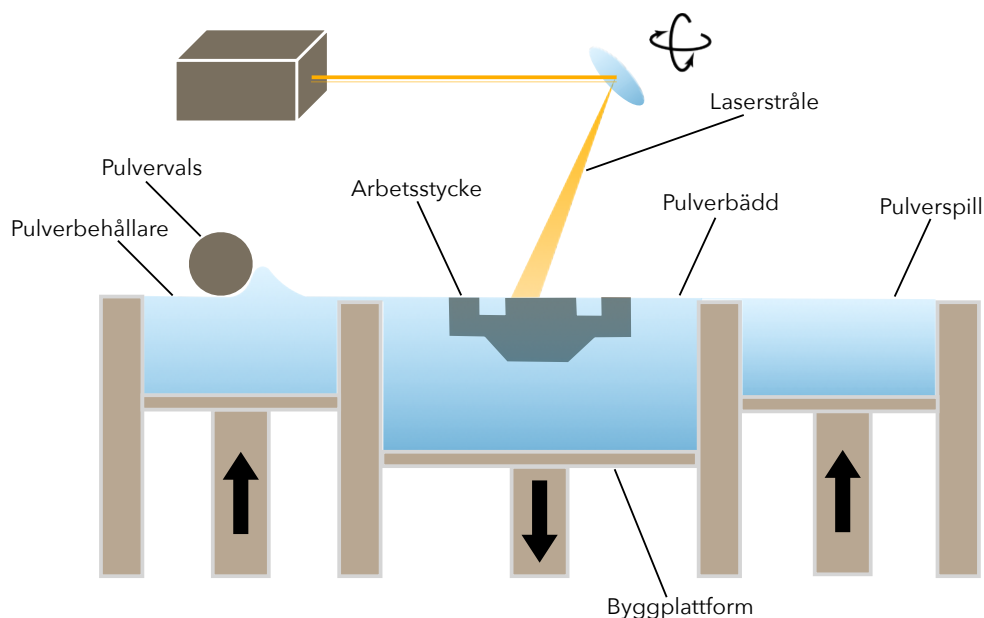
Selective Laser Sintering har sin härkomst från University of Texas, USA. Metoden uppfanns av Carl Deckard i mitten av 1980-talet under sina doktorsstudier tillsammans med sin professor Dr. Joe Beeman. Metoden realiserades och utvecklades vidare när Deckard och Beeman startade företaget DTM år 1992 som designade och byggde SLS-maskiner. Den första SLS-maskinen tillverkade små kuber i plast, det var dock tillräckligt för att demonstrera och visa

dess potential. Företaget köptes senare upp av 3D Systems, som idag använder SLS för 3D-printing inom områden som till exempel tillverkning av implantat till kirurgiska ingrepp samt komponenter till bil- och flygindustrin (Shellabear, Nyrhila, Geiger & Otto, 2004).

1995, tre år efter att den första SLS maskinen byggdes lanserade företaget EOS maskiner som baseras på den additiva tillverkningsmetoden DLMS. Metoden bygger på samma teknik som SLS och var den första tekniken som använde sig av metall i tillverkningsprocessen (Shellabear m. fl., 2004).

3.3.2 Teknik

Tillverkningen av tredimensionella geometrier via *Selective Laser Sintering* utgår från att horisontella skikt byggs lager för lager där precisionen för hur lagren ska byggas utgår från en programvara, detta kallas för att en geometri skiktas. Varje enskilt skikt har en tjocklek som ligger inom intervallet 0,1-15 millimeter, och tjockleken väljs beroende på vilken upplösning som eftersträvas. I tillverkningsprocessen för SLS i metall används två typer av pulver. Det första metallpulvret är förlegerat pulver, och det andra är multifunktionellt. Det multifunktionella pulvret består av en metallisk del med låg smältpunkt som agerar bindemedel, en metallisk del som har en hög smältpunkt, samt tillsatser av antingen flussmedel eller oxideringsmedel (Kruth, Froyen, Rombouts, Van Vaerenbergh & Merccells, 2003).



Figur 3.2: Principskiss över tillverkningsprocessen vid *Selective Laser Sintering*

I det första steget i processen hålls partiklar av givet material ut i en byggkammare som utgör en så kallad pulverbädd. Sedan smälter lasern ihop partiklarna i det förutbestämde området så att det bildar ett sammankopplat lager. Efter varje färdigt lager sänks pulverbädden ned med samma tjocklek som

ett lager utgör, och ett nytt lager pulver placeras ovanpå. Därefter fortsätter lasern att smälta ihop det aktuella lagret och ungefär 0,02 millimeter ned i lagret under. Detta innebär att komponenten inte smälts helt, utan att den delvis smälter medan andra delar i geometrin behåller sin fasta form. Processen upprepas och fortgår tills att komponentens geometri är fullständig. I *Figur 3.2* illustreras tillverkningsprocessen för SLS i form av en principskiss. I många andra fall då komponenter framställs genom additiv tillverkning kan stödstrukturer behövas. En fördel med SLS är att detta inte behövs eftersom komponenten hålls på plats och får stöd av det omkringliggande pulvret. Densiteten i komponenten utgörs primärt av vilken kapacitet lasern har och inte av exponeringstiden. För att uppnå en hög kapacitet i lasern hos en SLS-maskin används mestadels en pulserande laser. För att effektivisera processen värms pulverbädden upp till en temperatur som är precis under materialets smältpunkt (Kruth m. fl., 2003). DMLS och SLS har samma funktioner och bygger på samma teknik för att 3D-printa komponenter. DMLS innebär till skillnad från SLS att komponenterna endast tillverkas i metall.

Efter att komponenten sintrats ihop fortsätter processen genom att komponenten kyls. Kylningen varierar och kan ta upp till 30 timmar. Därefter följer eventuell bearbetning och kontrollmätning av komponenten. Överblivet pulver under tillverkningsprocessen kan återanvändas (3D-PRINTING, u. å.).

3.3.3 Material

Det vanligaste förekommande materialet vid användning av SLS är nylon, som är en termoplast (PROTOLABS, u. å.). Materialen som används vid DMLS är endast metaller, och de främst förekommande metallerna som används är verktygsstål, titan, kobolt, aluminium, samt stål och dess legeringar (Martinho, 2021).

3.3.4 Begränsningar

SLS och DMLS bygger på samma teknik, och delar därför de flesta för- och nackdelar. Båda processerna är relativt långsamma, samt att det är mycket kostsamma (Gordon Jones, 2021). 3D-printing via SLS skapar större friheter på grund av laserstrålens höga precision, och metoden har relativt få begränsningar. Något att ha i åtanke vid användning av SLS är att kylningstiden efter sintring kan utgöra 50% av tiden som det tar att skapa komponenten, vilket innebär att den totala produktionstiden förlängs. Vid tillverkning av komponenter kan det uppstå spänningar i strukturen vilket kan resultera i deformationer i den slutgiltiga komponenten. Vid SLS kan även laserstrålen orsaka ett fenomen som benämns balling. Balling innebär att smältan inte blir till en sammanhängande kropp utan istället skapar dislokaliserade sfärer (3D Sourced, 2021).

En begränsning vid användning av DMLS är att komponenterna som tillverkas erhåller en relativt liten storlek. En annan begränsning som DMLS har är det uppstår fel som blir minst 2% på grund av krympning. Detta kan dock korrigeras vid design och konstruktion. Det finns tre orsaker till att dimensionerna ändras, vilka är termisk krympning, krympning på grund av sintring och expansion

(Xometry Europe, 2021).

3.3.5 Tillämpningar och industrier

I dagsläget kan *Selective Laser Sintering* och *Direct Metal Laser Sintering* appliceras och användas i många industrier då tekniken är fördelaktig för att enkelt producera skraddarsydda, funktionella och komplexa komponenter (formlabs, u. å.). SLS och DMLS tillämpas bland annat i flyg;- och rymdbranschen. Det kan även vara användbart inom tandvården då 3D-printing kan användas vid framtagandet av proteser. Metoden används även för att tillverka bland annat specialbyggda verktyg samt vindtunnelmodeller (M. Revillia-León & Özcan, 2019).

3.4 Selective Laser Melting

Selective Laser Melting, som ingår i standardbeteckningen *Powder Bed Fusion-Laser Beam*, är en additiv tillverkningsteknik som uppfanns under ett forskningsprojekt vid Fraunhofer Institute for Laser Technology. I detta arbete kommer beteckningen SLM att användas eftersom att uppfinnarna döpte tekniken till detta, även om detta inte är standardbeteckningen. *Selective Laser Melting* förkortas SLM, och dess karaktäristiska drag gällande processen och bearbetning av komponenterna liknar en annan metod inom additiv tillverkning som benämns SLM, som presenterades i det förra kapitlet. Detta kapitel innefattar en bakgrund till SLM:s uppkomst, hur tekniken fungerar, samt vilka material och begränsningar som följer med tekniken. Vidare kommer även branscher som metoden primärt används i att presenteras.

3.4.1 Historia

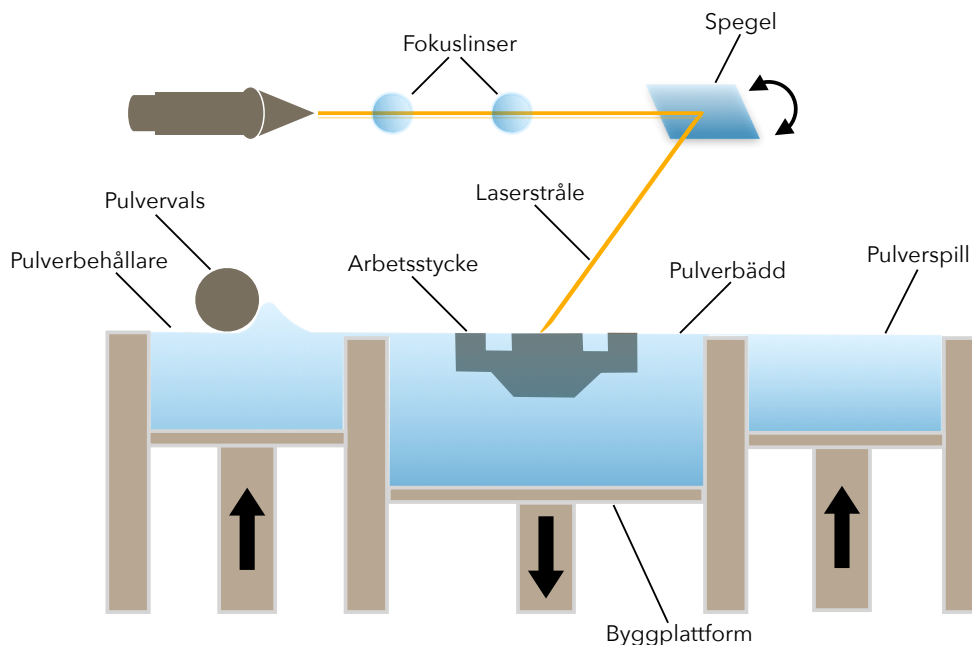
Selective Laser Melting utvecklades år 1995 vid Fraunhofer Institute for Laser Technology i Aachen, som ligger i Tyskland, av Dr. Dieter Schwarze och Dr. Matthias Fockele. Det började som ett forskningsprojekt som fortsatte att vidareutvecklas tillsammans med Fockele & Schwarze Sterelithographietechnik GmbH, även förkortat F&S. Samarbetet resulterade sedan i patentet De 19649865. 1998 uppfanns den första SLM-maskinen av F&S, och SLM-tekniken etablerades för första gången på marknaden vid milleniumskiftet. F&S började även i samma veva ett samarbete med företaget MCP HEK, som marknadsförde SLM-maskinerna som F&S hade skapat. Företaget MCP HEK bytte sedan namn till MTT Technologies Group och delades upp, där deras tyska avdelning och senare bytte namn till dagens SLM Solutions (SLM SOLUTIONS, u. å.). SLM Solutions hävdar att de idag, som grundarna till SLM, är ett ledande företag inom additiv tillverkning och 3D-printingmaskiner.

3.4.2 Teknik

Selective Laser Melting utgår precis som *Selective Laser Sintering* (SLS) från en pulverbädd av metall där komponenten skapas. I *Figur 3.3* illustreras tillverkningsprocessen för SLM i form av en principskiss. I starten av processen

täcks byggplattformen, som måste vara helt horisontell med metallpulvret. De mest frekventa metallerna som används vid SLM är aluminium, rostfritt stål och titan. Därefter smälter laserstrålen materialet, vilket innebär att allt material går från fast till flytande form, till skillnad från SLS där materialet endast smälter det aktuella lagret och 0,02 millimeter ned i komponenten. Det är möjligt att fullständigt smälta materialet på grund av kombinationen av en högeffektiv laser, en mindre träffyta och tunnare lager (Gu, 2015). Komponenterna framställs genom att den byggs upp lager för lager. Laserstrålen tillverkar varje lager i 2D, efter att lagret är klart sänks byggplattformen ned och nästa lager påbörjas. Processen återupprepas tills att 3D komponenten är färdigställd. När processen är klar börjar kylningsprocessen. Därefter plockas byggplattformen med komponenten ut ur maskinen och efterbearbetning av komponenten genomförs. Detta för att uppfylla eventuella krav som ställs i form av exempelvis ytfinhet. Delar av det metallpulver som inte används i processen kan återanvändas till nya processer. Även byggplattformen kan behöva bearbetas så att den blir plan och kan återanvändas.

SLM har förmågan att tillverka komponenter med upp till 99% densitet utan att efterbehandling är nödvändigt (Gu, 2015). SLM kan till skillnad från SLS bearbeta metaller och legeringar som ej består av järn. Detta gör att SLM är aktuell inom branscher som exempelvis flygindustrin (Gu, 2015).



Figur 3.3: Principskiss över tillverkningsprocessen vid *Selective Laser Melting*

3.4.3 Material

De metaller som är främst förekommande vid användning av *Selective Laser Melting* är aluminium, koppar, kobolt, titan, rostfritt stål, verktygsstål och dess legeringar (Zhu m. fl., 2017).

3.4.4 Begränsningar

Selective Laser Melting jämfört med *Selective Laser Sintering* kan skapa en bättre precision vid tillverkning av komponenterna på grund av att laserstrålen innehåller mer energi. Detta innebär att det ställs högre krav på laserstrålen, vilket innebär att den kommer att ha högre effekt och precision jämfört med laserstrålen kopplat till SLS. Det krävs även att pulverlagrena är tunnare. Summan av de hårdare kraven resulterar i längre tillverkningstider. Det finns även en risk för att det uppstår krympningar när den smälta metallen övergår från flytande till fast form, vilket påverkar komponentens geometri då den inte krymper homogent över kroppen (exometry, 2021). Under denna stelningsprocess kan även spänningar i komponenten tillkomma, vilket kan orsaka defekter som resulterar i sprickor. Om det inträffar uppnår inte komponenten dess fullständiga krav på densitet (Gu, 2015).

3.4.5 Tillämpningar och industrier

Med hjälp av *Selective Laser Melting* kan komplexa geometrier med hög hållfasthet tas fram, vilket gör att den additiva tillverkningsmetoden kan utnyttjas av många industrier och branscher. Metoden tillämpas exempelvis inom rymdindustrin för att tillverka lättviktskomponenter (Greenemeier, 2012). SLM används även inom vården till medicinska implantat i titan till patienter, exempelvis i situationer när implantatet fästs i benet med hjälp av titanskruvar eller för att skapa höftkolor (M. Revillia-León & Özcan, 2019). Fordonsindustrin kan även dra nytta av designfriheten som SLM medför, vilket kan skapa flera fördelar som exempelvis utformning av komponenter som annars inte hade varit möjlig. En annan positiv aspekt för fordonsindustrin är att legeringar med lägre densitet kan väljas för att skapa lättviktslösningar (foundry-planet, 2014). Precis som SLS används SLM även för att framställa verktyg, och används även för att tillverka smycken i smyckesbranschen (Guo & Leu, 2013).

3.5 Electron Beam Melting

Electron Beam Melting, förkortat EBM, är en additiv tillverkningsmetod som är baserad på en metallpulverbädd. Standardbeteckningen för metoden är *Powder Bed Fusion-Electron Beam*, men i arbetet kommer EBM att användas. Denna metod är effektivare jämfört med SLM och SLS. Metoden uppnår dock inte samma ytfinhet när komponenterna är färdigställda. EBM tillämpas i industrier som medicinteknik och flygindustri. Vidare i detta kapitel kommer EBM att förklaras på ett djupare plan.

3.5.1 Historia

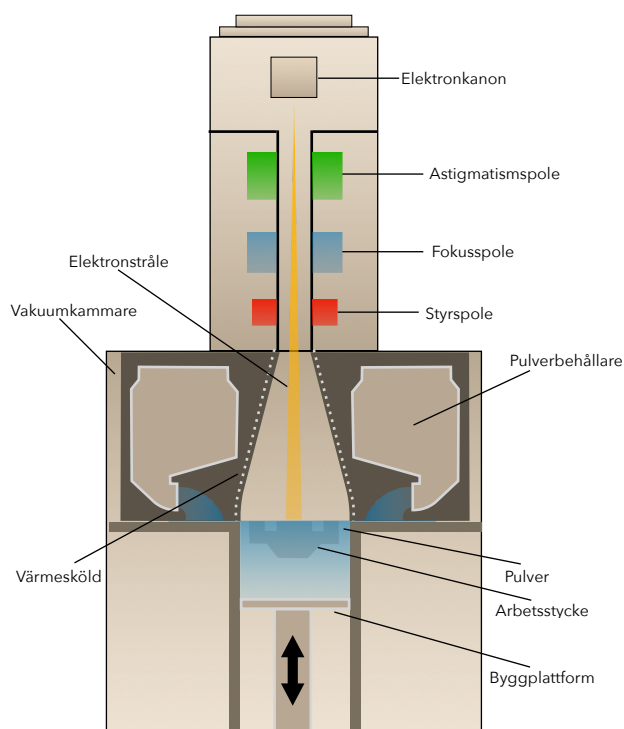
Electron Beam Melting utvecklades under 1990-talet när det nuvarande friforms företaget Arcam AB inledde ett samarbete med Chalmers tekniska högskola. Deras gemensamma forskning hade som mål att utveckla en metod för 3D-printing

genom att smälta elektriskt ledande pulver med hjälp av en elektronstråle. Det resulterade i ett patent som baseras på grundprinciperna av EBM (Markforged, u. å.). Fyra år efter att samarbetet inleddes, grundades Arcam AB år 1997, som har fortsatt utvecklingen inom EBM. Företaget har sedan det grundades varit det enda på marknaden som vidareutvecklats och sålt tekniker baserat på EBM. Det första systemen såldes år 2003, och används idag inom olika branscher. Idag är Arcam AB en del av GE Additive, och har varit så sedan 2017 (GE Additive, u. å.-a).

3.5.2 Teknik

Electron Beam Melting baseras på en pulverbäddstenik i metall, där en stråle som är fylld med elektroner smälter metallen. Varje lager har en tjocklek på 0,05-0,1 millimeter (Städje, 2013). Efter att varje lager är klart sänks byggplattformen ned och ett nytt lager påbörjas. Elektronstrålen styrs med hjälp av elektromagnetiska spolar och strålens förflyttning kan uppgå till en hastighet på 8000 m/s. Det finns en extra elektrisk spole som kontrollerar att strålen träffar pulverbädden vinkelrätt och att strålen är cirkulär när den träffar fokuspunkten. Den elektriska spolen benämns som astigmatismspole på grund av att den motverkar astigmatism, som betyder att strålen är elliptisk och inte cirkulär. De andra spolarna benämns som fokusspole och styrspole, som har till syfte att styra och fokusera den elektriska strålen. Processen äger rum i en vakuunkammare för att säkerställa att tillverkningen sker i en ren och kontrollerad miljö. (GE Additive, u. å.-b). I *Figur 3.4* illustreras tillverkningsprocessen för EBM i form av en principskiss.

Multibeam är ett värmningsmönster som används inom EBM vilket innebär att 100 stycken fokuspunkter kan smältas samtidigt. Detta sker genom att strålen värmer de olika fokuspunkterna sekventiellt med en hög effekt. Strålströmmen levererar max 3 kilowatt i fokuspunkten, vilket gör att metallpulvret snabbt smälts samman. Detta innebär att EBM erhåller möjligheten att skapa flera komponenter samtidigt. Elektronstrålen kan även användas för att hålla pulverbädden varm förutom att smälta materialet lokalt (Städje, 2013).



Figur 3.4: Principskiss över tillverkningsprocessen vid *Electron Beam Melting*

3.5.3 Material

Det material som används vid EBM har som krav att det måste vara metall, och metallen måste även vara konduktiv. Att en metall är konduktiv innebär att materialet kan transportera elektriska laddningar. EBM-processen är primärt utvecklad för att tillverka i materialen titan, volfram, vanadin, nickel, koppar, stål, zirkonium, tantal, niob, hafnium, molybden och deras tillhörande legeringar. De metallpulver som GE Additive rekommenderar till deras EBM maskiner är kobolt-krom, nickel, titan, koppar och stål (GE Additive, u. å.-c).

3.5.4 Begränsningar

Materialet som används vid *Electron Beam Melting* måste vara konduktivt, vilket innebär att det bara metaller som kan användas. Jämfört med två andra additiva tillverkningsmetoder SLS och SLM, så kan inte samma precision uppnås då grövre pulver används vid EBM. Det finns även en begränsning gällande hur stora komponenter som kan tillverkas. Maxvolymen vid användning av EBM för Q20 maskinen, som är en av de vanligaste maskinerna, är en bredd på 350 millimeter och en höjd på 380 millimeter (V., 2019). Dock kan komponenter som är större tillverkas i andra maskiner, turbinblad är ett exempel på en större komponent som kan printas. Även fast det är fördelaktigt att EBM-processen är effektivare, så blir de färdiga komponenternas yta skrovlig och kräver efterbehandling för att uppnå en fin ytfinitet. EBM-processen kräver även fullständigt vakuuum vilket sätter krav på tillverkningsprocessen.

3.5.5 Tillämpningar och industrier

EBM kan tillämpas i många industrier som exempelvis inom medicin och flygplansindustrin (GE Additive, u. å.-b). Tekniken skapar möjligheter att exempelvis tillverka stora komponenter som turbinblad inom flygindustrin. Då turbinblad har höga krav på sig och kräver bearbetning för att åstadkomma en hög ytfinhet oavsett 3D-framställning, så är det nödvändigtvis inte negativt att det blir en grov ytfinhet från EBM (Guo & Leu, 2013).

Inom medicin är det vanligt att EMB tillämpas för att framställa implantat. Ett exempel på detta är höftledskoppar, där 16 stycken koppar kan framställas samtidigt under en tillverknings tid på ca 10 timmar. Detta innebär att den individuella tiden per implantat kan hållas relativt låg (Städje, 2013).

3.6 Directed Energy Deposition

Directed Energy Deposition, även förkortat DED, är en teknik som använder sig av en fokuserad energikälla för att kontinuerligt smälta material som avsätts från ett munstycke. Termen DED omfattar flera olika tekniker där de vanligtvis bygger på samma generella teknik men skiljer sig åt i exempelvis lasertyp, laserpunktsstorlek och lasereffekt. Detta resulterar i att DED tillkännages av ett flertal olika förkortningar. De vanligaste beteckningarna som tekniken är känd under är *Laser Powder Deposition* (LPD), *Laser Metal Deposition* (LMD), *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Direct Metal Deposition* (DMD), *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) och *Laser Forming* (LASFORM) (TWI, u. å.-b). Där den grundläggande tekniken är gemensamt för dem alla.

3.6.1 Historia

LENS tillhör bland de första kommersialiserade DED-processerna som utvecklades. Metoden togs fram av Sandia National Laboratories i USA och licensierade senare ut till företaget Optomec Incorporated, år 1997. Optomec var företaget som kommersialiserade tekniken genom att lansera sin första maskin "LENS 750" samma år (Gibson m. fl., 2021).

3.6.2 Teknik

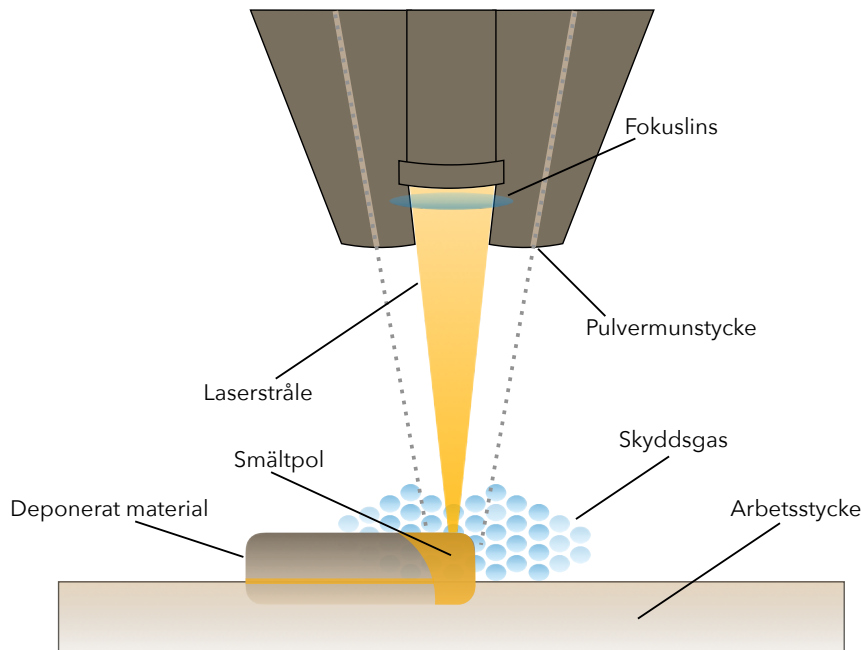
Laser Powder Deposition (LPD) är ett pulverbaserat lagerdeponeringssystem optimerat för metaller och tillhör den vanligaste tekniken som omfattas av DED-processen. Denna metod förklarar kärnprincipen bakom tekniken för DED och kommer därav användas som utgångspunkt i beskrivningen av tekniken.

LPD avser en metod som inte använder sig av en pulverbädd vid tillverkningsprocessen, likt de andra metoder som beskrivs i detta arbete. I *Figur 3.5* illustreras de ingående komponenter som en LPD-process innehåller. Systemet i en LPD-process använder ett typ av avsättningshuvud vilket vanligtvis består av laseroptik, pulvermunstycken, gasrör och ibland sensorer. Utöver det består

3. Additiv tillverkning

systemet även av en byggplattform och en fokuserad energikälla. Deponeringshuvudet tillhör ett 3- till 5-axligt system som verkar i flera riktningar, vilket uppnås genom att antingen byggplattformen, deponeringshuvudet eller båda två rör sig i relation till varandra (Gibson m. fl., 2021). Den fokuserade energikällan skiljer sig från olika tekniker inom DED-processen och är i form av antingen laser, elektronisk stråle eller plasmabåge (TWI, u. å.-b).

Processen inleder med att metall i form antingen pulver eller tråd matas in genom ett pulvermunstycke tillsammans med skyddsgas i den fokuserade energikällan som verkar för att smälta metallen. Därefter deponeras smältan ut med hjälp av det fleraxliga systemet över antingen en byggplattform eller en befintlig geometri (Gibson m. fl., 2021). Varje lager har en tjocklek på 0.25-0.5 milimeter (TWI, u. å.-b). Efter att ett lager är skapat och smältan har stelnat sänks byggplattformen nedåt och proceduren upprepas där ytterligare ett lager tillförs. Denna process repeteras fram tills att delen är fullständigt konstruerad eller reparerad (Gibson m. fl., 2021).



Figur 3.5: *Principskiss över tillverkningsprocessen vid Directed Energy Deposition*

3.6.3 Material

En mängd olika material kan användas vid tillverkning av tekniken *Directed Energy Deposition* däribland keramer, metaller och polymerer. Tekniken används främst dock till metall, där de flesta metaller som kan användas till svetsning även uppfyller kraven för användning av denna metod. Några av de material i metall som förekommer vid additiv tillverkning med hjälp av DED är aluminium, niob, rostfritt stål, tantal, titan och titanlegeringar samt volfram (TWI, u. å.-b).

3.6.4 Begränsningar

Ett resultat av DED-teknikens tillvägagångssätt vid producerandet är att det inte finns någon möjlighet till att använda stödstrukturer under processen. Detta medför att funktioner där komponenten har överhängande partier inte är möjligt att tillverka med denna metod (Engineering PRODUCT design, u. å.). Delar som tillverkas genom DED har även visats ha lägre prestanda och sämre ytfinitet jämfört med andra metoder. Efterbearbetning som exempelvis vattenblästring kan därav behöva genomföras vilket är mycket tid- och kostnadskrävande. Ytterligare en begränsning syftar till materialanvändningen då endast svetsbara material är lämpade till tekniken (TWI, u. å.-b). Dock har DED bredare materiallösningar än EBM och SLM, om man inkluderar tråd.

3.6.5 Tillämpningar och industrier

Directed Energy Deposition är en teknik som idag används främst till reparation av dyra metallkomponenter. Även om DED har visat mest potential när det kommer till reparation används tekniken i flertalet industrier som exempelvis flyg-, försvars-, marin- samt olje- och gasindustrin. I följande industrier utnyttjas tekniken till bland annat tillverkning av eldsäkra metallkomponenter samt strukturer och ramar för flygplan (Engineering PRODUCT design, u. å.). Ett företag som har förespråkats denna metod när det kommer till reparation är företaget Optomec. De har visat att tekniken DED har kommit till stor nytta vid reparation av delar i gasturbiner som exempelvis tätningar och rotorerna. Detta på grund av att tekniken är lämpad till att användas för att lägga till material på redan befintliga delar. Optomec menar även att metoden är passande för geometriskt komplexa delar och har använt tekniken för komponenter i bland annat satelliter, helikoptrar och jetmotorer (Bowerman, 2021).

3.7 Binder Jetting

Binder Jetting, förkortat BJ, syftar till en process inom AM där flytande bindemedel avsätts över en pulverbädd för sammanfoga områden lager för lager. Tekniken har tidigare benämnts som *Three-dimensional Printing* (3DP) men tillkännages numera av ett flertalet olika beteckningar såsom *Inkjet Printing* (IJP), *Powder bed-and-inkjet printing* och *Drop-on-powder printing* (Cavallo, u. å.). Denna pulverbäddsteknik använder inte någon värme alls under processen och skiljer sig därför från de andra teknikerna som exempelvis använder laser eller en

annan direkt energikälla vid tillverkningsprocessen (Höganäs, u. å.). Utöver de generella stegen som ingår i en additiv tillverkningsprocess genomförs följande steg: applicering av pulverbädd, bindemedel adderas selektivt, sänkning av plattform, steg upprepas tills delen är färdigställd, obundet pulver avlägsnas och eventuell efterbehandling genomförs (AMFG, 2018).

3.7.1 Historia

Metoden bakom tekniken *Binder Jetting* utvecklades initialt under 1990-talet på Massachusetts Institute of Technology i USA och licenserades därefter ut till 5 olika företag (Gibson m. fl., 2021). Ett av dessa företagen var ExOne vilka var de första med att lansera en kommersiell 3D-skrivare, RTS-300, för tillverkning i metall genom användning av Binder Jetting (ExOne, u. å.).

Ytterligare ett företag som fick tillgång till samma licens och som utnyttjade denna teknik under samma period var företaget Z Corporation, numera 3D Systems. De utvecklade tekniken BJ till att kunna skriva ut bindemedel i flera olika färger med deras skrivare ColorJet Printing (CPJ). Denna metod används än idag och agerar fortfarande som ett varumärke för företaget (3D EXPERIENCE, u. å.).

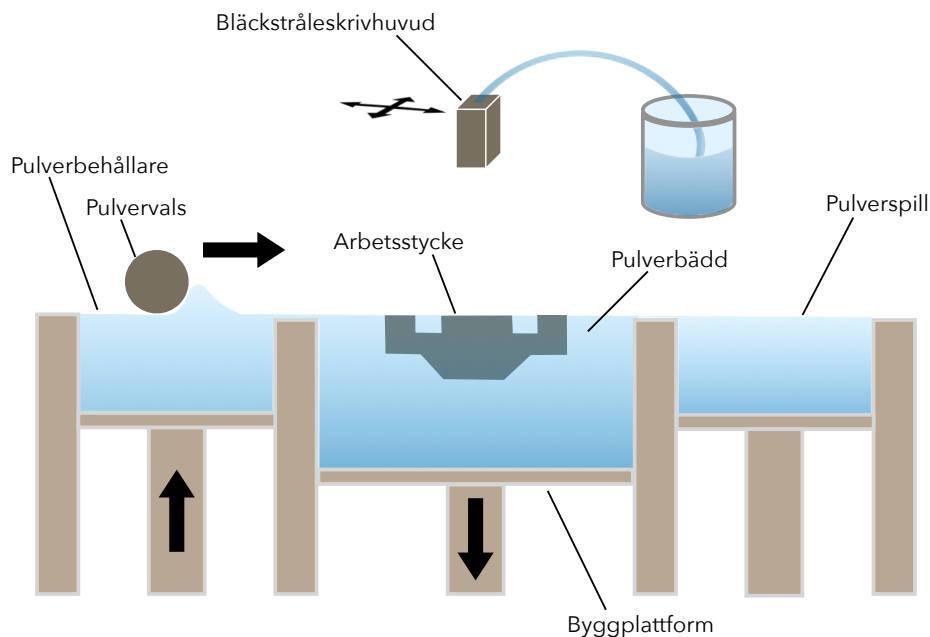
3.7.2 Teknik

Processens system kan beskrivas utifrån åtta ingående delar vilka illustreras i *Figur 3.6*. De ingående komponenter som erhålls är pulvervals, pulverbädd, arbetsstycke, byggplattform och pulverbehållare för pulvertillförsel samt pulverspill. Ytterligare komponenter är ett bläckstråleskrivhuvud vilken verkar i x- och y-led samt en hiss som verkar i z-led och förser byggplattformen med pulver (Cavallo, u. å.).

Det första steget i processen, utöver de generella steg som förekommer för alla additiva tillverkningsprocesser, är att 3D-skrivaren förses med pulver och bläckstrålebehållaren fylls med bindemedelsvätska. Efter det förberedande steget är maskinen redo att påbörja byggnadsprocessen. Processen börjar med att pulvervalsen för med sig pulvret i pulverbehållaren och sprider ut ett tunt lager jämt över byggplattformen för att skapa en pulverbädd. Den minsta tjockleken på ett lager är 0.08 mm (TOP3D, u. å.). Överflödigt pulver förs då ner i den andra pulverbehållaren för att samla upp eventuellt pulverspill som medföljer. Därefter färdas ett bläckstråleskrivhuvud över pulverbädden i två olika ritningar och sprutar bindemedel vilket sammanfogar det utlagda pulvret i form av en önskad geometri. Efter att ett lager av bindemedel är avslutat förflyttas byggplattformen nedåt i z-led samtidigt som pulverbehållaren med pulvertillförsel förflyttas i motsatt riktning. Följande process återupprepas tills att delen når sin fullständiga geometri och är helt omgiven av pulver. Det omslutna pulvret verkar som en härdande process och bevaras tillfälligt för att säkerställa att bindemedlet är fullständigt stelnat samt för att förstärka produkten (Cavallo, u. å.). Under tiden som delen är omsluten i pulver befinner sig produkten i ett så kallat grönt stadie.

Efterbearbetning innebär att produkten tas bort från plattformen och

överskottspulver avlägsnas, i en kontrollerad miljö, med hjälp av tryckluft. Ytterligare bearbetning, som exempelvis sintring och infiltration, genomförs för att förbättra komponentens mekaniska och estetiska egenskaper. Denna typ av bearbetning är ett måste vid tillverkning i metall för att uppnå fulla mekaniska egenskaper. Binder Jetting är därmed alltså alltid en tvåstegsprocess som kräver efterföljande sintring (Cavallo, u. å.).



Figur 3.6: Principskiss över tillverkningsprocessen vid Binder Jetting

3.7.3 Material

Binder Jetting var den första metoden inom AM där metall användes vid 3D-utskrift. Under processen används två typer av material, ett pulverbaserat och ett bindemedel som agerar som lim mellan lagren (Loughborough University, u. å.). Metall utnyttjas fortfarande vid användandet av denna tillverkningsteknik i form av rostfritt stål, volfram och titan (Thomas, u. å.).

3.7.4 Begränsningar

Binder Jetting är en av de tillverkningsmetoder som kräver mest efterbearbetning av delen jämfört med andra metoder vilket även bidrar till att processen kräver mer tid (Thomas, u. å.). Detta på grund av att delar som är tillverkade genom BJ är mycket porösa i sitt gröna stadiet och därav har sämre mekaniska egenskaper som måste åtgärdas. Ett resultat av detta är att risken är mycket stor att delen spricker under efterbearbetningen. Dess porösa stadiet resulterar även i en begränsning av designstrukturer, speciellt för tillverkning i metall, då fina detaljer är mycket svåra och nästintill omöjliga att uppnå (HUBS, u. å.). Under processen när lagren sammanfogas uppnår komponenten en högre densitet, vilket gör att den

krymper. Det som är problematiskt med krympning är att den inte krymper jämnt över komponenten, samt att det är svårt att kontrollera (Xometry Europe, 2021).

3.7.5 Tillämpningar och industrier

Många av de tillämpningar som *Binder Jetting* appliceras på återspeglas av de fördelar som tekniken innefattar jämfört med andra additiva tillverkningsmetoder. En av dessa är att hela byggplattformen kan utnyttjas eftersom att processen inte kräver att delen har några stödstrukturer vilket gör det möjligt att skapa flera komponenter samtidigt (HUBS, u. å.). Detta är en bidragande faktor till att BJ är tio gånger mer lönsam jämfört med andra metoder, som exempelvis SLM (Thomas, u. å.). Även företaget Digital Metal (Höganäsägt) anser att denna teknik lämpar sig bra för tillverkning av små komplexa geometrier i metall till en låg kostnad. På grund av teknikens funktion, till att använda olika färgsättningar, anses den även vara lämplig till att visualisera prototyper (Höganäs, u. å.).

3.8 Additiv tillverkning i produktion

Följande kapitel behandlar de möjligheter och begränsningar som existerar för AM i industrier och dess produktion. Kapitlet kommer att presentera kostnad, produktionshastighet och AM:s påverkan på värdekedjan.

3.8.1 Kostnad

Kostnaden kan delas upp i fyra huvuddelar vilket är maskin- och verktygskostnad, personalkostnad samt materialkostnad (Fried, 2019). En kostnad som är större för AM gentemot traditionella tillverkningstekniker är kostnaden för materialet, eftersom metallpulvret är mycket kostsamt (Thomas & Gilbert, 2014). Däremot är personalkostnaden mindre för AM jämfört med de traditionella metoderna. Eftersom att additiva tillverkningsprocesser syftar till en autonom process krävs enbart personal till exempelvis påfyllning och efterbearbetning. Kostnaden för efterbearbetning är relativt låg däremot bidrar det till en längre produktionstid vilket i sin tur kan anses negativt. Den största kostnaden är inköpspriset för maskiner och verktyg. Kostnaden skiljer sig också beroende på vilken typ av AM-metod som används.

3.8.2 Produktionshastighet

En stor fördel med additiv tillverkning är att det är mycket enkelt att ändra design och konstruktion, jämfört med de traditionella tillverkningsmetoderna. Konstruktions- och designändringar kräver i traditionell tillverkning mer tid och pengar, ofta i form av stora investeringar.

En fördel med traditionell tillverkning är att det går att anpassa till volymproduktionen vilket ger ökade vinster och sänkta priser för konsumenter, men är begränsad på produktvariationer och kundanpassningar (Mats Engwall,

2015). Att hantera produktvariationer och kundanpassningar av mindre serier och volymer, är oftast enklare vid utförande av en hantverkare, jämfört med tillverkning exempelvis på en produktionslina. Det är här additiv tillverkning ligger i framkant då det kan anses som ett mellanting av de klassiska tillverkningsmetoderna och hantverk (Lipson & Kurman, 2013).

Likheter hos en hantverkare och AM är flexibiliteten och mångsidigheten. En 3D-skrivare kan, likt en hantverkare, utan större investeringar, tillverka ett mycket brett utbud med stora variationer. Kostnaden blir lika stor oavsett om det tillverkar 1000 identiska produkter eller 1000 unika produkter. I dagens läge är kostnaden för anpassning fördelaktigt vid tillverkning med AM gällande volymproduktion. AM lämpar sig inte i serier av mer än 50 komponenter enligt Lipson och Kurman (Lipson & Kurman, 2013). Däremot ger AM en möjlighet för företag att anpassa affärsmodellen efter att sälja unika och ständigt föränderliga produkter (K.G Swift, 2013).

3.8.3 Additiv tillverknings påverkan på värdekedjan

Implementeringen av AM i industrin kan bidra till positiva effekter på försörjningskedjan, men även leda till utvecklingen av nya affärsmodeller. Senaste årtionden har trenden varit att outsourca tillverkningen till billigare länder, och då dra nytta av detta genom att tillverka stora volymer (Durach, Kurpjuweit & Wagner, 2017). AM är däremot mer lämpat vid tillverkning av små volymer, vilket möjliggör företag att ha flera mindre produktionsanläggningar närmare kunderna. När tillverkningen är decentraliserad kan en ny affärsmodell uppstå som i större utsträckning inkluderar kunderna i hela design och tillverkningsprocessen, och därmed erbjuda nya slags tjänster (Durach m. fl., 2017). I nuläget erbjuds kunder personlig anpassning av produkter via modularisering och senareläggning (Craig A. Giff & Illinda, 2014). AM kan dock bidra till ytterligare valmöjligheter. Det finns flera lyxmärken inom fordonsindustrin som redan använder sig av AM för att låta sina kunder göra personliga designval (Craig A. Giff & Illinda, 2014). Eftersom tillverkningen är närmare kunderna kommer därför transportkostnaderna minska (Durach m. fl., 2017). Även anpassningsbarheten till förändringar i marknaden är lättare att hantera med AM, eftersom ledtiden är kortare och tillverkningen närmare kunden.

AM kan också bidra till förminskad och förenklad försörjningskedja (Craig A. Giff & Illinda, 2014). Biltillverkare använder sig traditionellt sätt av många olika leverantörer. Att hitta leverantörer och behålla goda relationer med dem är tidskrävande och kostsamt. Om AM används i större utsträckning kan det alltså leda till att den tid och pengar som läggs på inköp av komponenter kan minska (Craig A. Giff & Illinda, 2014). AM:s möjlighet till integrering av komponenter kan också minska komplexiteten av leverantörskedjan (Muhammad, Kerbache & Elomri, 2022). En kortare värdekedja är en fördel vid oförutsägbara händelser, såsom COVID-19 (Muhammad m. fl., 2022). Ytterligare en fördel är att förteget kan minska sitt koldioxidavtryck (Charles, Hofer, Elkaseer & Scholz, 2021). För det första, kan metallpulver fraktas mer kompakt jämfört med färdiga eller

3. Additiv tillverkning

halvfärdiga komponenter, vilket leder till att färre transportenheter krävs vid frakt. För det andra, sparas det via AM in transport av material och komponenter mellan flera nivåer av leverantörer och underleverantörer, som alla kan befinna sig i olika länder. För att dessa leverantörer ska ha en fungerande verksamhet går det åt en stor mängd material för att tillverka deras utrustning, men också en stor mängd energi för att driva tillverkningen (Charles m. fl., 2021).

4

AM och konstruktion

Lättviktskonstruktioner är strukturer där vikten är minimerad, vilket kan åstadkommas på olika sätt. Genom att optimera geometrin kan mängden material reduceras vilket leder till en viktninskning. Det går även att välja ett material med lägre densitet för att uppnå samma resultat. Målet är att minimera vikten men samtidigt erhålla samma produkttegenskaper som en tyngre produkt. Följande kapitel avser att beskriva lättviktskonstruktioners funktion, dess användning och effekter.

4.1 Bakgrund

Lättviktskonstruktion är ett koncept som har existerat under en lång tid då det eftersträvats att konstruktioner ska vara kostnads- och vikteffektiva. Utveckling inom flyg- och fordonsindustrin ledde till grundandet av principer för lättviktsdesign, vilka sedan utvecklades ytterligare av teknik- och ingenjörskunskap (Tschorn, Fuchs & Vietor, 2021). Inom både flyg- och fordonsindustrin har målet varit att fordonet har låg vikt då detta kan leda till lägre utsläpp eller ökad prestanda. Även utvecklingen inom material- och tillverkningsteknik har bidragit till lättare konstruktioner då lättare material som exempelvis kompositerna kunnat utvecklas och datorsimuleringar inom topologioptimering blivit effektivare.

Topologioptimering, vilket är en beräkning av den optimala strukturen av en produkt, utvecklades till största delen av Bendsøe och Kikuchi (Bendsøe & Kikuchi, 1988). Tidigare användes formoptimering, en metod för att bestämma en komponents form med hjälp av *Finite Elementmetoden* (FEM). Problemet med denna metod var att det inte gick att ändra topologin, utan endast form, under designprocessen eftersom vissa parametrar gällande geometrin var tvungna att förbestämmas. Den mest optimala formen kunde då vara utanför dessa parametrar. Metoden som Bendsøe och Kikuchi utvecklade kunde i stället räkna ut både den optimala formen och topologin för mekaniska element med hjälp av FEM. När topologioptimering används vid beräkning av en optimal design kan det uppstå komplexa geometrier som inte kan tillverkas med traditionella tillverkningsmetoder som exempelvis gjutning (Tschorn m. fl., 2021).

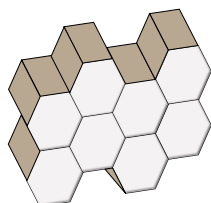
4.2 Utformning av lättviktslösningar

Vid utformning av strukturer finns det mycket inspiration att ta från naturen. Exempelvis har konstruktioner med högre vikt bäring samt högre motstånd för knäckning utformats genom att efterlikna bambus struktur (Zhang, Wang, Wang & Guan, 2019). Strukturen består av ett ihåligt rör med konstant radie. Längs med röret förstärks vägg tjockleken med jämna mellanrum. Dessa förstärkningar bidrar till att röret får samma slankhetstal och lastupptagningsförmåga som ett likvärdigt massivt rör även fast vikten minimeras.

Ytterligare efterliknelser kan ses i de strukturer som återfås i plantor, blad och stammar har visat sig ge bra grunder för lättviktsstrukturer inom olika områden. Ett exempel på detta är jättenäckrosen vilken består av flera vinkelräta förgreningar på undersidan som bidrar till ökad styvhet (Zhao, Ma, Chen & Guo, 2011). Kiselp plankton är ett annat bra exempel eftersom de delvis består av ett hårt och tåligt skal som efterliknar en gitterstruktur (Maier, Siegel, Thoben, Niebuhr & Hamm, 2013).

Implementering av gitterstrukturer är ett sätt att reducera vikten hos en komponent utan att försämra dess mekaniska egenskaper (Fast Radius, 2022). Gitterstrukturer består av flera sammansatta celler som bildar ett tredimensionellt geometriskt nät i form av exempelvis kvadrater, trianglar eller hexagoner. Fördelen med gitter är att strukturen får en hög kompressionsstyrka och skjuvhållfasthet samtidigt som vikten reduceras på grund av de hålrum som skapas. En typ av struktur är fackverk, vilket består av en sammansättning av trianglar (Britannica, 2022). Geometrin fördelar lasterna i enbart tryck- och dragkrafter, vilket leder till att konstruktionen tål högre laster samtidigt som mängden material minimeras. Fackverk används ofta inom arkitektur, såsom i byggnader och broar.

Ytterligare ett exempel på en gitterstruktur är bikakestruktur, som efterliknar de hexagonala strukturer som återfinns i bikupor (Bitzer, 1997). Denna typ av sammansättning illustreras i *Figur 4.1*. Ett vanligt sätt att förstärka en bikakestruktur är att använda sig av en så kallad sandwichstruktur. De öppna delarna av bikakestrukturen stängs igen med två tunna skikt vilket då ökar hållfastheten och styvheten. På grund av detta är denna typ av konstruktion fördelaktig inom både flyg- och rymdindustrin.



Figur 4.1: *Illustration av den hexagonala uppbyggnaden som återfinns i en bikakestruktur*

4.3 Metoder för utformning av lättviktslösningar

AM-teknikens möjligheter till komplexa geometrier med hög upplösning möjliggör för bra optimering av strukturerna. Med hjälp av optimering kan material som inte bidrar till strukturens styvhet bortses från. Detta bidrar till minskad vikt men även förbättring av andra egenskaper som massiva strukturer inte kan uppnå, till exempel reduktion av vibrationer (Ramadani, Pal & Kegl, 2021). Följande kapitel avser att beskriva de optimeringar som kan åstadkommas på topologin och dess effekter.

4.3.1 Topologioptimering

Topologioptimering (TO) är en metod för att optimera distributionen av material för givna randvillkor. Med hjälp av *Finita Elementmetoden*, förkortat FEM, kan TO identifiera vilka element i strukturen som inte bidrar till den strukturella integriteten. Detta genom att densiteten hos elementen agerar som en designvariabel. I detta fall optimeras detaljen för viktreduktion vilket betyder att element som inte bidrar till strukturens styvhet elimineras (Ahmad, Bici & Campana, 2021).

För att funktionen hos komponenten skall behållas måste randvillkor bestämmas. Dessa innefattar fixering av ytor, volymer eller punkter som under optimeringsprocessen inte ändras. Material för komponenten måste bestämmas för att optimera vikten. Detta gäller på grund av att materialets styvhet kommer att påverka utformningen för att uppnå önskade mekaniska egenskaper (Engineering Product Design, 2022). TO kommer då att skapa den optimala topologin för de givna randvillkoren.

Även fast AM ger stor designfrihet, finns det vissa utmaningar med TO. Ett exempel på detta är att mikrostrukturen har en stor inverkan på komponentens mekaniska egenskaper. Detta måste därför beaktas under optimeringsprocessen för att säkerställa att *Finita Element-analysen* blir korrekt (Chiu, Rolfe, Wu & Yan, 2018).

Ytterligare problem är byggnadsvinkeln och minimering av stödstrukturer som krävs under produktionen av detaljen (Chiu m. fl., 2018). Vid användning av pulverbäddstekniker som exempelvis *Binder Jetting* och *Electron Beam Melting* finns det inget behov av stödstrukturer. *Direct Energy Deposition* kan däremot inte skapa överhängande partier och stödstrukturer måste planeras i förväg. Även eventuell påverkan på ytan av den färdiga komponenten måste tas hänsyn till då borttagning av stödstrukturer kan resultera i en sämre yta. Det är inte heller möjligt att avlägsna stödstrukturer om de är svåråtkomliga, exempelvis om de är omslutna av material (Chiu m. fl., 2018).

4.3.2 Topologioptimering med gitterstrukturer

Genom att kombinera topologioptimering och cellulära gitterstrukturer kan ännu högre prestanda för komponenten åstadkommas. Denna princip kallas för *Lattice*

Topology Optimization (LTO) (Lopez & Stroobants, 2019). En stor skillnad mellan TO och LTO är de olika kriterier för att eliminera element. När LTO tillämpas så måste ett värde för minsta tillverkningsbara arean bestämmas, vilket är en maskinparameter. Under den iterativa processen minskas tjockleken i de cellulära gitterstrukturerna tills att det understiger det tidigare nämnda värdet och då elimineras. Detta innebär att densiteten för elementen kan variera till skillnad från TO där elementen antingen är massiva eller elimineras (Plocher & Panesar, 2019).

LTO jämfört med TO kräver större kunskap för att kunna bestämma parametrarna för en lyckad optimering. En av parametrarna är den cellulära strukturen. Detta innebär att god kunskap behövs för att uppnå optimala lösningar. Detta beror på att de olika cellstrukturerna har olika egenskaper och fördelar spänningarna på olika sätt i komponenten (Plocher & Panesar, 2019).

4.4 Mekanisk prestanda

Olika tillverkningsprocesser kan ändra materialegenskaper. Styvhet hos material är oberoende av tillverkningsprocessen men andra egenskaper som brottseghet och sträckgräns påverkas i stor grad av tillverkningsmetoder och bearbetning som värmebehandling. För att kunna dra slutsatser kring AM:s möjligheter som tillverkningsmetod bör dess påverkan på komponenternas mekaniska prestanda undersökas (Lewandowski & Seifi, 2016).

4.4.1 Mikroskopiska aspekter

Man kan dela in de olika metoderna för AM i metall i två kategorier, svetsande metoder och sintrande metoder. Detta är en avgörande faktor i komponentens mikroskopiska struktur och är därmed den största indikatorn för vilka mekaniska egenskaper komponenten erhåller. Detta är viktigt att ha i åtanke under designprocessen för att kunna avgöra om AM metoden i fråga kan producera en komponent som uppfyller de givna kraven (Kok m. fl., 2018).

Olika metoder kan ge olika mikroskopiska effekter. Genom BJ skapas en komponent som är isotropisk med fina korn och liten kemisk utfällning i korngränserna. Detta bidrar till högre styvhet och lika stor styvhet i de olika riktningarna. Isotropin hos komponenten ges av sintringsprocessen där hela komponenten värms upp och pulvret sintrar samman med hjälp av diffusion. Detta gör att inre spänningar och förvridningar elimineras men komponenten kan få mycket distortion. Denna tillverkningsmetod ger dock ofta en porös detalj vilket minskar utmattningmotståndet. (Kok m. fl., 2018).

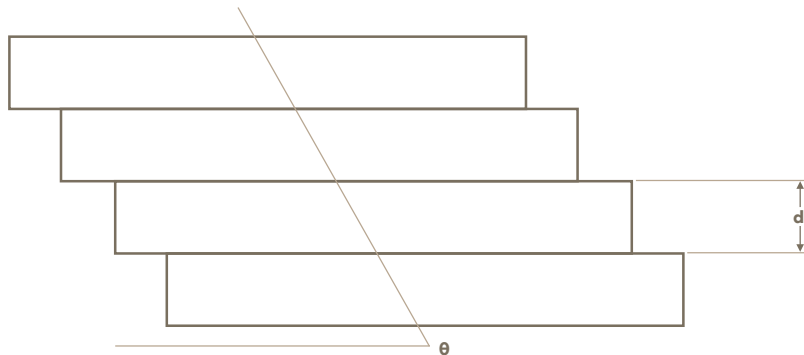
Svetsande metoder som DMLS/SLM och EBM har visats ge kolumnär kornstruktur. Detta ger anisotropiska egenskaper i materialet vilket innebär att materialegenskaper som styvhet eller motstånd mot dislokationsrörelse inte är samma i alla riktningar. Detta är viktigt att ha i åtanke under designfasen för att säkerställa funktionen hos komponenten. Den anisotropiska karaktären kan kopplas till den höga avsningshastigheten. Den höga avsningshastigheten

begränsar vilka metaller som är möjliga att använda. Härdbara stål lämpas inte på grund av detta då komponenten blir väldigt skör (Kok m. fl., 2018).

4.4.1.1 Defekter

Utmattningsmotstånd är en viktig aspekt att ta hänsyn till vid utformning av en komponent som utsätts för cykliska laster. Tre drivande faktorer till en komponents livslängd är ytfinhet, porositet och defekter. En bättre ytfinhet ökar livslängden då grövre ytor bidrar till spänningskoncentrationer som sedan blir till utmattningssprickor. Porer i en detalj ger också upphov till spänningskoncentrationer som därmed kan utvecklas till sprickor. Defektens påverkan på livslängden ökar ju större defekten är (Wei, 1978).

I komponenter med stor vägg tjocklek har ytfinheten större påverkan på utmattningen än vad porositeten har. Därför kan det vara fördelaktigt att efterbearbeta ytan om möjligheten finns. Interna fackverksstrukturer är ett exempel på en geometri vars yta inte kan bearbetas. Ytfinheten är direkt bunden till tjockleken på lagren och överhänget mellan dem. Detta är på grund av trappstegseffekten, vilket illustreras i *Figur 4.2*. Trappstegseffekten syftar på den ojämna yta som uppstår på grund av att komponenten byggs upp lager för lager (Gockel, Sheridan, Koerper & Whip, 2019).



Figur 4.2: Illustration av hur lagren byggs under tillverkningsprocessen. θ är byggnadsvinkeln och d är lagrens tjocklek.

Defekter kan uppstå av många anledningar, men kan ofta motverkas genom optimering av maskinparametrar. Exempelvis kan det för svetsande metoder uppstå defekter på grund av för stor eller för liten energiöverföring. Energiöverföringen beror dels på energikällans hastighet men även dess effekt. En hög energiöverföring kan resultera i att gasporer skapas djupt i smältan. Gasporerna leder till defekter eftersom att de inte kan fyllas igen när nästa lager appliceras, vilket skiljer sig från porer som uppstår i ytan av smältan. En låg energiöverföring kan leda till ofullständig smälta eller delaminering mellan lagren. Detta orsakar spänningar och kan därför leda till minskad livslängd. Delaminering innebär att pulvret inte smälter samman med närliggande lager och kan ses som en initierad utmattningsspricka. Ett resultat av detta är minskad livslängd (Sanaei & Fatemi, 2021).

Geometrin har också inverkan på livslängden i komponenten. För gitterstrukturer har cell-topologin och den relativa densiteten inverkan på livslängden. Det är bland annat porositet som påverkar den relativa densiteten. Eftersom tjockleken på elementen i cellerna är liten, utgör porerna en större andel av tvärsnittet, och därmed större spänningskoncentrationer (Zargarian, Esfahanian, Kadkhodapour, Ziaei-Rad & Zamani, 2019).

5

Elektriska drivlinor

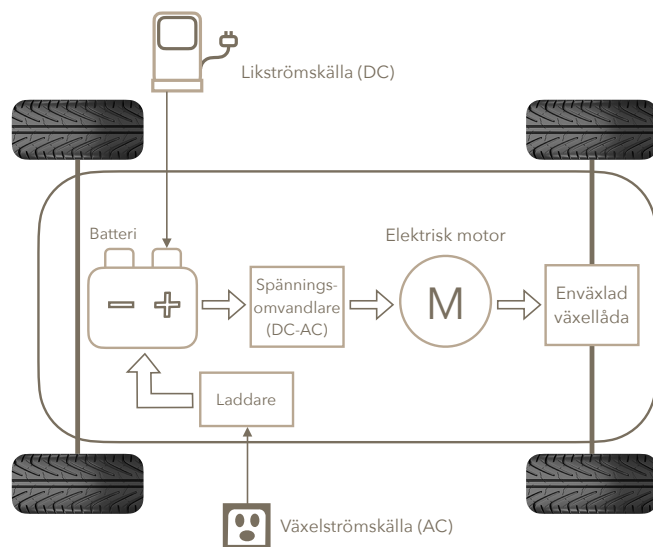
Övergången till elektriska drivlinor skapar möjligheter till fossilfria transporter, men kommer också med utmaningar. I kommande kapitel kommer de mest väsentliga delarna i en elektrisk drivlina att presenteras för att kunna undersöka möjligheten att applicera AM på drivlinan.

5.1 Bakgrund

De senaste 200 åren har den industriella utvecklingen gått snabbt framåt. Dagens infrastruktur är välutvecklad och dagens fordon har hög komfort och är mycket enkla att manövrera. Dessvärre har utvecklingen inte bara genererat fördelar utan det har också medfört stora nackdelar, bland annat för miljön. Bilindustrin är en stor del av problemet eftersom att de nuvarande förbränningsmotorerna släpper ut stora mängder koldioxid och är en bidragande faktor till växthuseffekten. I dagens läge är det en ohållbar situation och det har lett till att bättre drivlinor behöver konstrueras som inte påverkar miljön i samma utsträckning. Detta kan uppnås genom att använda en elektrisk drivlina. Den största och mest väsentliga skillnaden från en elektrisk drivlina mot den konventionella, är att man använder en elektrisk motor istället för en förbränningsmotor. En utmaning som uppstått vid övergången från den konventionella drivlinan till den elektriska är att den elektriska drivlinan är betydligt tyngre på grund av batteriets höga vikt.

5.2 Elektrisk drivlina

En elektrisk drivlina är ett tekniskt system av komponenter som genererar kraften för att driva ett motorfordon framåt. De komponenter som är mest väsentliga presenteras i *Figur 5.1* för att ge en överblick över en elektrisk drivlinas funktion. Dessa komponenter är följande: batteri, spänningsomvandlare, laddare, enväxlad växellåda och elektrisk motor.



Figur 5.1: Illustration över väsentliga komponenter i en elektrisk drivlina.

5.2.1 Batteriet

Batteriet, som oftast är gjort av litium-jonceller, lagrar energin som behövs för att driva fordonet. Litium-jonbatterier är den vanligaste typen av batteri och populariteten grundar sig i att den har stor energitäthet och en mycket låg urladdningshastighet. Det betyder att trots att elbilen inte körs på några dagar eller veckor, så kommer inte batteriet att urladdas (Sustainable energy authority of Ireland, 2022). En annan fördel är att cellerna av litium-jon batterier innehåller en mycket hög cellspänning jämfört med andra batterityper, vilket medför att man kan få ut mycket energi ur batteriet. Den ström som lagras i batteriet är likström som senare i processen kommer att behöva omvandlas till växelström. Batteriet är också den komponent som gör att den elektriska drivlinan väger avsevärt mycket mer än den konventionella drivlinan (Zubi G, 2018).

5.2.2 Spänningsomvandlare (DC-AC)

En spänningsomvandlare är en enhet som behövs för att konvertera likström från batteriet till växelström som används i elmotorn. Spänningsomvandlaren kan också justera frekvensen på växelströmmen för att ändra hastigheten som motorn roterar med. Den är också kapabel till att öka eller minska motorns effekt eller vridmoment genom att justera signalens amplitud (Hamerly, 2010).

5.2.3 Laddare

Den inbyggda laddaren är en väsentlig del i drivlinan. Laddaren tar emot den inkommande växelström som tillförs via laddningsporten och omvandlar växelströmmen till likström för att kunna ladda batteriet. Dessutom övervakar den batteriets egenskaper som exempelvis spänning, temperatur, ström och

laddningstillstånd under laddningstiden (US department of energy, 2022).

5.2.4 Enväxlad växellåda

Hos den konventionella drivlinan är bilen utrustad med en flerväxlad växellåda medan hos den elektrifierade drivlinan finns det en enväxlad växellåda. Detta är en av de största skillnaderna hos den konventionella och den elektriska drivlinan. En av anledningarna till att elbilar endast har en växel är för att elmotorer är effektiva i betydligt större varvtalsområde än en förbränningsmotor. En elmotors varvtalsområde går från 0 till 20000 rpm, medans en förbränningsmotor varvar mellan 4000-6000 rpm. Istället för att utrusta elbilen med en flerväxlad växellåda och behöva växla upp och ner i förhållande till varvtalen, så används en enväxlad växellåda som ger ett utväxlingsförhållande mellan acceleration och toppfart (Road & track, 2022).

5.2.5 Elektrisk motor

Elmotorn omvandlar elektrisk energi till mekanisk energi. Omvandlingen sker genom ett cirkulerande magnetfält med hjälp av spolar som attraherar andra magneter som finns i motorn. Den resulterande kraften överförs till bilens axlar, med en rotationshastighet som beror på strömmens frekvens. Det finns två grupperingar av elmotorer vilka är DC motorer och AC motorer. I dagsläget används mestadels AC motorer i elbilar.

5.2.5.1 Borstad motor

Den första typen av motor är den borstade DC-motorn. I denna typ av motor leds elektrisk ström genom spolar som är anordnade inom ett fast magnetfält. Strömmen är det som genererar magnetiska fält i spolarna vilket får spolenheten att rotera. Genom att kontinuerligt vända strömmen så att spolpolariteterna vänder, fortsätter spolarna att rotera till skillnad från de fasta polerna. Genom att fasta ledande borstar kommer i kontakt med en roterande kommutator, kan strömmen till spolarna tillföras. Kommutatorn och borstarna är det som skiljer den borstade motorn från andra motortyper (Renesas, u. å.).

5.2.5.2 Borstlös motor

Istället för att använda borstar så använder sig den borstlösa motorn av en annan teknik. I den borstlösa motorn är spolarna inte placerade på rotorn, istället är rotorn en permanentmagnet. Spolarna är fixerade på statorn och därmed behövs inga borstar eller en kommutator. Det är permanentmagneten som roterar och rotationen fås genom att ändra riktningen på magnetfälten som genereras av de omgivna fixerade spolarna. Rotationen styrs genom att justera storlek och riktning på strömmen i spolarna (Renesas, u. å.).

5.2.5.3 Permanentmagnet synkronmotor (PMSM)

En vanligt förekommande elmotor som används är en “Permanentmagnet synkronmotor” (PMSM). PMSM är en AC-synkronmotor vars fältexcitering tillhandahålls av permanentmagneter och har en sinusformad bakre EMF-vågform. PMSM är en blandning av en trefas-induktionsmotor och en borstlös DC-motor och precis som den borstlösa DC-motorn har PMSM en permanentmagnetrotor och lindningar av koppartråd på statorn. Statorstrukturen med lindningar konstrueras för att producera en sinusformad flödestäthet i maskinens luftgap med stora likheter hos induktionsmotorn. En fördel hos PMSM är att den kan generera vridmoment vid noll varvtal, men den kräver en digitalt styrd växelriktare för drift. Genom att införliva permanentmagneter som en borstlös DC-motor, är en PMSM mer effektiv än en traditionell trefasinduktionsmotor eftersom den eliminerar effektförlusterna i rotorn (M. Fitouri & Abdelkrim, 2016).

5.2.6 Asynkronmotor

I en asynkronmotor alstras elektrisk ström genom induktion. Ström förs genom kopparlindningarna i statorn som skapar ett magnetfält som inducerar ström i rotorn, som i sin tur också skapar ett magnetfält fast i rotorn. Det är dessa två magnetfält som får rotorn att rotera. Denna typ av motor kallas asynkronmotor eftersom det finns en eftersläpning mellan motorns varvtal och rotorns varvtal, dvs en relativ skillnad mellan motorns riktiga varvtal och dess synkrona varvtal (Loukas, 2022).

5.3 Komponenter i drivlinan

Komponenterna i en drivlina har olika stor potential att ta del av fördelarna som additiv tillverkning kan innebära. Ett fåtal komponenter med utvecklingspotential har valts ut för vidare analys. Nedan presenteras hur en transmission samt en elektrisk motor tillverkas idag, vilka funktioner de ska uppfylla, dess krav, samt hur additiv tillverkning hittills har implementerats.

5.3.1 Transmission

En typisk enkel-växlad transmission väger ungefär 19.7 kg, där transmissionshuset bidrar till ungefär 31% av vikten, kugghjul och axlar 33% och differentialen 24% av vikten (Scott, u. å.). Eftersom transmissionshuset och kuggarna är de två ingående komponenter som bidrar mest till vikten kommer dessa komponenter undersökas mer ingående.

5.3.1.1 Transmissionshuset

I nuläget görs de flesta transmissionshus för personbilar av pressgjuten aluminium (Scott, u. å.). Transmissionshuset tillverkas i två delar och sätts ihop med en bultad fläns. Transmissionshuset har flera uppgifter. En uppgift är att fungera som ett strukturellt stöd för de roterande komponenterna på insidan. Flänsen tar upp

de interna krafterna från kuggingreppen i transmissionen, samt externa krafter såsom gupp och stötar (Scott, u. å.). Transmissionshuset ska också hålla inne smörjmedel och hålla ute kontaminerande partiklar, samt möjliggöra avledning av värme. Det måste även finnas ytor som möjliggör sammankopplingen av komponenter med transmissionen, exempelvis olika typer av fästelement, strömkälla och elektriska system. En ytterligare viktig funktion transmissionshuset har är att verka ljudisolerande och reducera mängden oönskade ljudvågor från transmissionen (Scott, u. å.).

För att minska vikten på transmissionshuset kan strukturell optimeringsteknik användas. Optimeringsteknik i samband med konventionella tillverkningsmetoder kan bidra till en viktreducering av transmissionshuset på 15% (Scott, u. å.). En utmaning med att använda denna metod för design av lättviktskomponenter är att konventionella tillverkningsmetoder har sina begränsningar, i form av exempelvis gjutningsriktning och därmed att strukturella element inte kan placeras på optimal position. Tillverkningsmetoder har även en begränsning på hur tunna väggar som kan tillverkas, och därmed en begränsning på hur mycket komponentens vikt kan reduceras (Scott, u. å.). Dessutom måste vägg tjocklek vara jämn genom hela komponenten när gjutning används som tillverkningsmetod (DMFPro, 2022).

Porsche har designat och tillverkat ett transmissionshus med hjälp av topologioptimering och den pulverbäddsbaserade AM-processen *PBF-LB*. Den optimerade designen består av gitterstrukturer som ökar styvheten med 100%, trots en vägg tjocklek på endast 1,5 mm (Stappen, 2020). Även bikakestruktur har använts i designen av transmissionshuset. Denna struktur minskar svängningar av de tunna väggarna och därmed minskas mängden oönskade ljudvågor. Tack vare additiv tillverkning kunde Porsche integrera flera funktioner och komponenter, till exempel lager, värmväxlare och oljeförsörjning. Integreringen av komponenter har lett till en kompaktare drivlina samt minskat monteringsarbetet med ungefär 40 arbetssteg. Dessutom har integrering av funktioner, i kombination med användning av optimeringstekniken, lett till en viktreducering av transmissionshuset med 40% (Stappen, 2020).

5.3.1.2 Kugghjul

Kugghjulen i transmissionen används för att omvandla vridmomentet från motorn till rätt varvtal i hjulen (Schmidt, 2021). Det är vanligt att moderna transmissioner har kugghjul av mangankromstål, tillverkade genom fräsning och slipning (Scott, u. å.). Kundkraven ökar ständigt gällande styrka och hållfasthet på kugghjulen i transmissionen. Kunderna begär även att elfordon ska ha lika lång räckvidd som för bränsle drivna fordon. En del i detta är att undvika interna förluster, i form av exempelvis friktion, vilket gör det viktigt att kugghjulen har väldigt hög ytfinhet (Schmidt, 2021). Ytterligare en faktor som måste tas i beaktning vid design av kugghjul är uppkomsten av oönskade ljud. Aspekter som bör tas hänsyn till är kugghjulsmakrogeometri, mikrogeometri, systemdynamik, överföringsvägar, dämpning och akustisk isolering (Owen Harris & Gale, 2019).

En reduktion av storleken på kugghjulen, samtidigt som den ursprungliga hållfastheten behålls, skulle kunna få flera positiva effekter. Om storleken på kugghjulen reduceras, reduceras mängden material som behöver användas och därmed minskar vikten också. Mindre kugghjul gör att centrumavståndet samt vinkeln mellan kugghjulen minskar, vilket leder till att även storleken på transmissionshuset kan reduceras. Ett minskat centrumavstånd ökar den tangentiella belastningen vid kuggingreppet, vilket skapar ökade radiellt och axiellt separerande krafter (Scott, u. å.). Dessa krafter tas upp av axelstödjande lager. Dessutom förändras den resulterande kraften som lagren ska ta upp, på grund av den förändrade kuggingreppsvinkeln. Detta innebär att om storleken på kugghjulen ska minskas måste både kugghjulsgeometrin samt val av lager revideras. Ett reducerat centrumavstånd bidrar även till minskad tangentiell hastighet av kugghjulen. Detta ökar effektiviteten av kugghjulen samt minskar förluster som uppkommer i samband med att kugghjulen roterar genom smörjmedel (Scott, u. å.).

Det sker utvecklingsarbete för att kunna använda sig av additiv tillverkning vid tillverkning av kugghjul till transmissionen i elbilar. Genom samarbetsplattformen CONNACTIVE har dessa kugghjul tillverkats genom användning av sintrat metallpulver. Detta har bland annat lett till reducerad vikt samt förbättrade egenskaper gällande ljud och vibration (Höganäs and Alvier Mechatronics, u. å.). Additiv tillverkning möjliggör tillverkningen av en förbättrad geometri som är skonsammare mot kuggarna och fördelar krafterna på ett mer fördelaktigt sätt (CONNACTIVE, u. å.).

5.3.2 Elektrisk motor

Hur effektiv en motor är beror på flera olika faktorer, exempelvis materialets elektromagnetiska egenskaper, designen, vikt och storlek på komponenterna, samt magneternas interna mikrostrukturer (EVreporter, 2020). Additiv tillverkning kan användas för att tillverka elektriska motorer med reducerad storlek och vikt, jämfört med tillverkning via konventionella metoder. Ytterligare fördelar AM kan bidra med är förbättrade mekaniska egenskaper, möjlighet till anpassade elektromagnetiska egenskaper, design av inbyggda kylsystem, och så vidare (EVreporter, 2020). AM-metoder som är mest lämpade för tillverkning av elektriska motorer är *Selective Laser Melting*, *Fused Deposition Modeling* and *Binder Jetting* (Naseer, Kallaste, Asad, Vaimann & Rassölkin, 2021).

Vid användning av konventionella tillverkningsmetoder tillverkas motorn och dess ingående komponenter symmetriskt för att förenkla tillverkningsprocessen. Tack vare AM är det möjligt att lättare använda sig av asymmetri mellan poler, vilket har ett antal fördelar, såsom förbättrat vridmoment samt förbättrad motoreffekt (Naseer m. fl., 2021).

5.3.2.1 Motorhuset

Om motorn inte är integrerad i transmissionshuset, omsluts motorn av ett eget motorhus. Motorhuset kan exempelvis tillverkas genom pressgjutning av aluminium (AmTech, u. å.). Motorhuset fungerar som ett strukturellt stöd för motorn, leder bort värme samt tätar mot kylningsmedel (EMP Tech, u. å.).

Fördelar med att tillverka motorhuset genom additiv tillverkning är att designen kan bestå av integrerade kylningssystem som kan leda bort den värme som uppstår till följd av stator-förluster (METAL AM, 2019). Till exempel kan en struktur bestående av stift i 45 graders vinkel användas. Detta ökar värmeledningen på grund av den ökade kontaktytan, men skapar även ett turbulent flöde som också ökar värmeledningen. Motorhuset kan till exempel tillverkas av aluminium legering genom *Selective Laser Melting* (SLM) (METAL AM, 2019).

5.3.2.2 Stator & Rotor

De krav som ställs på kärnor för statorer och rotorerna är att de måste ha högt vridmoment per viktenhet, låg hysteresis, låga virvelströmförluster, högpermeabilitet samt behålla sina strukturella egenskaper (Naseer m. fl., 2021). Statorer och rotorerna tillverkas av mjukmagnetiska kompositer (SMC) och intermetalliska legeringar. För att få önskade egenskaper gjuts, staplas, och sintras materialerna (Naseer m. fl., 2021). Det vanligaste är att komponenterna tillverkas av laminerat stål med en kiseljärnlegering (EVreporter, 2020). För att reducera storleken på komponenterna är trenden att minimera plåttjockleken. Problemet med detta är att när plåttjockleken är mindre än 0.10 mm och kiselhalten över 3.5%, försvåras tillverkningen. Ytterligare en nackdel med reducerad plåttjocklek via konventionella tillverkningsmetoder är att det magnetiska flödet endast tillåts i 2 dimensioner (EVreporter, 2020).

Användning av AM-metoder för att tillverka statorer och rotorerna kan innebära större valmöjlighet gällande kompositionen av material, komplexa geometrier samt användningen av strukturella topologioptimeringar (Naseer m. fl., 2021). I moderna motorer för elfordon ställs det krav på komplexa geometrier med magnetiska flöden i 3D, lättviktslösningar, samt minskad storlek, vilket är möjligt att åstadkomma via additiv tillverkning (EVreporter, 2020).

5.3.2.3 Permanenta magneter

Permanent magneter måste ha bra magnetiska, mekaniska och termiska egenskaper. Magnetiska material såsom järn-neodym, alnico (Fe-Al-Ni-Co) eller samarium-kobolt används för tillverkning av hårda magneter för användning vid applikationer med hög energitäthet (Naseer m. fl., 2021). Permanent magneter tillverkas enligt konventionella metoder via sintring eller limning, pressas och formas, och till sist genomgår en slutgiltig bearbetning (Naseer m. fl., 2021).

Genom att tillverka permanenta magneter via additiv tillverkning kan topologioptimering användas. Detta möjliggör mer komplexa utformningar med

bättre magnetisk energiförsörjning, och därmed leder det till reducerad materialanvändning (Naseer m. fl., 2021).

5.3.2.4 Kopparlindningar

Kopparlindningen finns för att skapa ett magnetfält i motorn. Det är viktigt att effektförluster minimeras. Detta kan uppnås genom att ha låg elektrisk resistivitet samt hög fyllnadsfaktor. De största förlusterna som uppstår i moderna elektriska motorer är förluster på grund av skinneffekten och närhetseffekten (Naseer m. fl., 2021).

AM-tillverkade kopparlindningar ökar möjligheterna för olika utformningar av kopparlindningarna. Det kan till exempel handla om olika designer på kopparlindningssprofilerna, eller inbyggda kylkanaler. Dessa förbättrade profiler bidrar till minimerade AC-förluster samt förbättrad fyllnadsfaktor, och därmed förbättrad motoreffekt (Naseer m. fl., 2021).

5.4 En jämförelse av en elektrisk och en konventionell drivlina

Elmotorn är betydligt effektivare än en förbränningsmotor vilket innebär att bilens totala energiåtgång minskar. I en studie av *The International Council Of Clean Transportation* (ICCT), gjordes en jämförelse av en elmotor kontra en förbränningsmotors livscyklar, det vill säga hela vägen från produktion och framställandet av elektricitet respektive bensin, till energiförbrukning och underhåll av bilarna. En elbil i Europa släpper ut mellan 63-69% mindre växthusgaser än en bil med förbränningsmotor. De elbilar som kommer att byggas under år 2030 förväntas släppa ut mellan 71-77% mindre utsläpp och med endast förnybar energi, stiger siffrorna till 78-81%. Den största och viktigaste skillnaden mellan elmotor och en förbränningsmotor, är att med en elmotor är det fullt möjligt att komma ner till 0 % utsläpp vilket det inte är med förbränningsmotorer (Bieker, 2021).

Det finns dock flera utmaningar med den elektriska drivlinan. I dagens samhälle är inte infrastrukturen tillräckligt utvecklad för att kunna ladda en elbil på samma sätt som det går att tanka en bränsle driven bil. Däremot så finns det elektricitet mer eller mindre överallt, men det kommer att behöva byggas fler laddningsstationer vilket kommer att ta tid. Det ställs krav på maximala spänningen och strömmen på laddningsstationerna. Det innebär att snabbbladdning av elbilar ska vara möjligt för att närma sig tiden det tar att tanka en bil. I dagens läge tar det cirka 20 minuter att snabbbladda ett batteri. Det är fullt möjligt att snabbbladda ett batteri men det påverkar batteriets kapacitet negativt. Samma sak gäller vid ett helt fulladdat eller ett helt urladdat batteri (Curtis D Anderson, 2010).

Ett batteri som laddas på vanlig hushållsel laddar upp på ungefär 8-12 timmar med förutsättningen att man har installerat en väggmonterad laddbox på bilens ordinarie

parkeringsplats. Räckvidden för ett batteri som är laddat till 80 % är ca 200 km vilket bidrar till en relativt lång räckvidd. Många bilar som finns på marknaden idag har en räckvidd på 400 km. Förutsatt att det finns infrastruktur för snabbbladdning så är skillnaden mot en bil med en förbränningsmotor inte särskilt stor när det kommer till längre resor. (Laddsmart, u. å.).

5.5 Viktreducering i dagens läge

Trots att ökad vikt ger skador på vägbanor och andra faktorer är inte huvudfokus att reducera vikten. Istället väljer tillverkarna att fokusera på annat, som att öka räckvidden, påskynda laddningen och maximera prestandan hos motorerna (Motorhills, u. å.). Eftersom räckvidden för ett elektriskt fordon fortfarande är begränsad och i kombination med att infrastrukturen inte är tillräckligt utbyggd, påverkar det kravet från kunderna. Ett konventionellt fordon går att köra mer eller mindre utan problem, vill kunden att samma villkor skall gälla för det elektriska fordonet (Gelmanova, 2018). Därför är viktreduktion inte en prioritet, utan fokus ligger på att utveckla det elektriska fordonet att det går att köra med maximal komfort. Som tidigare nämnt i *Kapitel 5.4*, behöver infrastrukturen byggas ut om det skall gå att köra ett elektriskt fordon med samma enkelhet som det går att köra det konventionella fordonet.

Studier som jämför elektriska och konventionella fordon visar att användning av lättviktslösningar och reducering av vikt inte alltid är positivt. Ett tyngre fordon kräver mer energi för att föras framåt och vid retardation fungerar den elektriska motorn som en generator och den infunna elektriska energin kan användas för att ladda batteriet. Dessutom så är det en kostnadsfråga. Den summa man sparar i EURO/km per kg är mindre för ett elektriskt fordon jämfört med den konventionella fordonet (Redelbach, Klötzke & Friedrich, 2012).

Det är också en fråga om material och dess egenskaper. Det är särskilt viktigt för kolkompositer (CFC). Eftersom att materialegenskaperna gör det komplicerat att förutsäga felbeteendet och säkerheten hos CFC finns det risk att större delar måste bytas ut under livslängden eller vid olycka. Därför kan användningen av lättviktsmaterial som CFC ha en negativ inverkan på den förväntade underhålls och reparationskostnaden hos en bilhandlare. (Redelbach m. fl., 2012)

6

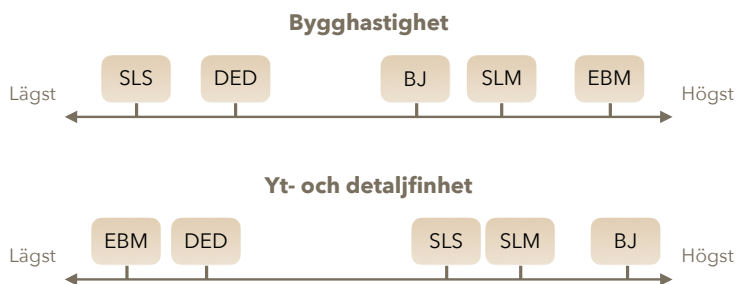
Diskussion

I diskussionen analyseras både för- och nackdelar huruvida det är möjligt att applicera additiv tillverkning på komponenter i elektriska drivlinor. Detta för att ge en större förståelse över de möjligheter och begränsningar som finns inom additiv tillverkning. Dessa är viktiga aspekter att ta i beaktande när det kommer till att applicera tillverkningsmetoden i industrin. Andra viktiga aspekter som också diskuteras är miljöpåverkan och varför inte additiv tillverkning används i större utsträckning inom fordonsindustrin idag.

Diskussionen har till avsikt att koppla tillbaka till syftet utifrån den litteraturstudie som rapporten innefattar. Detta innebär att analys av hur additiva tillverkningsmetoder kan implementeras för att skapa lättviktslösningar hos elektriska drivlinor och på så sätt reducera vikt och minska miljöpåverkan.

6.1 AM-processernas möjligheter och begränsningar

Det kan vara svårt att avgöra vilken additiv tillverkningsmetod som bör användas. Är materialet som skall användas bestämt är det enklare att avgöra eftersom att olika tekniker lämpar sig till specifika material. Om materialvalet är mer flexibelt kan det bli svårare att avgöra, eftersom alla metoder då kan övervägas. Därav kan andra aspekter som processhastighet, ytfinhet och hållfasthet tas i beaktning för att avgöra vilken metod som är bäst lämpad för att skapa den önskade komponenten. I *Figur 6.1* visas en förenklad jämförelse av metoderna utefter kriterierna.



Figur 6.1: Jämförelse av de olika tillverkningsmetoderna i form av bygghastighet och ytfinhet

6.1.1 Dimensioner

Via additiv tillverkning och dess metoder för 3D-printing kan defekter som påverkar komponenternas dimensioner uppstå. Detta är något som behöver tas till hänsyn. Defekter på dimensionerna kan motverkas genom att toleranser läggs till, och att ritningarna kan överdimensioneras om kunskapen att komponenter krymper finns.

Binder Jetting är en av de additiva tillverkningsmetoderna där det uppstår problematik med att komponenter krymper. Under processen när lagren sintras ihop uppnår materialet i komponenten en högre densitet, vilket gör att den krymper. Problemet med detta är att krympningen inte sker homogent över komponenten, samt att det är svårt att förutse och kontrollera.

Vid printing med *Direct Metal Laser Sintering* kommer komponenten att ha åtminstone 2% fel på grund av krympning. Detta är också ett problem som förekommer vid tillverkning av komponenter via *Selective Laser Melting*. Detta kan kompenseras för under designprocessen för att få en komponent med korrekta dimensioner.

6.1.2 Geometrier

Additiv tillverkning medför mycket friheter och möjligheter att tillverka komplexa geometrier för komponenter. Det finns relativt få begränsningar med vad som kan skapas via additiv tillverkning. Det som påverkar är målet med printningen, och med det som utgångspunkt finns det vissa metoder som lämpar sig bättre än andra. De olika metoderna kan printa allt från mindre reservdelar till stora komponenter, som exempelvis turbinblad. Komponenter kan även printas med mycket hög precision och ytfinhet, då exempelvis SLM använder sig av en laserstråle med liten diameter. Vid printning av komponenter kan konstruktionen genom att tillämpa lättviktslösningar optimera möjligheterna för att reducera vikten hos komponenterna, och därmed spara material. Genom AM kan även konstruktioner optimera hållfastheten hos komponenterna utan att möta samma problem som konventionella metoder gör. AM medför alltså möjligheter för att skapa komplexa geometrier, reducerad vikt och hög hållfasthet för komponenter.

6.1.3 Material

De additiva tillverkningsmetoderna erbjuder många och relevanta material för att printa komponenter i metall. Det innebär att det huvudsakligen inte är materialet som begränsar, då de vanligaste och mest förekommande metallerna i industrierna erbjuds vid användning av AM. Dock kan inte varje AM metod erbjuda alla metaller.

6.1.4 Hållfasthet

För komponenter som utsätts för höga laster lämpas endast att tillverkas av svetsande metoder då de inte ger porösa strukturer till skillnad från de sintrande metoderna. Alla komponenter i drivlinan utsätts för krafter. Om syftet är att minska vikten bör metoden som ger bäst hållfasthet användas eftersom det då krävs mindre material för samma mekaniska prestanda. Det innebär att i dagsläget lämpas inte de sintrande metoderna för tillverkning av lättviktslösningar i elektriska drivlinor för kommersiellt bruk, exempelvis BJ.

6.1.5 Produktionshastighet

Vid massproduktion är produktionshastigheten viktig, speciellt när stora fordonsföretag producerar tusentals fordon per dag. En anledning till varför inte AM används i industrin där massproduktion sker kan vara på grund av att vissa AM metoder kan ta relativt lång tid innan komponenten är helt färdigställd. Detta innebär att företag hade behövt köpa in många maskiner vid massproduktion av komponenter via AM. Det finns dock fordonsföretag som inte massproducerar bilar, utan tillverkar färre bilar med en hög exklusivitet. För dessa företag hade AM kunnat vara fördelaktigt, då tillverkningsmetoden anses vara mer anpassad till mindre produktionsserier. AM är alltså olika lönsamt beroende på vad syftet för företaget är.

Ytterligare en faktor som påverkar produktionshastigheten är tjockleken på de lager som tillverkas. För att öka produktionshastigheten kan tjockleken på lagren ökas då detta bidrar till att färre lager behöver produceras. Detta kan däremot resultera i lägre precision och ytfinhet i den slutgiltiga komponenten vilket kan göra mer efterbearbetning nödvändig. Efterbearbetning medför en längre produktions tid och en avvägning är nödvändig för att optimera produktionshastigheten. Den långsamma produktionshastigheten kan i vissa fall kompenseras av integreringen av flera funktioner i en komponent. Om endast en komponent med flera funktioner behöver tillverkas, istället för flera komponenter, kan den totala ledtiden för produkten reduceras.

6.1.6 Kostnadsperspektiv

Additiv tillverkning medför både många fördelar men även nackdelar. Ur ett kostnadsperspektiv finns det många aspekter att beakta. Inköpskostnaden för maskinerna som skall printa komponenterna är väldigt hög. Det kräver även

mycket energi att driva maskinerna, vilket är viktigt att ha i åtanke, speciellt om ett företag planerar att köpa in många maskiner. Vid inköp av en maskin krävs det samtidigt färre verktyg och färre personal. Vilket innebär att inköpskostnader och underhållningskostnader för verktyg minimeras, och mindre lön behöver betalas ut då det krävs färre personal. Vad som är mest lönsamt är individuellt och situationsbaserat för varje företag.

Pulvret som komponenterna ska printas ur är väldigt kostsamt. De olika metoderna kan inte heller printa komponenter i vilken metall som helst, utan kräver specifika material som är olika kostsamma. De svetsande metoderna har en hög avsvalningshastighet gemensamt vilket är problematiskt för många vanliga och relativt billiga material inom fordonsindustrin. Samtidigt som pulvret är dyrt resulterar AM i mindre materialspill då stora delar av det överblivna pulvret kan återanvändas, vilket är positivt ur både ett miljö- och kostnadsperspektiv.

6.2 Tillämpning av additiv tillverkning

Additiv tillverkning har potential till att implementeras inom industrin idag. Däremot finns det även många brister som bör tas i beaktning när det kommer till att övergå från traditionella tillverkningsmetoder. Detta kan vara en anledning till att AM inte används i större utsträckning i dagens läge. Följande kapitel diskuterar hur AM kan appliceras i en drivlina för att skapa lättviktslösningar och vilka effekter det ger. Kapitlet involverar även hur miljön hade kunnat påverkas av en reducerad vikt och minskad materialanvändning. Slutligen diskuteras varför AM inte är så etablerat inom fordonsindustrin idag.

6.2.1 Additiv tillverkning av komponenter i drivlinan

AM som teknik är så pass utvecklad att majoriteten av komponenterna i drivlinan kan tillverkas med hjälp av AM. Det går dock att diskutera hur lämpligt det är att tillverka vissa komponenter med hjälp av AM. Det som avgör huruvida det är lämpligt är typen av last, magnituden på lasten och geometrin. Är den väldigt enkel finns det traditionella tillverkningsmetoder som specialiserar sig på sådana former och är då mycket effektiva på att skapa dessa.

En komponent i drivlinan som AM inte anses vara lämpad för är exempelvis drivaxeln. Denna komponent är väldigt enkel att tillverka med traditionella tillverkningsmetoder och utsätts för stora cykliska laster. Detta innebär att utmattning blir ett stort problem för både sintrande AM metoder som skapar mycket porösa detaljer och svetsande metoder vars ytfinhet och defekttäthet inte kan mäta sig med traditionella tillverkningsmetoder. I vissa fall kan dock ytfinheten förbättras och defekterna kan reduceras eller tas bort helt med hjälp av efterbetning.

Andra komponenter som inte utsätts för stora laster och har en komplicerad geometri är till exempel transmissionshuset. Denna komponent är mycket lämpad att använda AM för att tillverka och det visas också genom att transmissionshus

redan har tillverkats med AM av Porsche. Transmissionshuset som ofta görs med pressgjutning kan ackreditera mycket av sin geometri till de designkrav som pressgjutning har. Till exempel kräver pressgjutning att godstjockleken är jämn vilket gör att mycket vikt kan besparas bara genom att ha möjligheten till att variera godstjockleken mer vilket AM tillåter. Vidare kan även interna fackverkskonstruktioner samt topologioptimering användas för att reducera vikten.

AM kan också användas för att öka prestandan för olika komponenter. Kugghjulen kan konstrueras med interna fackverksstrukturer för att minska mängden vibrationer som i sin tur gör att drivlinan gör mindre oljud. Detta är också ett sätt att minska vikten på då mängden ljudisolerande material kan minskas för att uppnå samma ljudnivå. En annan komponent vars prestanda kan ökas är motorhuset till elmotorn. Interna kylkanaler kan användas för att mer effektivt leda bort värme från motorn. Värmen uppstår från de interna förlusterna i elmotorn vilket i framtiden kan minskas om effektiviteten hos elmotorer ökar.

En annan viktig punkt att diskutera är effekten av att sänka vikten i drivlinan i en elbil. Detta ger en elbil längre räckvidd och bättre prestanda men på grund av regenerativ inbromsning så ger en lättare elbil mindre påverkan på räckvidden än hos en bil med en förbränningsmotor. Räckvidden man tjänar in på att lätta fordonet kan motverkas på två sätt. Desto effektivare elmotorerna blir, desto mindre effekt ger viktminskningen på räckvidden då mer av energin man använder för att driva fordonet ges tillbaka vid regenerativ inbromsning. Det andra sättet är hur mycket av inbromsningen som görs av elmotorn. Ju mindre de konventionella bromsarna används ju mindre effekt har viktminskningen. Båda dessa är något man strävar efter att förbättra för att öka räckvidden hos en elbil och därför kommer AM:s roll för att skapa lättviktslösningar i den elektriska drivlinan i framtiden att ha mindre och mindre inverkan på just räckvidden. Minskad vikt hos en komponent kan göra att vikten hos andra komponenter kan minskas. Till exempel ger viktminskning i drivlinan att stötdämpningens vikt också kan minskas. Därför ger viktminskning i många fall större inverkan på vikten än bara viktminskningen för den individuella komponenten. AM kan också användas för reparation av komponenter. DED är den mest lämpade metoden för detta då den kan användas direkt på skadade komponenter. Komplexa geometrier som interna fackverksstrukturer eller topologioptimerade strukturer kan inte realiserats med DED som den ser ut idag, eftersom det inte finns någon möjlighet till stödstrukturer eller överhängande partier. Problem med reparation med hjälp av DED är förarbetet som krävs på den skadade komponenten då ytan som det nya materialet svetsas på måste vara slät och vågrät. Användningsområdet blir genast litet då potentiella fördelar som leveranstid inte behöver vara bättre då reservdelar ofta finns för massproducerade bilar.

6.2.2 Miljöpåverkan

I dagens läge kräver de flesta moderna tillverkningsmetoder väldigt mycket energi och bidrar till enorma mängder avfall och utsläpp. Additiv tillverkning tillhör fortfarande en av de tekniker som anses kräva mer energi än de traditionella

tillverkningsmetoderna. Däremot tillför metoden många positiva miljöaspekter som inte erhållits av tidigare metoder vilket gör det svårt att jämföra utan en korrekt livscykelanalys.

Utnyttjas metoden till att designa rätt typ av komponenter kan den indirekta positiva effekten kompensera för den negativa påverkan. Ett exempel på detta är att AM har gett mycket positiva resultat när det kommer till att reducera vikten hos redan befintliga komponenter. Detta har bland annat gynnat både flyg- och fordonsindustrin där reducerad vikt har bidragit till längre livslängd. Dessutom är det en bidragande orsak till att mindre energi krävs vid användning vilket i sin tur resulterar i färre utsläpp. Reducerad vikt hos fordon bidrar även till att belastningen på dagens vägbanor minskar och kan komma till att utnyttjas under en längre period. Utöver det har även tekniker inom AM som exempelvis *Direct Energy Deposition*, visats erhålla positiva egenskaper när det kommer till reparation. Detta ger möjligheten att reparera samt återanvända komponenter istället för att producera en ny från grunden.

Ytterligare en möjlighet, när det kommer till den positiva inverkan på miljön, som skapas utifrån AM-processer syftar till designfasen. Utöver att den reducerade vikten har en indirekt positiv påverkan vid användandet förekommer fördelar även kring producerandet. AM skapar en möjlighet att analysera komponenten i ett tidigt skede för att eventuellt reducera vikten genom att minska mängden material samtidigt som samma mekaniska egenskaper erhålls. Förutom att minskad mängden material i sig bidrar till en positiv inverkan på miljön minskar även tillverkningstiden vilket reducerar den energi som krävs vid producerandet.

Vidare är de pulverbäddstekniker som ingår i AM-processer gynnsamma när det kommer till återanvändning av material. Detta för att överflödigt pulver samlas upp i en behållare och kan utnyttjas till ytterligare en process. Därav orsakas mycket lite materialspill vid tillverkningstekniken vilket i sin tur reducerar avtrycket på miljön medfört av materialanvändningen.

6.2.3 Användning av additiv tillverkning inom fordonsindustrin idag

Varför additiv tillverkning inte används i större utsträckning i dagens läge kan bero på ett antal olika faktorer. Några av dessa faktorer diskuterats i *Avsnitt 6.1*. Faktorerna som diskussionen involverar är dimensioner, material, hållfasthet, produktionshastighet och kostnad. Om dessa faktorer skapar för stora begränsningar, kan det vara avgörande för företag att inte övergå från traditionella tillverkningsmetoder till AM.

Ytterligare en anledning till varför AM inte är så etablerat inom industrin kan vara brist på kunskap. AM är inte lika välkänt som de traditionella metoderna, och det har inte funnits lika länge. Ett annat perspektiv till varför AM inte används kan vara för att företag använder sig av de traditionella metoderna, och att det funkar tillräckligt bra, vilket gör att de inte är i behov av att övergå till att använda sig

av AM istället. Att byta tillverkningsmetod är även en kostnadsfråga och en del av företagets affärsplan.

7

Slutsats

Inom fordonsindustrin görs konstanta framsteg, framför allt inom elektrifiering av bilar. Det är därför intressant att undersöka hur drivlinan hos en elektrisk bil kan tillverkas, och om det går att använda sig av AM, samt hur lättviktslösningar kan implementeras. AM används inom bilindustrin idag men endast begränsat.

Lättviktslösningar kan åstadkommas via AM på flera olika sätt. Alla metoder inom AM har möjligheten att skapa lättviktslösningar men det finns begränsningar vilka komplexa geometrier som kan åstadkommas. Exempelvis är metoden DED inte optimal när det kommer till att skapa överhängande partier på grund av bristen av stödstrukturer under tillverkningsprocessen. Detta bidrar till att DED inte erhåller samma potential som andra AM-metoder till att skapa lättviktslösningar. En produkts vikt kan reduceras antingen via val av lättare material, geometrins utformning eller integrering av flera funktioner i en komponent. Ytterligare en aspekt för att skapa lättviktslösningar är att använda AM-metoder som bidrar till högst hållfasthet då mindre material krävs. Det innebär att de svetsande AM-metoderna har mest potential för att skapa komponenter i elektriska drivlinor.

Drivlinan består av ett antal komponenter där i princip alla kan tillverkas med AM. Däremot är det inte fördelaktigt att tillverka alla typer av komponenter i drivlinan med AM även om det är möjligt. Exempelvis är det inte gynnsamt att använda sig av AM när det kommer till tillverkningen av relativt enkla komponenter med höga hållfasthetskrav eftersom det i AM-processerna kan det uppstå defekter som inte är lika förekommande i vissa traditionella tillverkningsmetoder. Ett exempel på en sådan komponent är drivaxeln. Komponenter som drar nytta av att tillverkas med AM är exempelvis relativt små komponenter med komplexa geometrier. Komponenter kan förbättras via AM genom optimering av topologin, vilket kan reducera dess vikt och även öka prestandan. Dessutom kan produktens totala vikt reduceras dels eftersom AM möjliggör integrering av funktioner, men också att viktreducering av en komponent leder till att kraven på andra komponenter sänks och kan tillverkas lättare.

Det finns flera anledningar till varför AM inte används i större utsträckning inom fordonsindustrin idag. De flesta fordonstillverkare är beroende av massproduktion, vilket innebär att AM med sin relativt långsamma produktionshastighet hade ökat produkternas ledtider och därmed minskat företagets lönsamhet. En annan anledning till att AM inte används kan vara brist på kunskap och att de

traditionella tillverkningsmetoderna fungerar tillräckligt bra. Mer fokus läggs på att utveckla batterier med större energidensitet för att öka fordonens räckvidd. Minskning av vikten på enstaka komponenter har en minimal påverkan på fordonets räckvidd. Om AM ska kunna bidra till ökad räckvidd måste det ske en storskalig implementering på flera komponenter. Det är dock viktigt att notera att räckvidden endast är en av många faktorer att ta hänsyn till.

AM som tillverkningsmetod erhåller många positiva effekter som gör det intressant för företag att överväga implementering. Detta gäller eftersom att fordonsindustrin står för en stor omställning när det kommer till digitalisering och elektrifiering av industrin, vilket är möjligt med denna tillverkningsteknik. Ytterligare en faktor är att AM kan öka möjligheter till viktbesparingar och leda till lägre miljöpåverkan. I framtiden finns det potential för att AM ska bli mer förekommande hos industriföretag. Det kräver dock vidare utveckling av AM för att det ska bli mer anpassat och lönsamt för fordonsindustrier som massproducerar.

8

Rekommendationer

Detta arbete har lagt en grund för hur lättviktslösningar tillverkade via AM kan implementeras i elektriska drivlinor, men på grund av bland annat projektets avgränsningar finns det potentiella utvecklingsområden att ta hänsyn till vid fortsatta studier. Ytterligare analyser inom området krävs och kan ses som rekommendationer för framtida arbeten.

En aspekt som inte tas upp är hur AM kan implementeras i andra typer av fordon eftersom att arbetet är avgränsat till enbart personbilar. Eftersom att övriga fordonstyper, som exempelvis lastbilar och motorcyklar, också utgör en stor del av fordonsindustrin kan det vara fördelaktigt att se de möjligheter AM kan tillföra. Ett annat intressant utvecklingsområde att analysera är huruvida det går att implementera AM på komponenter utanför drivlinan. AM skulle exempelvis kunna användas för att integrera komponenter direkt i karossen för att reducera fordonets vikt.

En mängd olika material kan användas vid tillverkning med AM, men endast användning av metall har tagits hänsyn till i arbetet. Det kan behöva undersökas hur andra material kan användas via AM och ifall de lämpar sig bättre för tillverkning av lättviktskonstruktioner i fordon. Exempelvis kan även plastkomponenter optimeras med hjälp av AM, eller att det möjliggörs att okonventionella material används tack vare strukturoptimering.

I detta arbete har det nämnts att reduktion av ett fordonets vikt kan påverka bland annat körsträckan samt miljöpåverkan, men det är endast några få exempel. Därför är en rekommendation att i fortsatta studier undersöka vilka fler effekter implementering av lättviktslösningar i elfordon kan leda till. Om det tydliggörs på vilket sätt elektriska fordon kan förbättras kan övergången från bränsle drivna fordon påskyndas.

Under arbetet belystes även många av de begränsningar som finns med tillverkningstekniken i dagens läge. Exempelvis krävs det att AM effektiviseras. Detta kan vara en anledning till att AM inte har implementerats i större utsträckning i industrin. Därför finns det utvecklingspotential i att analysera de begränsningar som finns samt hur de kan förbättras.

Litteraturförteckning

- 3D EXPERIENCE. (u. å.). *Binder jetting - bj*.
<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/binder-jetting>.
- 3D-PRINTING. (u. å.). *Sls - selective laser sintering - teknik för 3d-printing*.
[https://www.3d-printing.se/SLSselective – Laser – Sintering](https://www.3d-printing.se/SLSselective%20-%20Laser%20-%20Sintering).
- 3D Sourced. (2021, 26/06). *Selective laser sintering: Everything you need to know about sls 3d printing*.
<https://www.3dsourced.com/guides/selective-laser-sintering-sls/>.
- 3D SYSTEMS. (u. å.). *Our story*. <https://www.3dsystems.com/our-story>.
- 3Dnatives. (2021, 8/9). *The role of am in the automotive industry*. Hämtad från
[https://www.3dnatives.com/en/
the-role-of-am-in-the-automotive-industry/#!](https://www.3dnatives.com/en/the-role-of-am-in-the-automotive-industry/#!)
- Ahmad, A., Bici, M. & Campana, F. (2021). Guidelines for topology optimization as concept design tool and their application for the mechanical design of the inner frame to support an ancient bronze statue. *Applied Sciences*, 11(17). Hämtad från <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/17/7834> doi: 10.3390/app11177834
- AM Power. (2019, 19/11). *First commercialization of am in the late 80s*. Hämtad från [https://additive-manufacturing-report.com/technology/metal/
metal-additive-manufacturing-history/](https://additive-manufacturing-report.com/technology/metal/metal-additive-manufacturing-history/)
- AMFG. (2018, 13/03). *A short guide to 3d printing with binder jetting*.
<https://amfg.ai/2018/03/13/3d-printing-binder-jetting-short-guide/>.
- AmTech. (u. å.). *Electric motor housing*. [https://
www.amtechinternational.com/portfolio/die-cast-motor-housing/](https://www.amtechinternational.com/portfolio/die-cast-motor-housing/).
(Hämtat 2022-03-09)
- Bendsøe, M. P. & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71, 197–224. doi: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars* (forskningsrapport). International Council on Clean Transportation. Hämtad från [https://theicct.org/sites/default/files/publications/
Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf)
- Bitzer, T. N. (1997). *Honeycomb technology : Materials, design, manufacturing, applications and testing*. Springer Netherlands.

- Bowerman, R. (2021, 27/10). *What is ded and why should you be using it? part one*. Hämtad från <https://3dprintingindustry.com/news/what-is-ded-and-why-should-you-be-using-it-part-1-198504/>
- Britannica. (2022). *Truss*. Hämtad från <https://www.britannica.com/technology/truss-building>
- Cavallo, C. (u. å.). *All about binder jetting 3d printing*. <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/all-about-binder-jetting-3d-printing/>.
- Charles, A., Hofer, A., Elkaseer, A. & Scholz, S. (2021, 09). Additive manufacturing in the automotive industry and the potential for driving the green and electric transition. I (s. 339-346). doi: 10.1007/978-981-16-6128-0_32
- Chiu, L. N., Rolfe, B., Wu, X. & Yan, W. (2018). Effect of stiffness anisotropy on topology optimisation of additively manufactured structures. *Engineering Structures*, 171, 842-848. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618302025> doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.083>
- CONNECTIVE. (u. å.). <https://www.connective.tech/focus-areas/powersplit-rx-ii>. (Hämtad: 2022-03-29)
- Craig A. Giff, B. G. & Illinda, P. (2014). *3d opportunity in the automotive industry* (forskningsrapport). Deloitte University Press.
- Curtis D Anderson, J. A. (2010). *Electric and hybrid cars*. McFarland & Company, Inc., Publishers.
- David Cullen. (2019, 14/8). *Selective laser sintering today*. <https://www.3dsystems.com/blog/2019/2019-08/selective-laser-sintering-today>. (Hämtat 2022-04-26)
- DMFPro. (2022, 25/4). *Dfmpro for casting design*. Hämtad från <https://dfmpro.com/manufacturing-processes/dfmpro-for-casting/>
- Durach, C., Kurpjuweit, S. & Wagner, S. (2017, 09). The impact of additive manufacturing on supply chains. *International Journal of Physical Distribution Logistics Management*, 47, 954-971. doi: 10.1108/IJPDLM-11-2016-0332
- EMP Tech. (u. å.). *Electric vehicle parts*. <https://www.empcasting.com/electric-vehicle-parts/>. (Hämtat 2022-03-09)
- Engineering PRODUCT design. (u. å.). *Directed energy deposition (ded)*. https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/Advantages_and_disadvantages_of_directed_energy_deposition.
- Engineering Product Design. (2022, 25/4). *Introduction to topology optimization*. Hämtad från <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>
- EOS. (2022). *What is additive manufacturing? manufacture directly instead of using tools, wax patterns, etc*. Hämtad från https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works?utm_source=google&utm

- _medium=cpc&utm_campaign=generic_EMEA&utm_content=wyn&gclid=CjwKCAjwopWSBhB6EiwAjxmQDdoEGsIZgg1Mu46mdmWgsMZui1zYZKSzPCR3k_DpauyQOZ2bgtPCpRoCJGcQAvD_BwE
- EVreporter. (2020, 7/6). *Additive manufacturing for product development and rapid prototyping of electric powertrain*. <https://evreporter.com/additive-manufacturing-for-electric-powertrain/>.
- ExOne. (u. å.). *What is binder jetting?* <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting>.
- Fast Radius. (2022). *Understanding 3d printed lattices: Properties, performance, and design considerations*. Hämtad från <https://www.fastradius.com/resources/understanding-3d-printed-lattices-performance-and-design-considerations/>
- formlabs. (u. å.). *Guide to selective laser sintering (sls) 3d printing*. <https://formlabs.com/asia/blog/what-is-selective-laser-sintering/>.
- foundry-planet. (2014, 27/11). *Why slm 3d printing has substantial benefits for the automotive industry*. <https://www.foundry-planet.com/d/why-slm-3d-printing-has-substantial-benefits-for-the-automotive-industry/>.
- Fried, S. (2019, 25/04). *Additive manufacturing cost drivers: 4 key considerations*. Hämtad från <https://www.nano-di.com/resources/blog/2019-additive-manufacturing-cost-drivers-4-key-considerations>
- GE Additive. (u. å.-a). *About us*. <https://www.ge.com/additive/who-we-are>.
- GE Additive. (u. å.-b). *Electron beam melting*. <https://www.ge.com/additive/ebm>.
- GE Additive. (u. å.-c). *Powder specifications*. <https://www.ge.com/additive/powder-specification>.
- GE Additive. (2021). *Additive 101*. Hämtad från <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- Gelmanova, Z. S. (2018). "electric cars. advantages and disadvantages". , 1015. Hämtad från <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052029/pdf> doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052029
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies 3d printing: Rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer Nature Switzerland AG.
- Gockel, J., Sheridan, L., Koerper, B. & Whip, B. (2019). The influence of additive manufacturing processing parameters on surface roughness and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 124, 380-388. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319301021> doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.03.025>
- Gordon Jones. (2021, 15/4). *Direct metal laser sintering (dmls) – simply explained*. <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>.
- Greenemeier, L. (2012, 9/11). *Nasa plans for 3-d printing rocket engine parts could boost larger manufacturing trend*. <https://www.scientificamerican.com/article/nasa-3-d-printing-sls-rocket-engine/>.
- Gu, D. (2015). *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. Springer Berlin Heidelberg. Hämtad från

- <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4> doi:
10.1007/978-3-662-46089-4
- Guo, N. & Leu, M. (2013, 09). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8. doi:
10.1007/s11465-013-0248-8
- Hamerly, R. (2010). *Direct current transmission lines, physics 240* (forskningsrapport). Stanford University.
- HUBS. (u. å.). *Introduction to binder jetting 3d printing*.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/pros-cons>.
- Höganäs. (u. å.). *Skip support structures when 3d printing parts with binder jetting*. <https://www.hoganas.com/sv/powder-technologies/additive-manufacturing-metal-powders/binder-jetting/>.
- Höganäs and Alvier Mechatronics. (u. å.). *Connective edrive*.
https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets---all-documents/alvier-mechatronics_connective-edrive_3134hog.pdf. (Accessed: 2022-03-29)
- K.G Swift, J. B. (2013). *Manufacturing, process selection handbook*. Oxford, Elsevier Ltd. doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07343-X>
- Kok, Y., Tan, X., Wang, P., Nai, M., Loh, N., Liu, E. & Tor, S. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design*, 139, 565-586. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517310493> doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>
- Kothari, C. (2004). *Research methodology : Methods and techniques*. New Age International Ltd.
- Kruth, J., Froyen, L., Rombouts, M., Van Vaerenbergh, J. & Merccells, P. (2003). New ferro powder for selective laser sintering of dense parts. *CIRP Annals*, 52(1), 139-142. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607605502> doi:
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60550-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60550-2)
- Laddsmart. (u. å.). *Hur länge håller egentligen batteriet i en elbil?* Hämtad från <https://laddsmart.se/elbilar/livslangd-elbil-batteri/>
- Lewandowski, J. & Seifi, M. (2016, 07). Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 46, 151-186. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024
- Lipson, H. & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3d printing*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana.
- Lopez, C. & Stroobants, J. (2019). Lattice topology optimization and additive manufacturing of a 316l control arm. I *Sim-am 2019 : Ii international conference on simulation for additive manufacturing* (s. 186-192). CIMNE. Hämtad från <http://hdl.handle.net/2117/334606>
- Loughborough University. (u. å.). *About additive manufacturing*.
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binder>

- Loukas. (2022, 30/4). *Different types of electric motors used in evs*.
https://www.arenaev.com/different_types_of_electric_motors_used_in_evs-news-214.php.
- Mahamood, R. M., Jen, T. C., Akinlabi, S. A., Hassan, S., Abdulrahman, K. O. & Akinlabi, E. T. (2021). Chapter 6 - role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. I M. Manjaiah, K. Raghavendra, N. Balashanmugam & J. P. Davim (red.), *Additive manufacturing* (s. 107-126). Woodhead Publishing. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128220566000035> doi:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822056-6.00003-5>
- Maier, M., Siegel, D., Thoben, K., Niebuhr, N. & Hamm, C. (2013). Transfer of natural micro structures to bionic lightweight design proposals. *J Bionic Eng*, 10, 469–478. doi: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60241-3](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60241-3)
- Markforged. (u. å.). *What is electron beam melting (ebm)?*
<https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm>.
- Martinho, P. G. (2021). Chapter 9 - rapid manufacturing and tooling. I A. S. Pouzada (red.), *Design and manufacturing of plastics products* (s. 381-456). William Andrew Publishing. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197752000085> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819775-2.00008-5>
- Mats Engwall, A. J. (2015). *Industriell ekonomi, metoder och verktyg*. Studentlitteratur AB.
- METAL AM. (2019, 21/8). Integrated cooling in electric motor housing developed using metal additive manufacturing. Hämtad från <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1940>
- M. Fitouri, Y. B. & Abdelkrim, M. N. (2016). Analysis and co-simulation of permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault by finite element method. , 13. Hämtad från <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7473721> doi: 10.1109/SSD.2016.7473721
- Motorhills. (u. å.). *7 reasons why electric cars are so heavy*. Hämtad från (<https://www.motorhills.com/7-reasons-why-electric-cars-are-so-heavy/>)
- M. Revillia-León, M. J. M. & Özcan, M. (2019). *Metal additive manufacturing technologies: literature review of current status and prosthodontic applications*.
http://www.quintpub.com/userhome/ijcd/ijcd21_revillalen_p55.pdf.
- Muhammad, M. S., Kerbache, L. & Elomri, A. (2022). Potential of additive manufacturing for upstream automotive supply chains. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 23(1), 1-19. Hämtad från <https://doi.org/10.1080/16258312.2021.1973872> doi: 10.1080/16258312.2021.1973872
- Naseer, M. U., Kallaste, A., Asad, B., Vaimann, T. & Rassölkin, A. (2021). A review on additive manufacturing possibilities for electrical machines. *Energies*, 14(7). Hämtad från

- <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1940> doi: 10.3390/en14071940
Nationalencyklopedin. (2022). *Källkritik*. Hämtad från
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/källkritik>
- Owen Harris, P. L. & Gale, A. (2019). Electric vehicle whine noise—gear blank tuning as an optimization option. *Gear Technology*, 36(2), 64–73.
- Plocher, J. & Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, 183, 108164. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519306021> doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>
- PROTOLABS. (u. å.). *What is selective laser sintering (sls)?*
<https://www.protolabs.com/resources/design-tips/designing-for-selective-laser-sintering/>.
- Ramadani, R., Pal, S. & Kegl, M. (2021). Topology optimization and additive manufacturing in producing lightweight and low vibration gear body. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 1433-3015. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06841-w>
- Redelbach, M., Klötzke, M. & Friedrich, H. E. (2012). "impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts". Hämtad från
<https://core.ac.uk/download/pdf/31004331.pdf>
- Renesas. (u. å.). *What are brushless dc motors*. Hämtad från
<https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview>
- Road & track. (2022). *Car technology*. Hämtad från
<https://www.roadandtrack.com/new-cars/car-technology/a12019034/why-dont-electric-cars-have-multi-gear-transmissions/>
- Sanaei, N. & Fatemi, A. (2021). Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review. *Progress in Materials Science*, 117, 100724. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642520300888> doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100724>
- Schmidt, M. (2021, 7/6). *Precision metrology's increasing role in ev gear manufacturing*. Hämtad från <https://metrology.news/precision-metrologys-increasing-role-in-ev-gear-manufacturing/>
- Scott, G. (u. å.). *Ultra-lightweight design of a single speed ev transmission* (forskningsrapport). Drive System Design.
- Shellabear, M., Nyrhila, O., Geiger, M. & Otto, A. (2004). Dmls - development, history and state of the art, 4th.; conference, laser assisted net shape engineering. I *Laser assisted net shape engineering, laser assisted net shape engineering -cd-rom edition-, 4th.; conference, laser assisted net shape engineering* (s. 393-404). Bamberg, Germany:: Meisenbach,;. Hämtad från <https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLCP%3ACN064464941>
- SLM SOLUTIONS. (u. å.). *Our goal is to change the future of manufacturing forever*. <https://www.slm-solutions.com/>.
- Stappen, H.-J. (2020, 17/12). *Prototype for small-series production: electric drive*

- housing from a 3d printer*. Hämtad från <https://newsroom.porsche.com/en/2020/innovation/porsche-prototype-small-production-electric-drive-housing-3d-printer-23235.html>
- Städje, J. (2013, 6/8). *W3d-skrivaren som skriver ut i titan*. <https://techworld.idg.se/2.2524/1.511442/3d-skrivaren-som-skriver-ut-i-titan/sida/1/kallas-inte-3d-skrivare>.
- Sustainable energy authority of Ireland. (2022). *Seai*. Hämtad från <https://www.seai.ie/technologies/electric-vehicles/what-is-an-electric-vehicle/how-electric-vehicles-work/>
- Thomas. (u. å.). *All about binder jetting 3d printing*. <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/all-about-binder-jetting-3d-printing/>.
- Thomas, D. S. & Gilbert, S. W. (2014). Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. doi: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>
- TOP3D. (u. å.). *Binder jetting 3d printing metall*. Hämtad från <https://www.top3d.se/material-3d-printing/metall-processor/binder-jetting/>
- Tschorn, J. A., Fuchs, D. & Vietor, T. (2021, 12). Potential impact of additive manufacturing and topology optimization inspired lightweight design on vehicle track performance. *Int J Interact Des Manuf*, 15. doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00777-x>
- TWI. (u. å.-a). *What is additive manufacturing? definition, types and processes*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturingWhoInventedAdditiveManufacturing>.
- TWI. (u. å.-b). *What is directed energy deposition (ded)?* <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>.
- US department of energy. (2022). *Key components of an all-electric car*. Hämtad från <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- V., C. (2019, 7/10). *The complete guide to electron beam melting (ebm) in 3d printing*. <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>.
- Wei, R. P. (1978, 04). Fracture Mechanics Approach to Fatigue Analysis in Design. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 100(2), 113-120. Hämtad från <https://doi.org/10.1115/1.3443458> doi: 10.1115/1.3443458
- Xometry Europe. (2021, 2/08). *Direct metal laser sintering (dmls) 3d printing: Technology overview*. <https://xometry.eu/en/direct-metal-laser-sintering-dmls-3d-printing-technology-overview/>.
- Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S. & Zamani, D. (2019). On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 225-232. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844218302234> doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.012>
- Zhang, T., Wang, A., Wang, Q. & Guan, F. (2019). Bending characteristics analysis and lightweight design of a bionic beam inspired by bamboo structures. *Thin-Walled Structures*, 142, 476-498. Hämtad från <https://>

- www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823118313983 doi:
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.043>.
- Zhao, L., Ma, J., Chen, W. & Guo, H. (2011). Lightweight design and verification of gantry machining center crossbeam based on structural bionics. *Journal of Bionic Engineering*, 8, 201–206. doi:
[https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(11\)60021-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(11)60021-8)
- Zhu, C., Liu, T., Qian, F., Chen, W., Chandrasekaran, S., Yao, B., ... Li, Y. (2017). 3d printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage. *Nano Today*, 15, 107-120. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748013217302426> doi:
<https://doi.org/10.1016/j.nantod.2017.06.007>
- Zubi G, C., Dufo-López R. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. , 89(292-308). Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728> doi:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>

Institutionen för industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY