CHALMERS



Viktreducering och Omdesign med Additiv Tillverkning

Applicering av additiv tillverkning på en axel i en växellåda

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Gustav Eriksson
Anna Erkén
Nellie Jönsson
Jonas Trombati

Institutionen för industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Kandidatarbete 2019:IMSX15-19-22

Viktreducering och omdesign med Additiv Tillverkning

Applicering av additiv tillverkning på en axel i en växellåda

Gustav Eriksson
Anna Erkén
Nellie Jönsson
Jonas Trombati



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för industri- och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige 2019

Viktreducering och omdesign med additiv tillverkning
Applicering av additiv tillverkning på en axel i en växellåda
Gustav Eriksson
Anna Erkén
Nellie Jönsson
Jonas Trombati

© Gustav Eriksson, 2019.
© Anna Erkén, 2019.
© Nellie Jönsson, 2019.
© Jonas Trombati, 2019.

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

Kandidatarbete 2019:IMSX15-19-22
Institutionen för industri- och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Detalj som 3D-printats för tillverkningstest.

Göteborg, Sverige 2019

Sammanfattning

Additiv tillverkning, som i vardagligt tal kallas 3D-printning, är en tillverkningsteknik som bygger komponenter genom att addera material istället för att ta bort material. Det här ger en unik möjlighet till större designfrihet samt viktreducering hos komponenter. Inom bilindustrin, där minskad bränsleåtgång hos bilarna är högt eftersträvat, blir därför additiv tillverkning intressant. Därför har CEVT initierat projektet med syfte att utreda i vilken grad viktreducering och omdesign är möjligt för en axel i en växellåda samt hur tillverkningsprocessen genomförs. Projektet är en studie om vilka möjligheter tekniken ger inför framtiden och därför görs avgränsningen i projektet om att produktionskostnaden ej kommer att undersökas.

Arbetet utgår ifrån axeln som CEVT tillhandahöll och på den utförs en analys för att klargöra vilka förutsättningar komponenten har. Utifrån det optimeras den ursprungliga komponenten för att sedan beredas och tillverkas med pulverbäddstekniken Direct Metal Laser Sintering.

Rapporten visar den arbetsprocess som ligger till grund för produktutveckling där komponenter omdesignas och optimeras med hjälp av additiv tillverkning. Arbetsprocessen följer stegen finit element analys, topologioptimering, simulering av tillverkningsprocessen, materialval, beredning av CAD-modellen och prototyptillverkning. Resultatet mynnar ut i en reducering av vikten hos den ursprungliga axeln med 25,0%. Det konstateras även i rapporten att det för komponenter med högt ställda toleranskrav krävs efterbearbetning på grund av att tekniken innebär en begränsning när det gäller att uppnå ytfinhet. Resultatet och tillvägagångssättet som presenteras i rapporten kan även användas som en fingervisning till hur applicerbart additiv tillverkning i dagsläget är på komponenter liknande axeln som projektet är baserat på.

Abstract

Additive Manufacturing, also called 3D printing, is a technology that builds 3D components by adding material layer-by-layer instead of subtracting material like conventional manufacturing processes. It provides a unique opportunity for greater design freedom and weight loss of components. Additive manufacturing is of interest in the automotive industry because of the desire to reduce fuel consumption. Therefore, CEVT has initiated the project with the aim of investigating to which extent weight reduction and redesign is possible for a shaft in a gearbox and the implementation of the manufacturing process. The project is a study of the possibilities for the technology and therefore the production cost will not be investigated.

The work was based on the shaft provided by CEVT. An analysis of the component was carried out to clarify which requirements are set. Based on this, the original component was optimized, then prepared and 3D printed using the powder bed fusion technique Direct Metal Laser Sintering.

The report shows the workflow that forms the basis for product development where components are redesigned and optimized using additive manufacturing. The course of action follows: finite element analysis, topology optimization, simulation of manufacturing process, material selection, prepearation of 3D model and prototyping. The project managed to reduce the weight of the component by 25,0%. It is also found in the report that for components with high tolerance requirements like this, post-processing is required, as the technology has a limitation when it comes to achieving surface roughness that is within tolerances for bearing positions. The result and approach presented in the report can also be used as an indication of how applicable additive manufacturing currently is on components similar to the shaft in this project.

Förord

Den här rapporten har utförts inom ramarna av ett kandidatarbete under våren 2019 vid Chalmers tekniska högskola. Projektgruppen som utfört arbetet har bestått av fyra studenter som studerar tredje året vid Civilingenjörsprogrammet inom Maskinteknik. Projektet kom till genom att CEVT initierat projektet där Magnus Flood och Martin Hedström varit kontaktpersoner. Ett riktat tack vill gruppen därför skicka för deras bidrag med information som varit nödvändigt för projektets genomförande.

Vi som arbetat med projektet tycker det har varit riktigt roligt att ha tagit chansen att lära sig om Additiv tillverkning. Det är nämligen ett område som ej täcks av grundutbildningen inom maskinteknik på Chalmers. Därför känner vi att, för vår del, mycket ny kunskap har införskaffats. Det är något vi känner bidrar stort till att utöka vår ingenjörsmässiga verktygslåda som vi kan ta med oss vidare i studierna och senare arbetslivet!

Till sist vill vi även skicka ett stort tack till de personerna vid avdelningen för material och tillverkning vid institutionen för industri- och materialvetenskap på Chalmers. De personerna är Professor Lars Nyborg som agerat examinator samt Forskningsingenjör Lars Hammar, Doktorand Alexander Leicht och Universitetslektor Mats Norell som bidragit med handledning. Utan er hjälp hade arbetet ej varit genomförbart.

Gustav Eriksson,
Anna Erkén,
Nellie Jönsson,
Jonas Trombati, Göteborg, Maj 2019

Innehåll

Figurer **xiii**

Tabeller **xv**

1 Introduktion **1**
1.1 Bakgrund . . . 2
1.2 Syfte . . . 2
1.3 Beskrivning av komponent . . . 2
1.4 Avgränsning . . . 3

2 Teori **5**
2.1 Additiv tillverkning . . . 5
2.1.1 Pulverbädd . . . 6
2.1.2 Återanvändning av metallpulver . . . 8
2.2 Material . . . 8
2.2.1 Metallegeringar . . . 9
2.2.2 Material för framtiden . . . 10
2.3 Tillverkningsprocessen . . . 10
2.4 Gitterstruktur . . . 11
2.5 Ytfinhet . . . 12
2.6 Form- och lägestoleranser . . . 13

3 Metod **15**
3.1 CAD . . . 15
3.2 FE-analys . . . 15
3.3 Optimering . . . 16
3.4 CES . . . 17
3.5 Simulering . . . 18
3.6 Prototyptillverkning . . . 18
3.7 Kontroll av prototypen . . . 19

4 Resultat **21**
4.1 Analys av komponentens förutsättningar för AM . . . 21
4.2 FEM-simulering . . . 22
4.3 Topologioptimering . . . 23
4.4 Omdesign . . . 25
4.5 Simulering av prototyptillverkningen . . . 27

4.6 Materialval 29
4.7 Resultat av tillverkad komponent 31

5 Diskussion **33**
5.1 Analys av valt material 33
5.2 Analys av simulering 34
5.3 Prototyptillverkning 34
5.4 Efterbearbetning 34
5.5 Slutsatser 35

6 Rekommendationer **37**
6.1 FEM av gitterstruktur 37
6.2 Material 37
6.3 Simulering 37
6.4 Prototyptillverkning 38
6.5 Design 38

Bibliography **39**

Figurer

1.1 Projektets valda komponent 3

2.1 Tvärsnitt av axel med exempel på gitterstruktur. 5
2.2 AM-skalan 6
2.3 Förklarande bild på processen DMLS 7
2.4 CAD-modell - Resultat av simuleringen - Inversen 10
2.5 Överhäng 11
2.6 Gitterstruktur i 2D och 3D 12
2.7 Illustration av “stair stepping effect" 13

3.1 Illustration över lagrens (blå) och de aktiva växlarnas (orange) positioner 16
3.2 Elementnät med elementstorlek 3 mm 17
3.3 Blåa rutorna visar processkedjan som simuleras i Simufact Additive . 18

4.1 Tvärsnitt över den ursprungliga axeln 22
4.2 Utböjning i radiell led 23
4.3 Spänningskoncentration med von Mises-spänning 23
4.4 De rosa ytorna visar material som kan avlägsnas i det invändiga tvärsnittet 24
4.5 Kugghjulets förändring efter topologioptimering 24
4.6 Överflödigt material invändigt för målvikt 25% av ordinarie vikt . . . 25
4.7 Tvärsnitt av axeln indelad i sektioner 26
4.8 En närmare vy över gitterstrukturen och väggtjockleken i sektion A . 26
4.9 Enhetcellens utformning 27
4.10 Stödstrukturen som användes i Simufact 27
4.11 Resultatet av simulering för de två CAD-modellerna 28
4.12 Resultatet av simulering för de två inverterade CAD-modellerna . . . 28
4.13 Elasticitetsmodulen mot hårdheten 29
4.14 Elasticitetsmodulen mot sträckgränsen 30
4.15 Densiteten mot elasticitetsmodulen 31
4.16 Värmedeformationer syns i form av det brunbrända området längst in på planet 32
4.17 Stödstruktur i form av raka kuggar 32

5.1 Markeringen visar hur grunden till kuggen bör se ut vid 3D-printning 35

Tabeller

2.1 Yfinhet med olika metoder 13

3.1 Krafter som påverkar axeln 15

4.1 Resultat av viktminskning från topologioptimering 23
4.2 Väggtjocklekens disponering över axeln 25
4.3 Materialegenskaper hos AM-material från EOS 29

Förkortningslista

AM Additiv Manufacturing
CAD Computer-aided design
CEVT Chinese European Veichle Technology
DFAM Design for additive manufacturing
DMLS Direct metal laser sintering
EBM Electron beam melting
EN Europastandard
FE Finit element
FEA Finit element analys
FEM Finita element metoden
HIP Hot isostatic press treatment
ISO Internationella standardiseringsorganisationen
LPBF Laser powder bed fusion
SHS Selective heat sintering
SLM Selective laser melting
SLS Selective laser sintering
SS Svensk Standard
TO Topologioptimering

1

Introduktion

I takt med att produkter i samhället utvecklas och är allt mer komplexa och har kortare produktlivscykler krävs en flexibel produktionsstruktur som snabbt går att ändra om vid produktvariationer. En lösning på detta är additiv tillverkning, som i vardagligt tal kallas 3D-printing och vidare i texten benämns AM. Tekniken förutspås att bli en ny industriell revolution och just nu bedrivs forskningen inom området med målet att industrialisera tekniken för att nå dess fulla potential [1].

AM är en tillverkningsmetod som utifrån en CAD-modell skapar tredimensionella objekt genom att smälta material som adderas lager på lager. Tekniken ger förutsättningar för att skapa komplexa geometrier, viktoptimering och kortare totala ledtider då flera tillverkningssteg kan slås ihop. I dagsläget används AM som tillverkningsmetod inom flera olika industrisektorer, allt ifrån rymdindustrin till medicinteknik, där den har lyckats ersätta gamla konventionella metoder. Drivkraften har varit förmågan att leverera bättre produkter, både kostnadsmässigt men även för att uppnå förbättrad prestanda och nya funktioner. AM inom bilindustrin har inte en lika hög teknologisk mognadsgrad som till exempel inom flygindustrin eller medicintekniken. Inom bildindustrin används AM framför allt till funktionella prototyper på testnivå av komponenter och reservdelar. Exempelvis har Bugatti nyligen producerat ett fullt fungerande 3D-printat bromsok i titan [2].

För att stärka tillverkningsindustrin och behålla produktionen inom Europa startas ett initiativ lett av industrin som kallas MANUFUTURE. De startar i sin tur European Factories of the Future Research Association som jobbar med att uppmuntra forskning inom tillverkningsteknik. De har tagit fram en strategisk plan kallad 'Factories of the Future 2020' som lyfter fram AM som en nyckel till avancerad tillverkning då den har ett brett utbud av fördelar och potential för att stödja miljömässig hållbarhet för tillverkning [3].

I ett större perspektiv är det intressant hur AM kan bidra till att förbättra den miljömässiga hållbarheten av samhället med effektivare produkter. Ett exempel är möjligheten att tillverka lättare komponenter i bil och flyg som där med leder till reducerad bränsleåtgång. Ett annat exempel är maskiner som kan arbeta effektivare genom möjligheten till bättre kylning i verktyg där kylkanaler kan designas utifrån kyleffekt och inte utefter tillverkningsmetodens begränsningar [5].

1.1 Bakgrund

Chinese European Veichle Technology (CEVT) är ett utvecklingsbolag åt Geely med inriktning mot innovation inom bilindustrin. CEVT strävar efter att vara så konkurrenskraftiga som möjligt på en global marknad genom att leverera bättre teknik än konkurrenterna. För att lyckas med det så är det ett måste att hänga med i trender samt att utforska nya möjligheter till att ligga i framkant. Med det som mål är AM väldigt intressant eftersom det möjliggör en effektiv metod att reducera vikt på komponenter, stora designfriheter samt att utvecklingen från koncept till färdig produkt kan ske snabbare jämfört med konventionella tillverkningsmetoder. Därför har CEVT initierat detta projekt som projektgruppen vid Chalmers tekniska Högskola ska undersöka vidare hur det kan se ut när AM används som alternativ tillverkningsmetod.

1.2 Syfte

Rapporten syftar till att undersöka vilka möjligheter som finns för AM och hur de kan appliceras hos en axel i växellådan i en bil för att sänka vikten med bibehållen eller förbättrad funktion. Att vidare bereda och tillverka en prototyp av vald komponent enligt den arbetsgång som beskrivs i kapitel 2.3. Anledningen är att undersöka om den är tillverkningsbar.

1.3 Beskrivning av komponent

Komponenten som behandlas är en axel till en växellåda som ses i figur 1.1. Bilden är från CAD-modellen som projektet utgår ifrån och visar en axel med ett integrerat kugghjul längst ner. Som ses i bilden är det små hål, som finns för att olja ska kunna disponeras jämnt genom hela axeln. Funktionen som växellådan uppfyller i en bil är att överföra kraft från motorn till drivhjulet. Det sker med en serie kuggar och axlar där varje kugge motsvarar en växel. Axelns huvudfunktion är att överföra vridmoment. Det här ska ske så friktionsfritt som möjligt för att minimera energiförluster. Därför blir axelns sekundära funktioner smörjning av lager samt att hålla kugghjulen på den plats där de ska arbeta.

Axeln är gjord av konstruktionsstål vilket har elasticitetsmodulen 210 GPa, sträckgränsen 1100 MPa och densitet på 7850$\frac{kg}{m^3}$ [4]. Axelns längd är ca 24 cm, ursprunglig vikt $2,04$ kg och volym 0.26 dm^3, datan för geometrin tas fram med hjälp av Catia. Axeln tillverkas i sex bearbetningssteg; grovsvarvning, fräsning, finbearbetning och borrning i tre olika dimensioner; smörjningshål och två olika dimensioner av urborrning av material.



Figur 1.1: Projektets valda komponent

1.4 Avgränsning

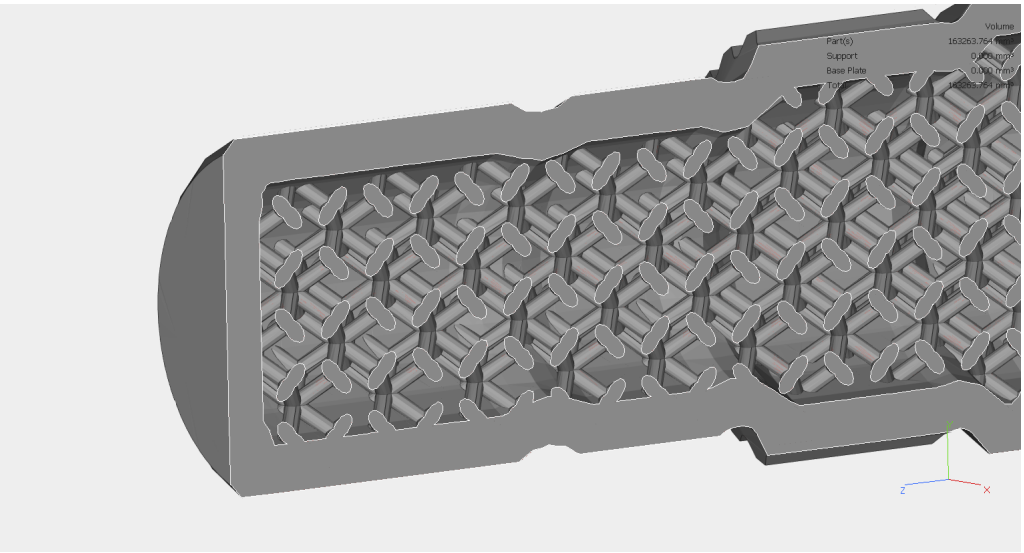
Projektet kommer endast undersöka enstycks/prototyptillverkning för att se vad tekniken har för möjligheter och därmed kommer inte kostnaden att tas i beaktning. Pulverbäddsteknik är tillverkningsmetoden som kommer att användas då det är den typ av utrustning som finns på institutionen. FE-analyserna som görs i projektet sker på en förenklad CAD-modell med ett förenklat lastfall.

2
Teori

Kapitlet innehåller information om AM, material, processer, strukturer och ytfinhet. Den fakta som finns i kapitlet ligger till grund för motiveringar och val som gjordes senare under projektets gång.

2.1 Additiv tillverkning

AM hänvisar till en teknologi som bygger fysiska objekt direkt från en CAD-modell. Tekniken går ut på att i 3D-skrivaren adderar material lager på lager för att skapa tredimensionella komponenter med lite eller ingen efterföljande bearbetning. Tillvägagångssättet skiljer sig åt från traditionella tillverkningsmetoder, så som svarvning och fräsning, som istället utgår från att avverka material. Det här innebär att materialanvändningen kan reduceras med $40 - 60\%$ samt att detaljer som tidigare monterats ihop efter bearbetning nu kan tillverkas med AM i ett enda stycke [5]. En annan fördel är den gitterstruktur (se definition i kapitel 2.4) som kan skapas med AM. Nät- och gitterstrukturer minskar komponentvikten men kan uppnå bibehållen hållfasthet [6]. Uformning av gitterstruktur exemplifieras i Figur 2.1



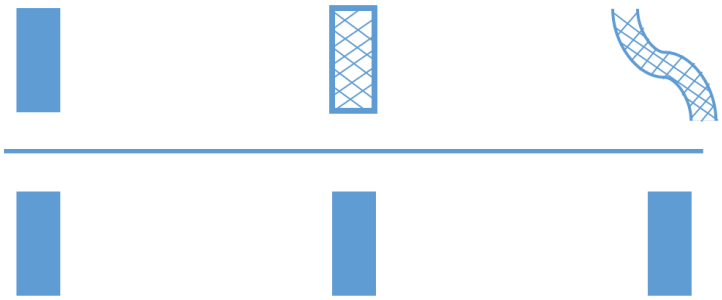
Figur 2.1: Tvärsnitt av axel med exempel på gitterstruktur.

Det kan användas många olika slags material vid AM så som olika polymerer, keramer, metaller eller glas. Till och med trä kan användas om det blandas upp med

en polymer och produkten får då både ett utseende och en känsla som liknar trä[7]. Den materialtyp som används i detta projekt är metall vilket produkten kommer att tillverkas med genom AM, dock kommer andra material att utvärderas och analyseras ifall något annat material kan uppnå samma egenskaper som metall och då vara relevant vid vidare tillverkning.

AM av metall delas in i två grupper: 'Blown powder technologies' där metallpulvret matas kontinuerligt till laserstrålen och 'Powder bed technologies' där en pulverbädd sprids ut och en laser- eller elektronstråle arbetar efteråt för att smälta pulvret [8]. Den senare tekniken kommer användas i detta arbete.

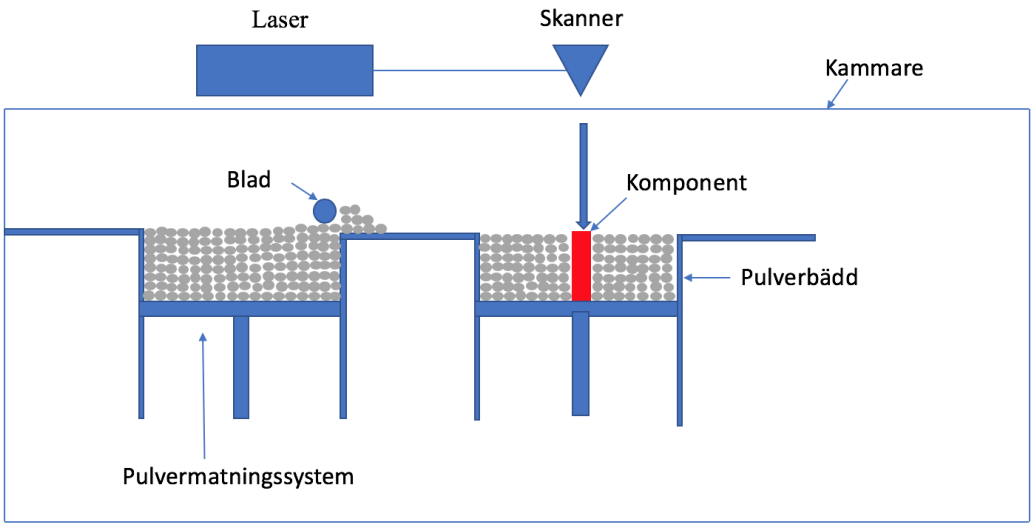
AM kan användas i olika utsträckning vilket kan visualiseras på en skala, se figur 2.2. Längst till vänster tillverkas produkten rakt av med AM utan att produkten ändras annat än med tillverkningsmetod. I fallet då komponenten kan tillverkas med annan metod med samma resultat är AM troligtvis inte ett lämpligt alternativ då kostnaden och tillverkningstiden per komponent ökar. I mitten används några av AM-metodens fördelar så som gitterstruktur eller reducering av material på ställen som inte är möjligt med traditionell tillverkning. Längst ut till höger hamnar total omdesign av produkten utifrån kombinering av de unika designmöjligheter som AM möjliggör. Metoder inom Design for Additive Manufacturing (DFAM) så som topologioptimering, lättviktsoptimering och komponentkonsolidering kombineras.



Figur 2.2: AM-skalan

2.1.1 Pulverbädd

Det finns fyra metoder som kan användas vid AM av metall och det är Direct Energy Deposition (DED), Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Electron Beam Melting (EBM) och Binder Jetting. DED och Binder Jetting är metoder där metallpulvret eller metalltråden matas kontinuerligt till energistrålen. EBM och LPBF är pulverbäddstekniker varav metoden Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ingår i LPBF vilken är den metod som kommer att användas i detta projekt. Metoden illustreras i figur 2.3.



Figur 2.3: Förklarande bild på processen DMLS

Pulverbäddsteknik kan antingen använda sig utav en laserstråle eller en elektronstråle för att sammansmälta pulvermaterialet. Tekniken går ut på att pulvermaterialet sprids ut över föregående pulverlager. Pulvret kommer från en behållare som är placerad bredvid bädden. För att få ett jämnt pulverlager används ett blad som körs fram och tillbaka över bädden och sprider ut pulvret. Metoden funkar på så sätt att ett lager pulver på 20-40 μm sprids ut över bädden. Efter det så smälter en laserstråle eller elektronstråle samman pulvret. Maskinen sänker sedan behållaren motsvarande mikrometer som önskad lagertjocklek för att ett nytt lager av pulver sedan ska spridas över bädden. På detta sätt fortsätter processen tills produkten är klar. Pulverpartiklar nära komponentytan kommer att sintras fast mot ytan på grund av den höga temperaturen när komponenten smälts. De partiklar som fastnat på ytan under tillverkningen kan, om behov finns, tas bort under efterbearbetningen.

EBM använder sig utav en elektronstråle för att smälta metallpulvret, till skillnad från DMLS som använder sig utav en laserstråle. Alla metoder behöver stödstrukturer, men i vissa fall behöver EBM inte lika mycket på grund av att bädden förvärms med en elektronstråle. När detta görs så sintrar det ihop pulverbädden som ger ett visst stöd åt komponenten. Denna förvärmning görs för att öka ledningsförmågan och för att minimera risken att pulverpartiklar flyger iväg. Det minskar även de termiska spänningarna. Nackdelen blir dock då att komponenten får mer fastsintrat material på sig som behövs tas bort i efterhand. För att det fastsintrade materialet inte ska fästas för bra måste processen EBM använda sig utav ett lite grövre pulver som ligger på 50-100 μm. Vid användning av metoden DMLS förvärms istället byggplattan till 80°C för att minska termiska spänningar i komponenten och stödstrukturen. För att minimera oxidation används skyddsgas, argon är den vanligaste gasen för DMLS men beroende på material kan även kväve användas. Både EBM och DMLS används för att tillverka produkter med AM som kräver hög standard

så som delar till flygplan eller produkter som ska användas inom sjukvården, till exempel implantat. Dessa branscher är intresserade av tekniken eftersom det ger stor designfrihet och är väldigt användbart vid enstyckstillverkning.

Fördelar med pulverbäddstekniken är att det inte är speciellt dyrt jämfört med andra tillverkningsmetoder om korrigeringar behövs göras i produkten eftersom endast en ny CAD-modell behövs läggas in i maskinen istället för att ändra om tillverkningsprocessen. Det finns även väldigt många material som kan användas genom denna metod.

Nackdelar är att processen är långsam. Det finns även stora begränsningar för hur stora produkter som kan tillverkas genom AM med pulverbäddsteknik. Energiförbrukningen är hög och ytfinheten är svår att få bra om inte kornen på pulvret är väldigt finkornigt [9].

2.1.2 Återanvändning av metallpulver

Eftersom materialåtgång är en stor fördel med AM men pulverbäddstekniken endast utnyttjar ett par procent av fördelat pulver bör återanvändning vara möjlig för att motivera användning av tekniken. Två studier som har gjorts på pulver av rostfritt stål visar att tillverkning med återanvänt pulver inte påverkar slutprodukten nämnvärt, den ena studien av Honeywell Federal Manufacturing and Technology [10] och den andra av National Institute of Standard and Technology [11]. Återanvändningen gjordes genom att skikta det använda pulvret och skilja ut det som var större än 80 μm. Honeywell-studien återanvände pulver 12 gånger och NIST-studien 11 gånger. Mekaniska egenskaper hos den 3D-printade produkten, bland annat sträckgräns, testas och det går inte att se en nämnvärd förändring. Ytfinheten förändras inte signifikant i någon av studierna. Den studie som utförs av Honeywell noterar att tillverkningsprocessen har större inverkan på ytfinheten, i deras fall stillestånd i maskinen och övervakning av gasflöde. Den studie som utförs av NIST visar att flöde och densitet av pulvret ökar med antalet gånger som det återanvänds. NIST-studien noterar också att mikrostrukturen förändrads för varje återanvändning.

2.2 Material

I detta projekt tillverkas, som tidigare nämnts, en axel i metall. Nedan presenteras därför olika metallegeringar som är vanligt förekommande inom AM och kan vara alternativ till material för projektets axel. Alla dessa legeringar kan tillverkas med metoderna DMLS och EBM, förutom aluminiumlegeringar som inte kan tillverkas med metoden EBM. Problemet som uppdagas är att elektronstrålen inte bryter igenom aluminiumoxiden, men om en metod med laserstråle används så fungerar det bra. För att även få en inblick i alternativ till metaller har även tre andra material studerats, då tänkt som material med futuristiska möjligheter.

2.2.1 Metallegeringar

Stainless Steel
Rostfritt stål är en järnlegering. Rostfritt stål kan tillverkas med teknikerna Direct Metal Laser Sintering, DMLS, och Selective Laser Melting, SLM. Detta material är bra att använda till komponenter som behöver vara starka och som kräver fina detaljer. Materialet är väldigt resistent mot korrosion och för att få ökad styrka och hårdhet kan det rostfria stålet värmebehandlas. Nackdelarna med materialet är att det är dyrt och kan endast göras med en begränsad byggstorlek. Exempel på produkter som brukar AM i rostfritt stål är bultar, kedjor, bilar och inom medicinsk applikation [12]. Det finns många olika sorters rostfria stål med olika ihopsättningar av olika halter krom men ett vanligt rostfritt stål inom AM är 316L. Andra rostfria stål som även används mycket är 17-4PH, varmbearbetat och maråldrat stål [13]

Kobolt-Krom
Kobolt-krom används vid tekniken Selective Laser Sintering, SLS och används mycket inom rymdteknik, bilracing och medicinteknik som implantat eller tandproteser [14]. Materialet har en hög Elasticitetsmodul och är därför motståndskraftig mot deformationer. Materialet tål höga temperaturer och är motståndskraftigt mot korrosion. Kobolt-krom används ofta i medicinska tillämpningar eftersom materialet har de egenskaper som behövs för ett långvarigt användande. [13].

Titanium-legeringar
Titanium-legeringar används mycket vid tillverkning av olika blad, skivor och nav, men även inom medicinsk tillämpning och även olika motordelar så som växellådor. Ett exmepel på en legering som ofta används är Ti6Al4V. Materialet har låg densitet, är motståndskraftig mot korrosion och har hög hållfasthet. På grund av dess höga motståndskraft mot korrosion kan materialet användas i extrema miljöer, så som på oljeplatformar [13].

Nickelbaserade legeringar
En nickellegering som används mycket inom AM är Inconel-718 som mestadels består av järn, krom, nickel och koppar. Legeringen tål höga temperaturer och används bland annat till gasturbinblad, turbomotorer, motoraxlar, raketmotorer, rymdfarkoster och kärnreaktorer. Inconel är ett material som klarar av extrema miljöer och högt tryck. Legeringen är väldigt beständigt mot korrosion och har hög hållfasthet. Metallegeringen fortsätter att vara lika hård en lång tid fram i tiden och åldras väldigt långsamt. [15].

Aluminiumlegeringar
Aluminiumlegeringar brukar användas mycket i flygindustrin, bilindustrin och vid medicinsk tillämpning. Legeringarna står emot utmattning och är beständiga mot korrosion. Aluminiumlegeringar med låg densitet så som AlSi10Mg och AlSi12 har hög hårdhet för att motstå höga laster. Det har på senare tid uppdagats att även ännu starkare aluminiumlegeringar så som 6061-och 7075-serierna kan användas vid 3D-printing [13].

2.2.2 Material för framtiden

Ett intressant material är Windform, som antingen kan vara ett kolfiberförstärkt material eller ett glasfiberförstärkt material som har bra mekaniska egenskaper. Materialet passar bra inom AM av motorsport och flygplan. Materialet klarar även av höga temperaturer [16].

Borkarbid är en metallkomposit mellan kol och bor, där bor är en halvmetall. Borkarbid är det tredje hårdaste materialet som finns i nuläget. Det används till skyddsvästar, skärverktyg och slipverktyg. Materialet tål temperaturer upp till cirka 2000 grader [17]. Vidare har borkarbid använts för att förstärka aluminium, som i sin tur har låg densitet vilket ger viktfördelar.

Aluminium-grafit är en metallkomposit som har väldigt låg densitet och används ofta i elektriska moduler på grund av dess goda värmeledningsförmåga. Aluminiumlegeringar står mot korrosion väldigt bra. [18].

2.3 Tillverkningsprocessen

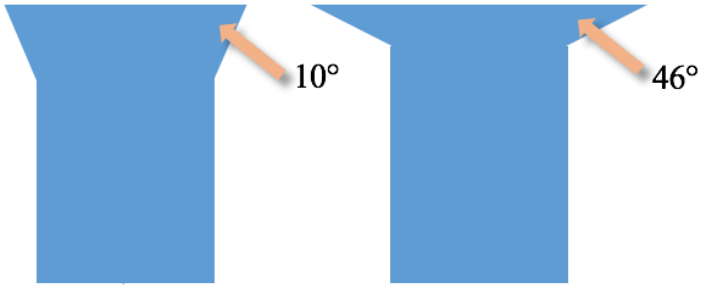
Arbetsgången vid AM kan delas in i fyra huvudområden: 3D-modellering, databehandling, printning och efterbehandling. Det första steget är att skapa en 3D-CAD modell av den tilltänkta komponenten. Redan här är det viktigt att identifiera de ytor som behöver omfattande efterbearbetning då det behöver adderas extra material till CAD-modellen, så kallad arbetsmån. Sedan krävs det vidare databehandling för att justera detaljer och förbereda CAD-modellen för tillverkning. Val av byggriktning som passar komponenten görs; vertikalt, horisontellt eller diagonalt. Är valet att printa komponenten vertikalt finns det en begränsning på bygghöjd och därför kan komponenten behöva orienteras i en annan riktning. Vid tillverkning kan komponenten bli krökt på det sätt att den inte uppfyller önskade toleranser. För att undvika det kan tillverkningen simuleras med hjälp av datorprogram. Syftet är att undvika ett tids- och kostnadskonsumerande arbetssätt där tillverkning måste testas flera gånger. Resultatet av simuleringen visar sedan hur mycket den avviker från den ursprungliga CAD-modellen, se figur 2.4. På så vis kan det, med hjälp av inversen till resultatet, skapas en inverterad CAD-modell som är böjd åt andra hållet. Med det här som hjälpmedel kan ett resultat efter printningen fås fram som då ligger inom en förväntad medelytavvikelse på $0,1mm$ [19].



Figur 2.4: CAD-modell - Resultat av simuleringen - Inversen

Vinklar större än 45° närmar sig det horisontella planet och det krävs stödstrukturer för att kunna bygga då föregående lager inte ger tillräckligt stöd för det nya lagret, se figur 2.5. Överhäng utan stödstrukturer är benägna att krusa sig, separeras och ge

efter för gravitationen. Stödstrukturer medför att större vinklar är möjliga att bygga men bidrar också till längre byggtid, mer materialåtgång och efterbearbetning [1].



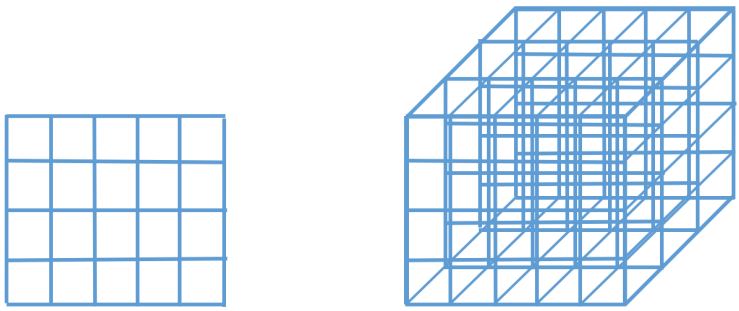
Figur 2.5: Överhäng

Vid användning av pulverbädd krävs det också att hål modelleras i ytan för komponenter med hålrum så att kvarvarande pulver som inte har smält under tillverkningen kan avlägsnas efteråt. Det tredje steget i tillverkningsprocessen är själva printningen. Maskinen måste förberedas i form av att byggplattan sätts in, justeras och förvärms. Maskinen fylls med tillräcklig pulvermängd och startas.

Efterbearbetningen är sista steget och skiljer sig åt utefter vilken AM-teknik som använts och om tillverkningen har skett med stödstrukturer så avlägsnas de här. Pulver som inte är smält dammsugs upp och borstas av från den byggda komponenten. Värmebehandling av komponenten sker för att avlägsna restspänningar. Vid höga hållfasthetskrav kan komponenten trycksättas i kombination med hög temperatur för att bli av med porer i materialet. Den ytfinhet och noggranhet på mått som AM-processen klarar av att producera kan för vissa komponenter inte vara tillräckligt bra. Om komponentkraven inte uppfylls krävs ytterligare bearbetning, till exempel svarvning, fräsning och slipning.

2.4 Gitterstruktur

En gitterstruktur är en sammansättning av periodiska enhetsceller både tvådimensionellt och tredimensionellt. Utformningen av enhetscellerna kan skilja sig åt och ett exempel illustreras i figur 2.6.



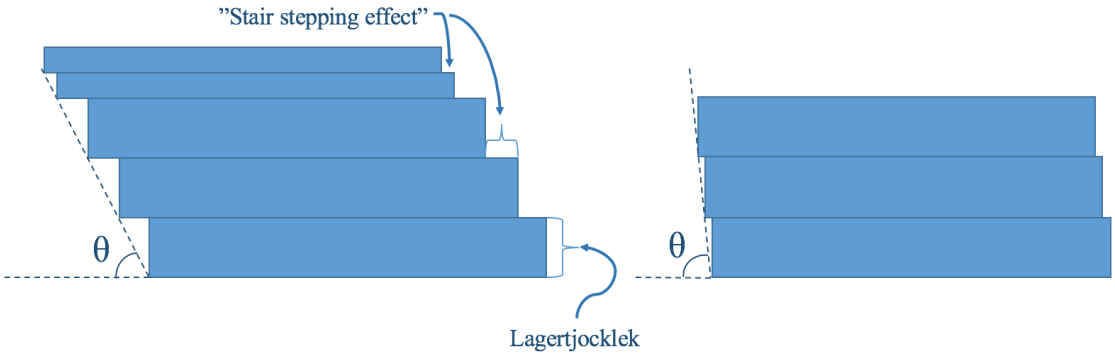
Figur 2.6: Gitterstruktur i 2D och 3D

Gitterstrukurer har flera fördelaktiga egenskaper vilket gör att dessa bland annat kan appliceras på lättviktslösningar, på grund av dess höga specifika styvhet och styrka. De kan även fungera som energiabsorberare på grund av dess förmåga att utstå stor deformation vid relativt låg belastning [20]. Gitterstrukturer har tidigare framställts med hjälp av tillverkningsmetoder så som gjutning och plastisk formning vilka kräver komplicerade anordningar, exakt processkontroll och ytterligare montering för att skapa de önskade strukturerna [21]. Dessutom är utformningen väldigt begränsad av dessa processer i motsats till AM där utformningen av gitterstrukturer är flexibel. Dock måste designen av strukturen ta hänsyn till tillverkningsbarheten vilken påverkas av vald AM-metod, pulverstorlek, laserpunktsdiameter, lasereffekt och laserskanningshastighet. Gällande tillverkningsbarheten krävs det även att hänsyn tas till orienteringen då strukturen måste stödja sig själv då det i princip är omöjligt att ta bort stödstrukturer inuti gitterstrukturer [22]. Gitterstrukturens mekaniska beteende beror på material, enhetscellens geometri, fördelning av material över strukturen och porositeten. Optimering av gitterstrukturer innebär ökad relativ densitet hos enhetscellerna. När gittret blir kraftigare ökar böjningsmotståndet och spänningarna som krävs för att kollapsa gitteret är av en större storlek. En slankare utformning är mycket styvare i sträcktillstånd än i böjmotstånd [23]. Ytterligare en faktor som måste tas hänsyn till är hur strukturer påverkar möjligheten att tömma metallpulvret.

2.5 Ytfinhet

I nuläget är det möjligt att med AM uppnå liknande eller bättre sträck- och brottgränser jämfört med traditionella bearbetningsmetoder [24]. En stor utmaning som AM står inför är att ytjämnheten inte uppnår samma resultat jämfört med till exempel subtraktiva metoder [25]. Ytjämnhet är ett mått på en ytas geometriska avvikelse från den ideala formen. Medelavvikelsen anges som ytjämnhetsparametern R_a och har enheten mikrometer (μm). Ytjämnhet är intressant ur ett AM-perspektiv liksom all tillverkningsteknik då ytan på tillverkad komponent ska interagera med sin omgivning. Det är en viktig variabel då grova ytor ökar friktion, förslitning och risken för korrosion. En orsak till ytojämnheter vid AM är ”Stair stepping effect” som är en följd av lager på lager processen vid AM. Ju mindre byggvinkel θ desto större ”stair stepping effect”, se figur 2.7. Tunnare lagertjocklek medför mindre ”stair step-

ping effect", vilket illustreras till vänster i figur 2.7. Byggvinkeln och lagertjockleken påverkar således ytans kvalitet [6]. Lagertjockleken har ett direkt samband med bygghastigheten vilket medför att finare ytor kräver större tidsåtgång. Ytterligare en parameter som påverkar ytan är pulverstorleken.



Figur 2.7: Illustration av "stair stepping effect"

I projektet är ytjämnheten helt avgörande då yttre ytor har ytjämhetskrav då de är funktionella ytor, lagerlägen eller passningsytor för specifik toleransgrad. Enligt Svenska institutet för standarder kräver lagerlägen på axlar ett Ra-värde på 0,4-0,8 μm vilket kan uppnås med både finsvarvning och slipning [26]. Beroende på vilken AM-teknik som används så uppnås olika ytfinhet, se tabell 2.1. De stora spannen hos AM-teknikerna beror på att ytjämnheten hos en yta tillverkad med AM beror på flera parametrar, bygghastighet, byggvinkel och pulverstorlek. Metoden som används i det här projektet (LPBF) kan ge en ytfinhet på 7-20 μm. Om ytfinheten inte håller sig inom de intervall som krävs enligt komponentens specifikation måste ytterligare bearbetning av funktionsytor ske.

Tabell 2.1: Yfinhet med olika metoder

Metod	Ytfinhet
EBM	7-20 μm [27]
LPBF	7-20 μm [27]
DED pulver	4-10 μm [27]
DED tråd	5-15 μm [27]
Binder Jetting	6 μm [28]
Sandgjutning	12,5-25 μm [26]
Formgjutning	1,6-3,6 μm [26]
Fräsning	0,8-6,3 μm [26]
Svarvning	0,4-12,5 μm [26]
Slipning	0,1-1,6 μm [26]

2.6 Form- och lägestoleranser

Form- och lägestoleranser är ett avancerat sätt att definiera formen och läget hos ett element och hur mycket det tillåts att variera. Standarden som definierar hur det här

ska tolkas är SS-EN ISO 1101:2017 [29]. För maskinkomponenter som ska rotera och interagera med andra delar är kasttolerans och koaxialitetstolerans viktiga begrepp. Kortfattat och förenklat är definionen av kast hur mycket en yta tillåts avvika när komponenten roteras kring en referenscentrumlinje. Kast mäts enklast med hjälp av mätklocka. Koaxialitet handlar om att en cylinders centrumlinje ska sammanfalla med referenslinjen inom ett toleransområde i form av en cylinder [30].

3
Metod

Kapitlet beskriver de olika metoder som användes vid genomförandet av projektet. Inledningsvis gjordes en finit element analys på den ursprungliga axeln. Efter det gjordes en topologioptimering och utifrån den genomfördes omdesign och ytterligare optimering. Till grund för ett materialval användes CES och sedan simulerades tillverkningsprocessen.

3.1 CAD

En förenkling 3D-modellerades i programvaran CatiaV5 av den CAD-modell som CEVT tillhandahöll. Förenklingen ledde till att elementnätet i ANSYS blev mindre komplext och kuggflankarnas geometri kunde försummas då lasterna applicerades. Den förenklade CAD-modellen gjordes genom att ta måtten på den modell som CEVT tillhandahållit och endast ha cylindrinsk form utan radieövergångar och oljekanaler. Den förenklade axeln med elementnät kan ses i figur 3.2 och kan jämföras med den ordinarie axeln i figur 1.1.

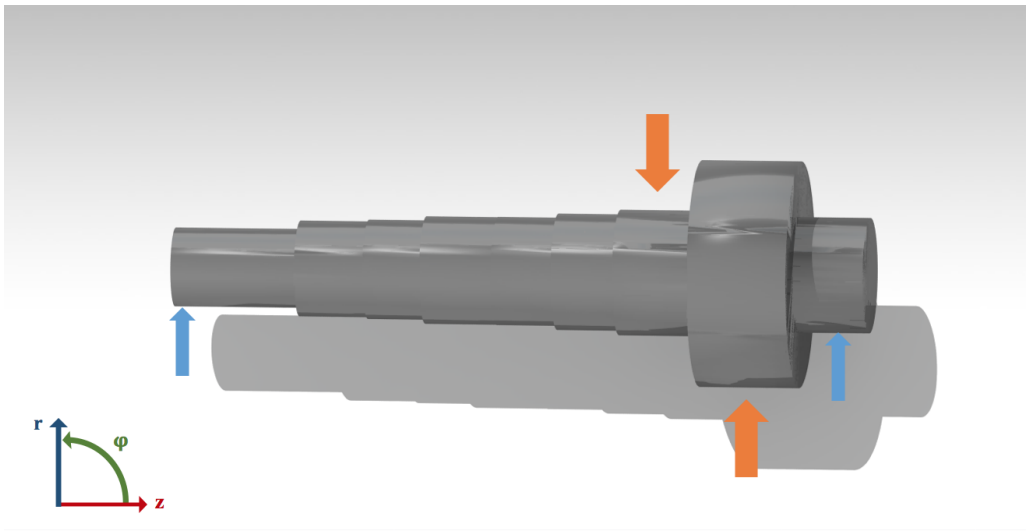
3.2 FE-analys

En finit element analys (FEA) gjordes för att se hur de yttre krafterna påverkade komponenten. Analysen utfördes i ANSYS, en programvara som simulerar fysiken bakom hållfasthet med hjälp av finita element metoden. Analysen låg till grund för topologioptimeringen som beskrivs i kapitel 3.3. Av CEVT tillhandahölls det lastfall som simulerades, vilket var när växel 2 brukas då detta anses som den dimensionerande växeln. Positionen för växel 2 illustreras i figur 3.1 som den vänstra orange pilen. Den högra orange pilen pekar på slutväxeln. Växlarna ger upphov till axiella, tangentiella och radiella krafter. Storleken på dessa krafter redovisas i Tabell 3.1. Materialet som användes vid beräkningarna var konstruktionsstål med parametrar som beskrivs i kapitel 1.3.

Tabell 3.1: Krafter som påverkar axeln

	Axiell (z)	Tangentiell (φ)	Radiell (r)
Växel 2	7249 N	13925 N	5100 N
Slutväxel	14587 N	24764 N	9062 N

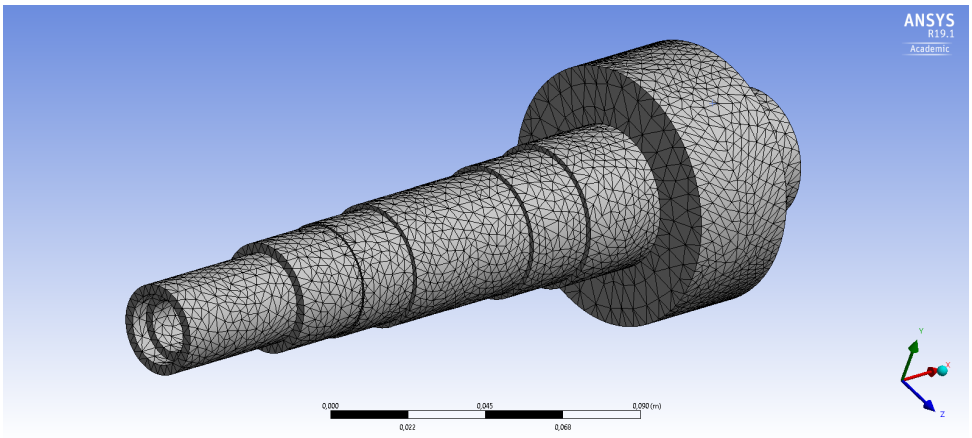
Randvillkoren som gäller är att axeln ligger fritt upplagd i lagerpositionerna. Figur 3.1 visar var randvillkor och laster lagts på i ANSYS.



Figur 3.1: Illustration över lagrens (blå) och de aktiva växlarnas (orange) positioner

3.3 Optimering

För att material skulle utnyttjas på bästa sätt gjordes en topologioptimering (TO) med hjälp av ANSYS. Topologioptimering är en metod som optimerar materialanvändningen och placerar ut material där behov finns inom ett givet område med bestämda laster och randvillkor. Denna sortens optimering gjordes utifrån givna designbegränsningar och med given målvikt. Designbegränsningen sattes på den yttre geometrin där kuggar och lager låg an och programmet begränsades således från att ta bort material därifrån. Det gjordes tre TO-simuleringar där målvikten var 25%, 50% respektive 75% av den ordinarie vikten. En elementstorlek på $3mm$ användes och elementnätet kan ses i fiugr 3.2. Programvaran tog bort hela element vilket gjorde att TO-modellen inte gick att användas direkt men låg till grund för omdesign.



Figur 3.2: Elementnät med elementstorlek 3 mm

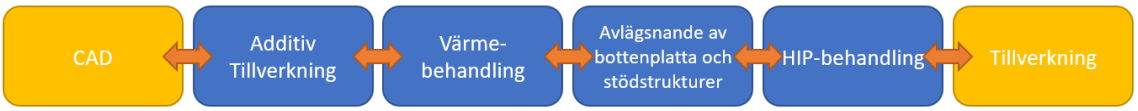
Utifrån TO bestämdes väggtjockleken längs axeln och med hjälp av Materialise Magics designades tvärsnittet om. Programvaran är utvecklad för AM och där det är möjligt att redigera design och förbereda byggplattformen för tillverkning. Olika gitterstrukturer applicerades i programmet för att hitta den som utifrån komponentens orientering och byggvinkel är byggbar.

3.4 CES

Material som kan användas vid AM hämtades ur en materialdatabas för AM-material som EOS tillhandahöll [31]. EOS är ett företag som utvecklar maskiner för AM inom pulverbäddsteknik. Från dessa material valdes sex stycken ut som passar bra till just det som skulle tillverkas i detta projekt men som samtidigt har lite varierande egenskaper. Information om materialen noterades och användes sedan i materialvalsprogrammet CES [32] för att se de olika egenskaperna viktade mot varandra i en logaritmisk skala. Tre olika bubbeldiagram gjordes, där den första gjordes med elasticitetsmodulen på x-axeln och hårdheten på y-axeln eftersom axeln transporterar olja och en tunn vägg som punkteras skulle innebära att oljetrycket sjunker och smörjning till lagren blir sämre. Den andra gjordes med elasticitetsmodulen på x-axeln och sträckgränsen på y-axeln. I det tredje diagrammet är densiteten jämförd med elasticitetsmodulen detta för att se vilket material som är optimalt utifrån ett viktminskningsperspektiv. En axel i en växellåda får inte deformeras plastiskt eftersom den då skulle arbeta med högre friktion och slitage som följd. Vidare har axeln snäv passform mot andra komponenter och det finns då en risk att dessa skadas vid plastisk deformation. På grund av detta så valdes en jämförelse av elasticitetsmodulen mot brottgränsen bort. De specifikt valda materialen från EOS jämfördes med alla metaller och legeringar som fanns tillgängliga i programmet för att se hur de stod sig mot material som vanligtvis inte används inom AM.

3.5 Simulering

En del av tillverkningsprocessen för AM simulerades i Simufact Additive. De delar i processkedjan som programmet simulerade var de blåmarkerade i figur 3.3.



Figur 3.3: Blåa rutorna visar processkedjan som simuleras i Simufact Additive

De fyra stegen innefattar: skapande av en inverterad 3D-modell anpassad för AM, värmebehandling som utfördes för att bli av med restspänningarna, avlägsnande av bottenplatta och stödstrukturer samt HIP-behandling (värmebehandling under tryck) för att bli av med porösiteten hos komponenten. De gulmarkerade var processerna innan och efter Simufact användes, det vill säga CAD och tillverkningen. Anledningen till att de ligger med i bilden beror på att processkedjan var en itererande process som ibland innebär att till exempel CAD behövdes göras om. Resultatet som sedan levererades av programvaran var komponentens distortion efter alla fyra stegen hade utförts.

Anledningen till att ett behov av simulering fanns i samband med AM-tillverkning berodde främst på viljan att säkerställa kvalité hos komponenten, höga materialkostnader och maskinkostnader.

Problemet vid simulering av gitterstrukturer var att den elementstorlek som krävdes var för liten för Simufact att hantera. Därför utfördes två enskilda simuleringar. Den första utfördes på orginalaxeln, se figur 1.1. Den andra på exakt samma axel med modifieringen att det genomgående hålet igenfylldes så att axeln blev solid. Anledningen till att de här två fallen simulerades var att de kan ses som extremfall och därför kommer det verkliga resultatet med gitterstruktur antas ligga någonstans mitt i mellan.

Simuleringen utfördes sedan för maskinen EOS M 290 med det rostfria stålet 316L samt voxelstorleken 2,5mm. Stödstrukturer genererades på varje ställe där överhänget var större än 45° för att komponenten skulle vara byggbar med AM-teknik.

3.6 Prototyptillverkning

Mot slutet av projektet tillverkades en prototyp med tekniken DMLS i maskinen EOS M 290. Den gjordes för att se om det gick att verifiera resultaten som har framkommit teoretiskt och om prototypen mötte de initialt ställda förväntningarna. Vid tillverkningen användes rostfritt stål 316L på grund av praktiska skäl då det var det som fanns tillgängligt i maskinen. En lagertjocklek på 40 μm användes för

att tillverkningstiden inte skulle bli för lång. Enligt beredningsprogrammet var uppskattad tillverkningstid med vald lagertjocklek cirka 110 timmar. Axelns orientering på byggplattan var vertikal för att få så bra yta och geometri som möjligt.

3.7 Kontroll av prototypen

För att avgöra ifall AM är en lämplig tillverkninsteknik för den modifierade axeln utvärderades prototypen. Gitterstrukturen kontrollerades visuellt och ytfinheten uppskattades med hjälp av historisk data från andra detaljer som tillverkats med samma material och byggparametrar. Utefter den information som tillhandahölls om prototypens uppskattade ytfinhet och den information som inhämtats om vilken ytfinhet som krävs hos axelns funktionella ytor så bestämdes en lämplig arbetsgång.

4
Resultat

I det här kapitlet redovisas de resultat som legat till grund för beslut av omdesign, materialval samt efterbearbetning.

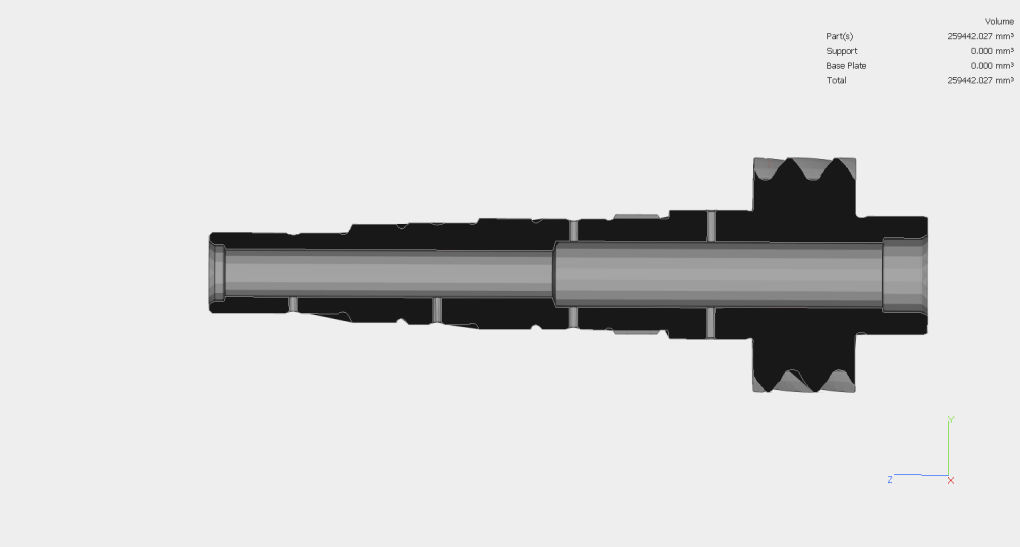
4.1 Analys av komponentens förutsättningar för AM

För att tillverka en axel med AM krävs kännedom om teknikens möjligheter och begränsningar. Vissa bearbetningssteg kan elimineras då den slutgiltiga formen med olika diametrar och radieövergångar kan göras direkt. En axel samverkar med andra komponenter, ofta kugghjul, remskivor eller drev, för att kunna överföra vridmoment. För att axeln inte ska ha för stora energiförluster i form av friktion är den ofta lagrad. Lagren har höga krav på passning och ytfinhet för att fungera tillfredsställande. Eftersom AM inte tillhandahåller tillräckligt bra mått och ytfinhet vid lagerlägen och kuggar, se tabell 2.1, krävs det efterbearbetning i form av svarvning och slipning. I de fall efterbearbetning krävs måste det adderas arbetsmån till 3D-modellen. Om det går att lösa problemen med ytfinhet och mått innebär det en möjlighet att ersätta monteringsmomentet av kuggarna med att istället 3D-printa dem direkt och därmed reducera antalet monteringsmoment vid tillverkning av produkter.

Ytterligare en anledning till behov av efterbearbetning är kompensation för deformationer. Då pulverlagret smälts sker ett snabbt stelningsförlopp, det leder till termiska spänningar som kan orsaka deformationer. Vidare kan orienteringen på komponenten i maskinen spela in på hur stora deformationerna blir. Liggande orientering vid 3D-printing av en lång smal axel innebär att lasern som smälter pulvret passerar långa sträckor och det finns en ökad risk för deformationer på grund av termiska spänningar. Det kan också vara svårt att få en rund geometri med liggande orientering på grund av den trappstegseffekt som tidigare beskrivits i kapitel 2.5. En fördel med liggande orientering, i fallet med en avlång axel, är att byggtiden blir kortare. Valet av orientering beror också till stor del på att maskinerna har begränsad tillverkningsvolym, det vill säga djup-, bredd- och höjdmått. Det kan också vara intressant att testa olika orienteringar då det kan möjliggöra att olika typer av komponenter tillverkas samtidigt, den enda likheten som krävs mellan detaljerna är att materialet är samma.

Den största fördelen med AM är den designfrihet som finns, men det finns trots allt

begränsningar. Den axel som studerats består delvis av ett kugghjul som till stor del är solid, vilket kan ses i figur 4.1. Det går att ta bort en mängd material i solida delar hos axeln, något som inte alltid är möjligt med konventionella bearbetningsmetoder, men det kan vara nödvändigt att införa stödstrukturer. Stödstrukturerna är nödvändiga eftersom det finns begränsningar för hur stora vinklar det överhängande materialet kan ha. Då komponenten är färdig måste stödstrukturerna avlägsnas, ett steg som läggs till i tillverkningsprocessen. Då inte allt pulver som fördelas ut smälts är det nödvändigt att hål placeras på axeln för att kunna tömma överflödigt metallpulver. Hålen måste placeras så de inte påverkar slutfunktionen på axeln. Om det finns snäva hörn eller liknande former invändigt kan det vara svårt att avlägsna allt pulver som inte förbrukats.

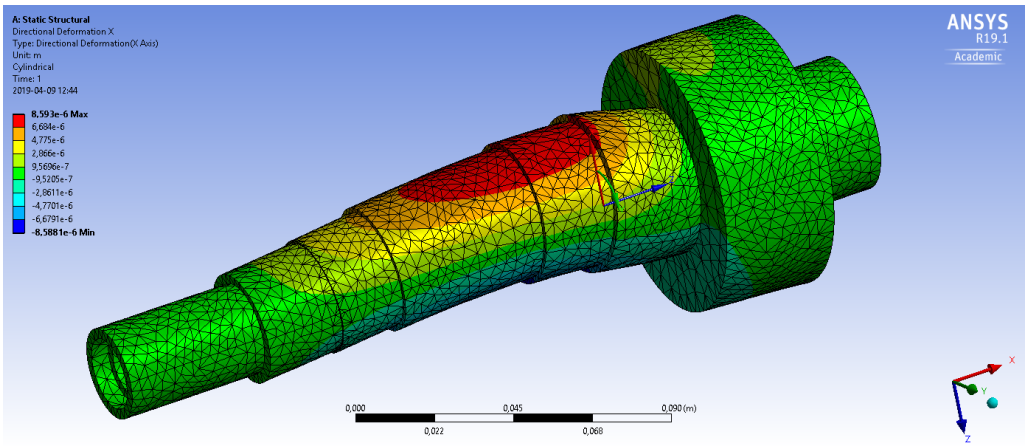


Figur 4.1: Tvärsnitt över den ursprungliga axeln

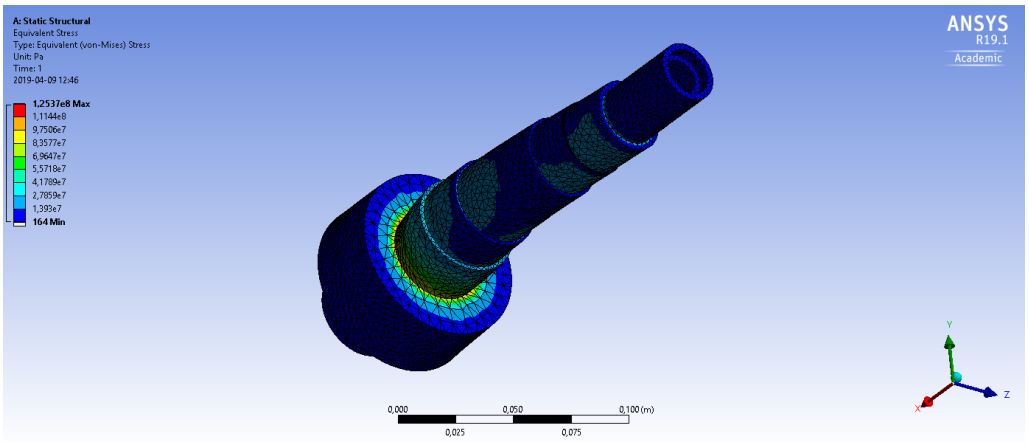
4.2 FEM-simulering

FEM-simuleringarna som görs utvärderar utböjning och von Mises-spänningar. Resultatet ligger till grund för den topologioptimering som görs. I figur 4.2 observeras att den största utböjningen i radiell led är ungefär 8,6 μm vilket är det röda fältet. Figur 4.3 visar att den största spänningskoncentrationen finns i övergången mellan axeln och det integrerade kugghjulet. Det kan bero på att den förenklade CAD-modell som använts inte har några radieövergångar som minskar späningskoncentrationen. Det område som har störst spänningskoncentriation, frånsett övergången, är detsamma som har störst utböjning. I det området, det ljusblå, ligger den maximala spänningskoncentrationen inom intervallet $30 - 40\ MPa$.

Resultatet från FEM-simuleringen tyder på att det finns större behov av material mitt på axeln, det område med störst spänning och utböjning, än i dess lagerlägen i axeländarna.



Figur 4.2: Utböjning i radiell led



Figur 4.3: Spänningskoncentration med von Mises-spänning

4.3 Topologioptimering

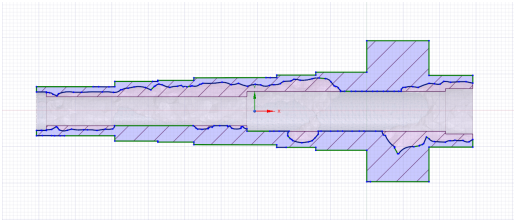
Topologioptimeringen utförs med tre olika mål, att behålla 75%, 50% och 25% av den ordinarie vikten och resultatet kan ses i tabell 4.1. Viktförändringen beror på att det material som är överflödigt utifrån resultatet i kapitel 4.2 avlägsnats. Det inre tvärsnittets förändring kan ses i figur 4.4 och förändringen hos det integrerade kugghjulet sett från den korta axeldelen kan ses i figur 4.5.

Tabell 4.1: Resultat av viktminskning från topologioptimering

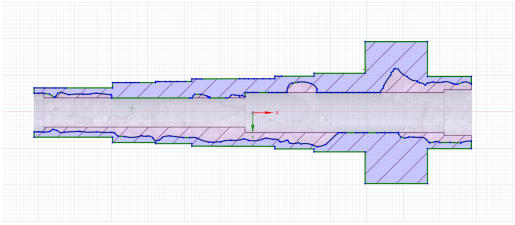
Målvikt av ordinarie vikt	Del av ordinarie vikt efter topologioptimering
75%	84.3%
50%	70.1%
25%	51.8%

Eftersom en axel är rotiationssymmetrisk borde även det material som kan avlägsnas också vara rotationssymmetriskt. Anledningen till att det inte blev så kan bero på

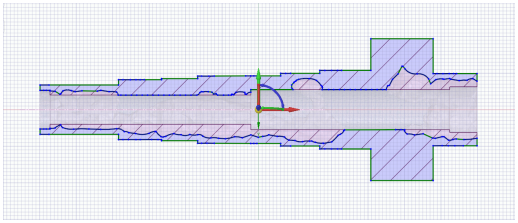
hur laster eller randvillkor har applicerats i ANSYS.



(a) Målvikt 75% av ordinarie vikt

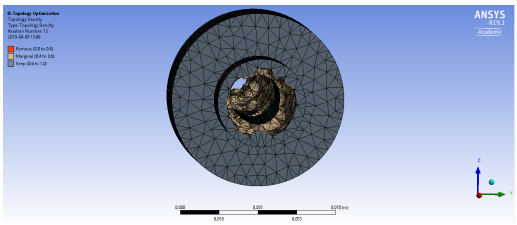


(b) Målvikt 50% av ordinarie vikt

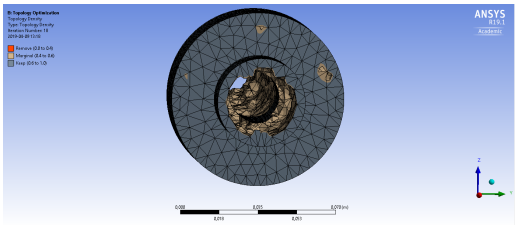


(c) Målvikt 25% av ordinarie vikt

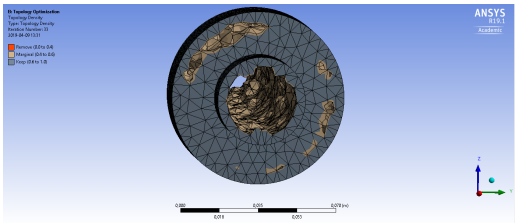
Figur 4.4: De rosa ytorna visar material som kan avlägsnas i det invändiga tvärsnittet



(a) Målvikt 75% av ordinarie vikt



(b) Målvikt 50% av ordinarie vikt

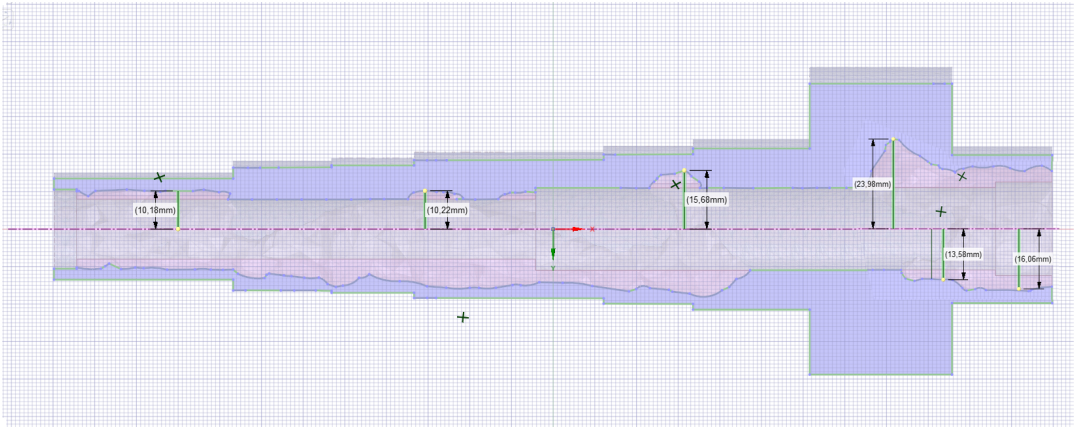


(c) Målvikt 25% av ordinarie vikt

Figur 4.5: Kugghjulets förändring efter topologioptimering

Då projektets uppgift har varit att undersöka möjligheterna med AM valdes den mest radikala förändringen, det fall som avlägsnat mest material från den ursprungliga detaljen. Figur 4.6 visar den nya innerradien för geometrin som uppstår efter topologioptimeringen med mål att behålla endast 25%, vilket är den modell som vidareutvecklats. Dock syns det enligt figur 4.4a, 4.4b och 4.4c att det inte skiljer sig särskilt mycket mellan dem olika fallen. Däremot skiljer det sig mer på utsidan av det integrerade kugghjulet, vilket kan ses i figur 4.5a, 4.5b och 4.5c. Eftersom axeln har som uppgift att transportera olja som ska smörja lagren ansågs det inte

rimligt att göra hål i det integrerade kugghjulet och därför försummades just den förändringen vid utveckling av topologioptimeringens resultat.



Figur 4.6: Överflödigt material invändigt för målvikt 25% av ordinarie vikt

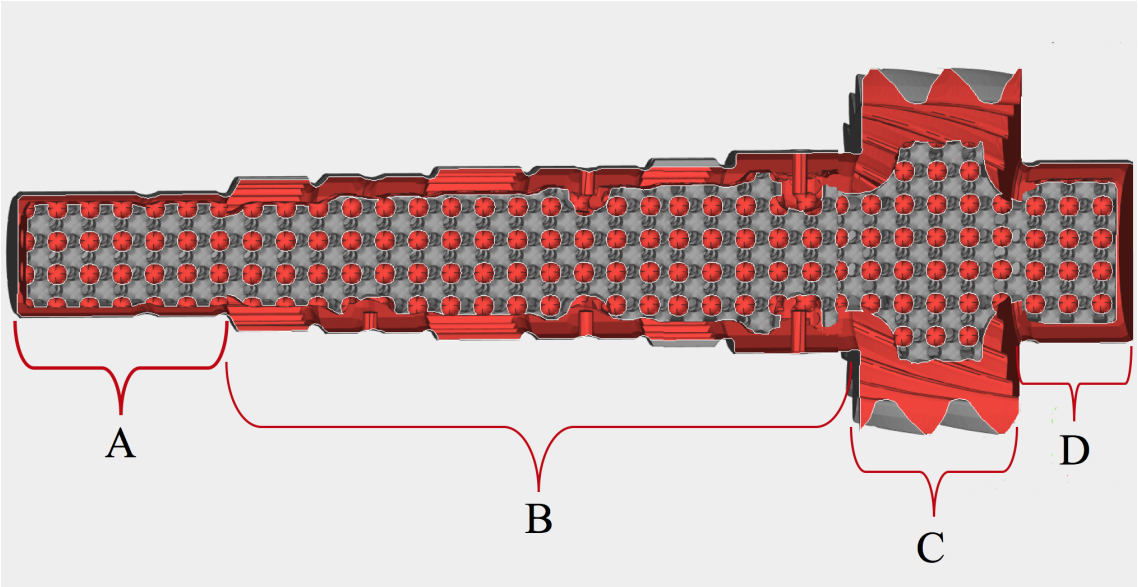
4.4 Omdesign

Vid optimering av axeln i Magics delas den upp i sektioner där väggtjockleken varierar längs axeln baserat på resultatet av topologioptimeringen. Den delas upp i fyra sektioner vilket illustreras i figur 4.7. Måtten på vald väggtjocklek för respektive sektion utläses från tabell 4.2. Det kan observeras att precis som i topologioptimeringen är väggarna tunnare i ändarna och tjockare i de mer belastade delarna vilket är där utböjning av axeln sker och i kuggen som överför moment till drivaxeln.

Tabell 4.2: Väggtjocklekens disponering över axeln

Sektion	Väggtjocklek
A	2 mm
B	4 mm
C	8 mm
D	3 mm

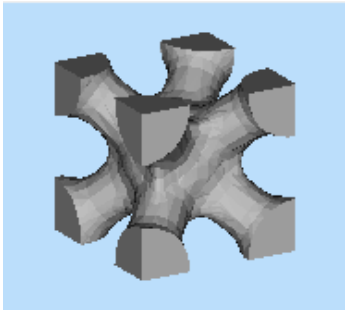
Enhetscellens geometri valdes till *Body diagonals with nodes rounded [MSG]* (se figur 4.9) utifrån vad som var tillverkningsbart då axelns orientering är vertikal vid tillverkning. I och med att axeln utsätts för böjning väljs en relativt kraftig gitterstruktur vars utformning kan studeras noggrannare i figur 4.8. Enligt teorin i kapitel 2.4 så kan gitterstruktur ersätta solitt material och uppnå bibehållen hållfasthet, därför görs väggarna tunnare över hela axeln trots att det enligt topologioptimeringen inte går att ta bort material symmetriskt överallt. Det ska påpekas att resultatet av topologioptimeringen utgår ifrån att endast ta bort material utan att stödstruktur appliceras. I detta fall tas material bort men stödstruktur läggs också till. Efter optimeringen blev den nya volymen 0,199 dm^3, en minskning med 0,061 dm^3 från den ursprungliga axeln, vilket motsvarar 23,5%.



Figur 4.7: Tvärsnitt av axeln indelad i sektioner



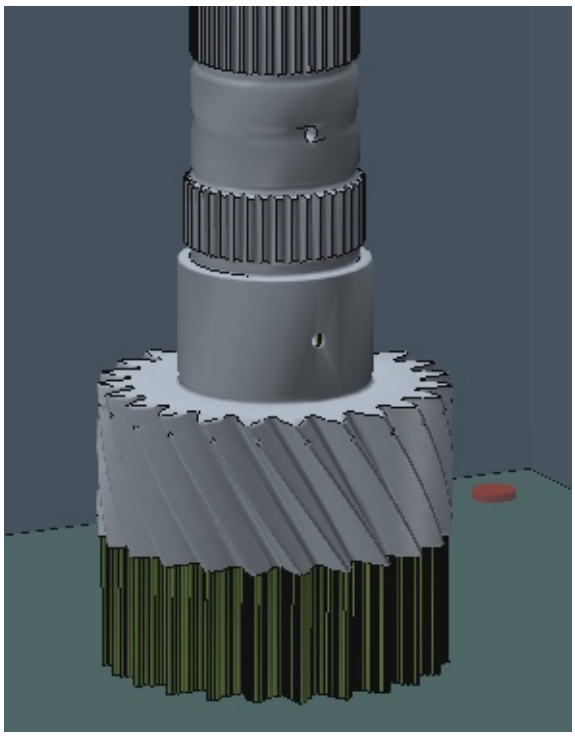
Figur 4.8: En närmare vy över gitterstrukturen och väggtjockleken i sektion A



Figur 4.9: Enhetcellens utformning

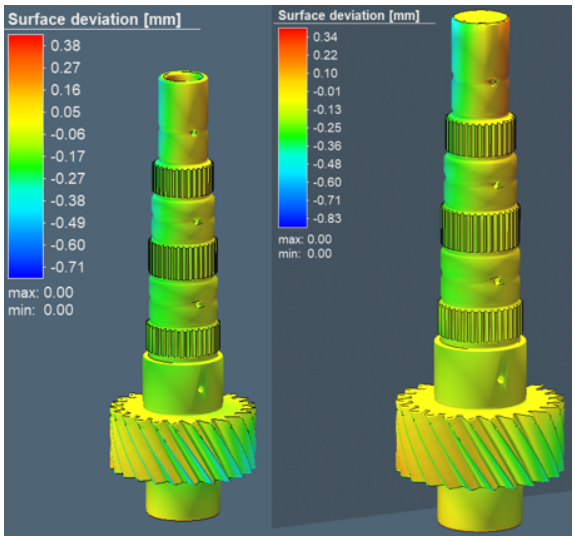
4.5 Simulering av prototyptillverkningen

Först genereras stödstrukturer vid de områden på axeln där överhäng är större än 45° när axeln placeras vinkelrät och resultatet av det presenteras i figur 4.10



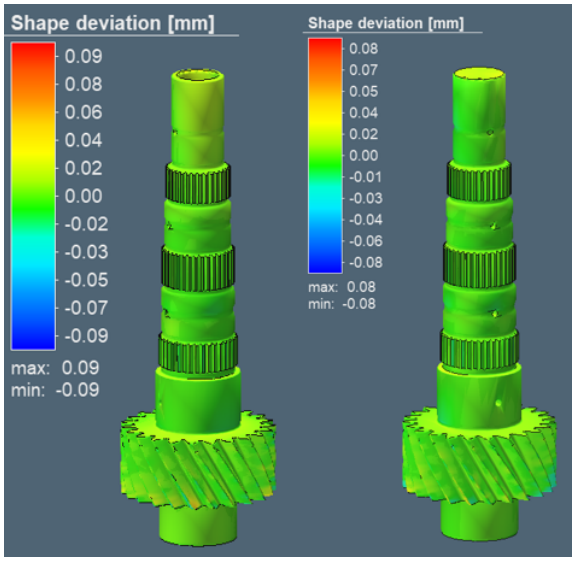
Figur 4.10: Stödstrukturen som användes i Simufact

Efter det utförs simuleringen av CAD-modellerna för de två fallen som ställs upp i avsnitt 3.5. Till vänster i figur 4.11 befinner sig extremfall 1 med ett genomgående hål och till höger extremfall 2 som är helt solid. Resultatet som illustreras i figur 4.11 ska avläsas utifrån färgskalan som mäts i ytavvikelse jämfört med CAD-modellernas ursprungsgeometri. Tolkningen är att resultatet av 3D-printningen är sned med ytelementförskjutningar upp till och med 0,83 mm som mest vid kuggarna, därför bör en inverterad CAD-modell skapas för att försöka kompensera förskjutningarna.



Figur 4.11: Resultatet av simulering för de två CAD-modellerna

Efter det skapas de två inverterade CAD-modellerna för båda simuleringsfallen i Simufact additive utifrån resultatet för figur 4.11. På de två nya CAD-modellerna utförs sedan exakt samma simulering och slutresultatet illustreras i figur 4.12. Resultatet mäts här i ytavvikelse utifrån en referensgeometri som är den ursprungliga CAD-modellen innan den inverterade modellen skapas, alltså det önskade slutresultatet. Den genomgående gröna färgen symboliserar att slutresultaten blir relativt raka där ytavvikelsen uppgår till 0,09mm. Det är ett resultat som ligger inom det enligt teorin i avsnitt 2.3 förväntade värdet på 0,1mm medelytavvikelse.



Figur 4.12: Resultatet av simulering för de två inverterade CAD-modellerna

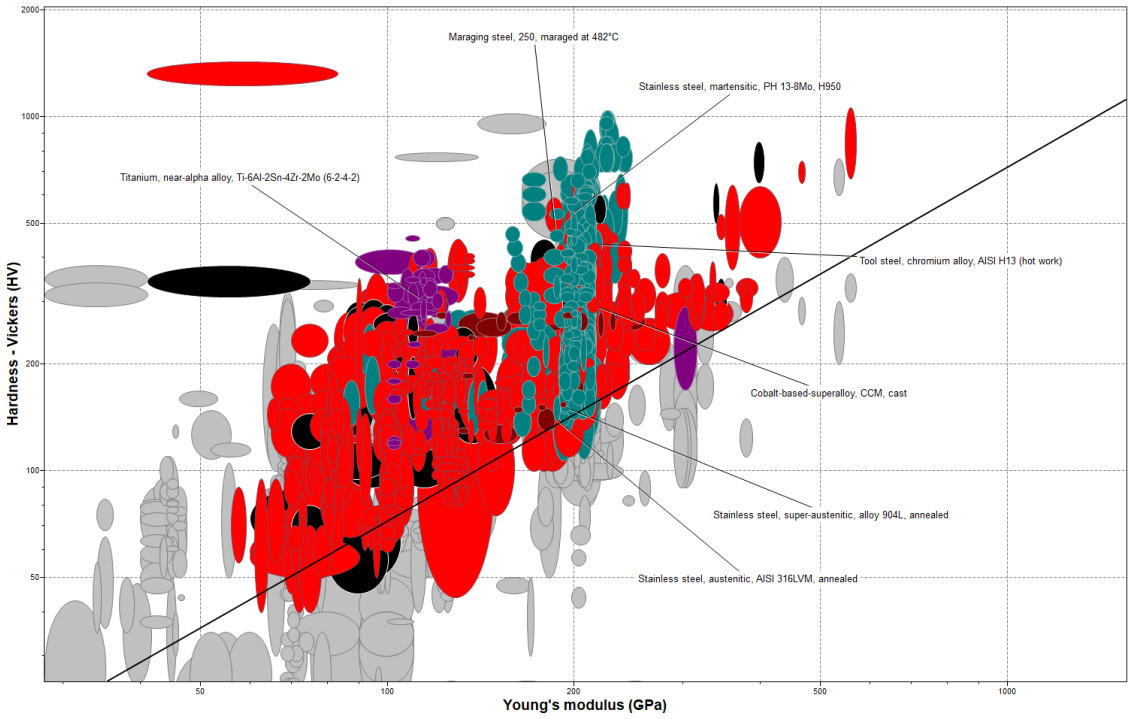
4.6 Materialval

För att göra ett materialval används EOS hemsida [31] till att studera de material som fungerar väl vid tillämpning av AM. Därifrån väljs sex olika material med egenskaper som passar bra vid tillverkning av en axel för att jämföras mot varandra i ett materialval. Resultatet sammanställs i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Materialegenskaper hos AM-material från EOS

	Densitet	Sträckgräns	Elasticitetsmodul	Hårdhet
Maråldrat stål MSI	8,05 kg/dm^3	1100 ± 100 MPa	150 ± 25 GPa	33 - 37 HRC
Rostfritt stål GP1	7,80 kg/dm^3	586 ± 50 MPa	140 ± GPa	230 ± 20 HV1
Rostfritt stål PH1	7,71 kg/dm^3	1025 ± 85 MPa	200 GPa	44 - 51 HRC
Rostfritt stål 316L	8,00 kg/dm^3	530 ± 60 MPa	185 GPa	89 HRB
Kobolt-krom MP1	8,30 kg/dm^3	1060 ± 100 MPa	200 ± 20 GPa	35 - 45 HRC
Titanium Ti6Al4V	4,41 kg/dm^3	1150 ± 80 MPa	108 ± 20 GPa	320 HV5

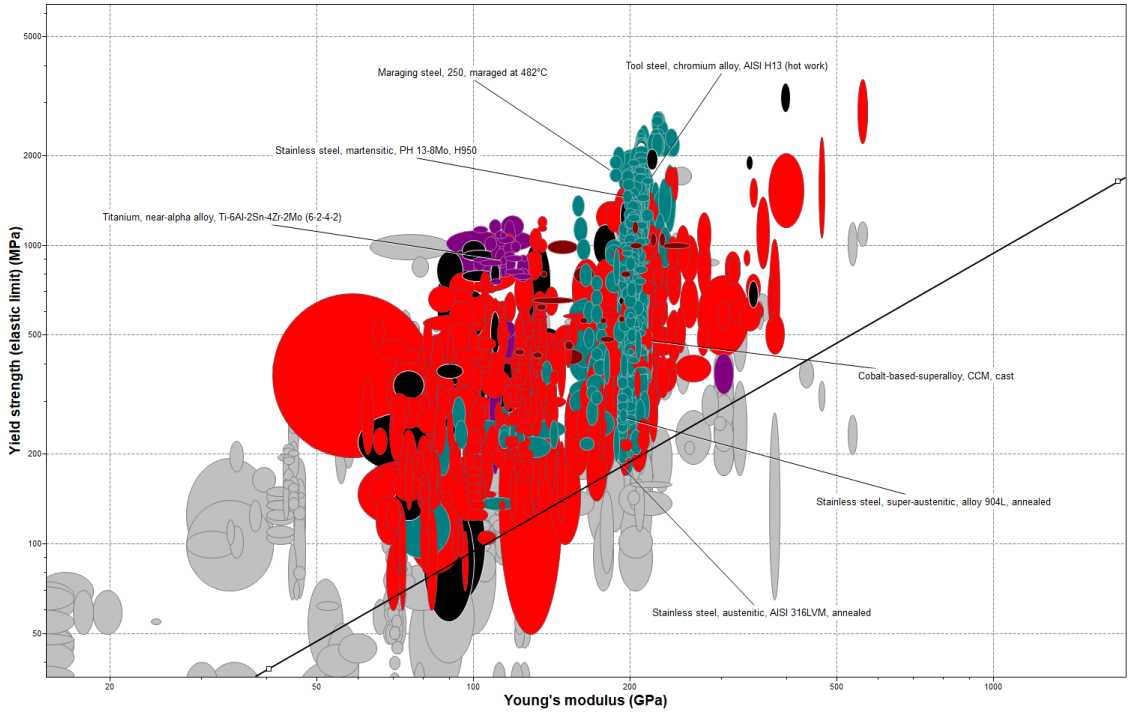
I diagrammen nedan presenteras alla metaller och metallegeringar ordnade utefter hårdhet, sträckgräns och densitet, alla relativt elasticitetsmodulen. Förutom materialen ovan är även verktygsstål utmarkerat eftersom det har liknande egenskaper som konstruktionsstål, vilket är materialet som används i dagsläget och agerar därför riktmärke för projektets materialval. Eftersom verktygsstål används i CES blir den fortsatta benämningen i rapporten verktygsstål när det syftas på det ursprungliga materialet hos axeln.



Figur 4.13: Elasticitetsmodulen mot hårdheten

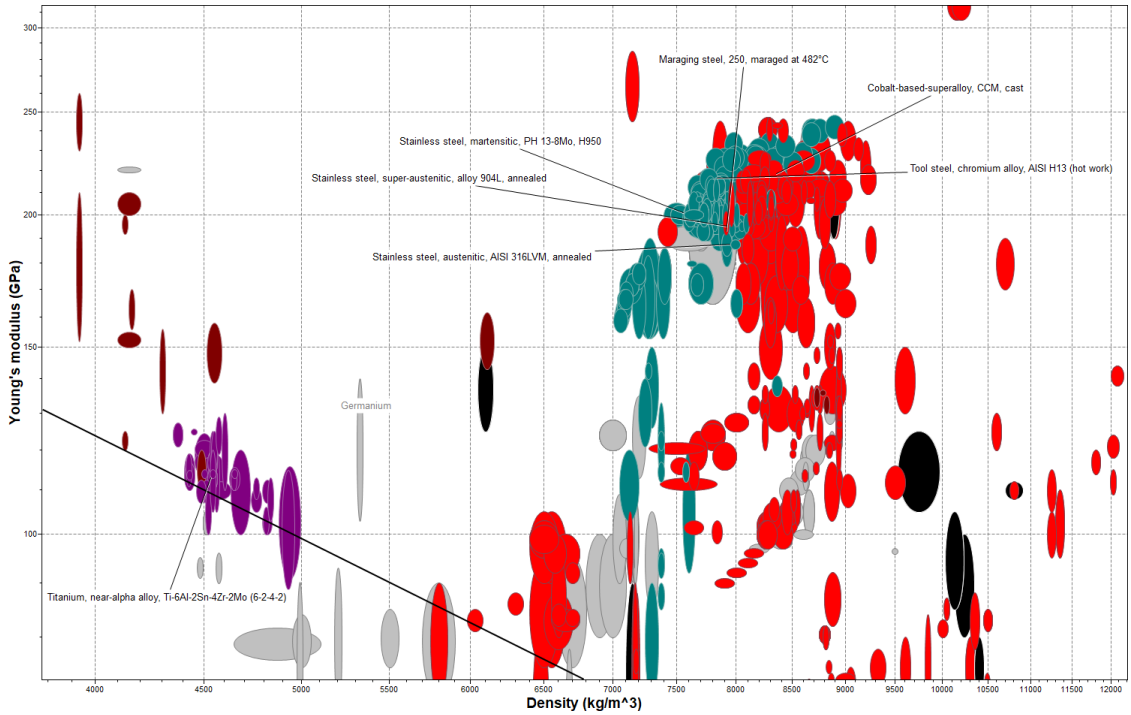
I figur 4.13 är elasticitetsmodulen på x-axeln och hårdheten på y-axeln. Desto högre

upp och desto mer till höger, desto bättre är materialet. I detta fall är verktygsstål (tool steel chromium alloy AISI H13 (hot work)) eller rostfritt stål PH1 (stainless steel, martensitic, PH 13-8Mo, H950) det bästa alternativet.



Figur 4.14: Elasticitetsmodulen mot sträckgränsen

I figur 4.14 är elasticitetsmodulen på x-axeln och sträckgränsen på y-axeln. Desto högre upp och desto mer till höger, desto bättre är materialet. I detta fall är det maråldrat stål MSI (maraging steel, 250 maraged at 482°C) eller verktygsstål (tool steel chromium alloy AISI H13 (hot work)) det bästa alternativet.



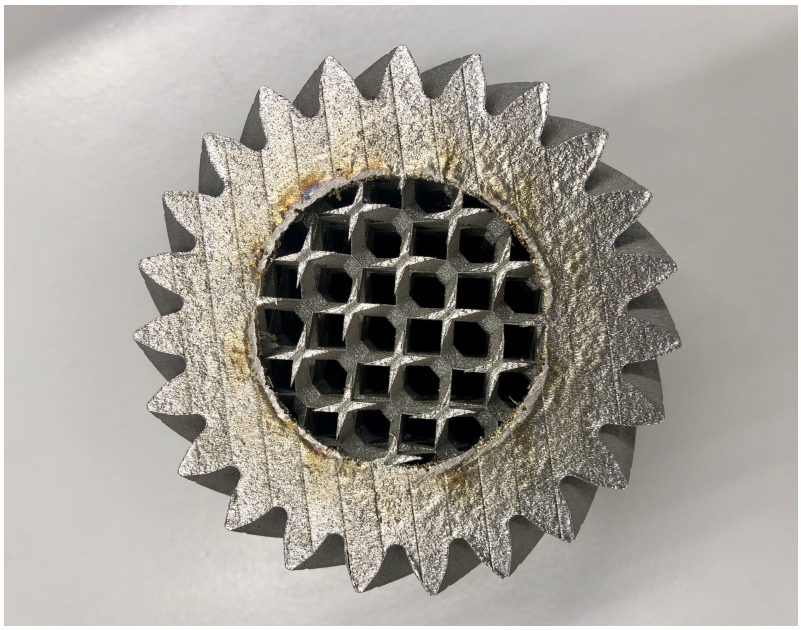
Figur 4.15: Densiteten mot elasticitetsmodulen

I figur 4.15 är densiteten på x-axeln och elasticitetsmodulen på y-axeln. Desto högre upp och ju mer till vänster, desto bättre är materialet. I detta fall är det verktygsstål (tool steel chromium alloy AISI H13) eller rostfritt stål PH1 (stainless steel, martensitic, PH 13-8Mo, H950) som är det bästa alternativet. I detta fall bortses det från titanlegeringen som avsevärt har lägst densitet men dock har materialet så mycket lägre elasticitetsmodul än alla de andra materialen.

Titanlegeringen har avsevärt lägre elasticitetsmodul än de andra och ligger runt $100GPa$, medan de andra materialen har en elascticitetsmodul runt $200GPa$. De andra materialens elasticitetsmodul, sträckgräns, hårdhet och densitet ligger i närheten av varandra vilket resulterar i att alla kan väljas. Dock är verktygsstål i nuläget inte valbart. Anledningen är att det inte finns för AM. Därför blir det slutgiltiga materialvalet rostfritt stål PH1. Det innebär att den slutliga vikten kan beräknas till 1,53 kg. Då blir den totala viktminskningen således 25,0%.

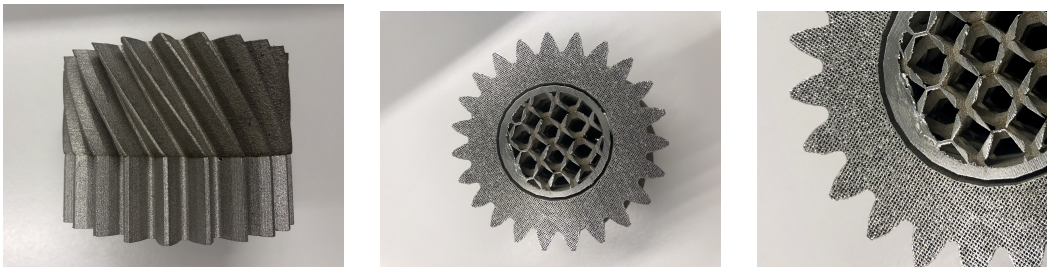
4.7 Resultat av tillverkad komponent

Vid tillverkning av prototypen stannar maskinen innan detaljen är färdig på grund av värmedeformationer, vilka kan ses i figur 4.16. Värmedeformationerna uppkommer eftersom det finns ett för stort överhäng och för lite material som leder bort värme. Stoppet sker efter en och en halv av fem dagar som beräknas för att slutföra detaljen.



Figur 4.16: Värmedeformationer syns i form av det brunbrända området längst in på planet

Stödstrukturen som finns på den del av axeln som tillverkas går inte att avlägsna på grund av att erfoderlig maskinutrustning saknas i verkstaden. I figur 4.17 syns den stödstrukur som adderas i beredningen. Figur 4.17c ger en tydlig bild av hur stödstrukturens ihåliga sturktur är uppbyggda. Den gitterstruktur som skapas i Magics är som förväntad och ställer inte till några problem vid tillverkningen. Figur 4.16 och 4.17b visar resultatet av att 3D-printa gitterstruktur.



(a) Sidovy av prototyp **(b)** Vy ovanifrån **(c)** Inzoomad vy av stödstruktur

Figur 4.17: Stödstruktur i form av raka kuggar

Komponenten förväntas ha R_a-värdet $10 - 15$ μm enligt mätningar som görs på detaljer med samma byggförutsättningar. Ytfinheten skiljer sig mellan kuggarnas ytor som är uppåt- och nedåtvända vid tillverkningen. Ytan som är riktad nedåt under tillverkningen har en grövre yta än den som är uppåtriktad då pulvret smälter bättre på ovansidan. Utan att ha mätt ytfinheten på prototypen kan det enkelt ses och kännas att ytorna inte är tillräckligt fina att agera lagerlägen och kontaktytor för kuggarna.

5
Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultaten av topologin, simuleringen och val av material. Diskussion kring krav av efterbearbetning samt analys av den 3D-printade prototypen sker.

5.1 Analys av valt material

Det materialet som anses vara bäst utav de som studeras är verktygsstål, vilket är det material som komponenten tillverkas med i dagsläget. Verktygsstål är ett material som i dagsläget inte går att använda inom AM. Ett material som endast har aningen sämre mekaniska egenskaper än verktygsstål och som även gruppens prototyp 3D-printas i är rostfritt stål 316L. Rostfritt stål 316L har samma sträckgräns som verktygsstål. Det som skiljer materialen åt är att elasticitetsmodulen för ett rostfritt stål ligger runt $185GPa$ medan elasticitetsmodulen för ett verktygsstål ligger på $210GPa$.

Det rostfria stålet som prototypen 3D-printas i är 316L, men av de utvalda material som går att använda inom AM är det rostfritt stål 13-8 Mo, som motsvaras av rostfritt stål PH1 i tabell 4.3, som är det material som har lite bättre egenskaper i alla aspekter än de andra materialen. Därför är det detta material som rekommenderas att användas.

Eftersom gruppen studerar ett fåtal utvalda material med verktygsstål som riktmärke och då ska försöka hitta ett material som är likvärdigt eller bättre är det svårt att konstatera ifall det finns något bättre material än verktygsstål i dagsläget. Enligt CES finns det alltid material som är bättre än verktygsstålet och de andra utvalda materialen, men för att välja ett av de materialen krävs mera studier och undersökningar på om de materialen kan fungera vid tillämpning av AM.

I dagsläget finns det endast ett fåtal material som är lika bra och som går att använda till just den applikation som eftersträvas i detta fall och det finns inget material i dagläget som är bättre än verktygsstål. I framtiden, då det antagligen kommer bli allt mer elektrifierat så kommer lastfallen kanske att bli annorlunda och då möjliggöra fler alternativ av material.

5.2 Analys av simulering

Hos axlar med liknande funktion som det här projektets ställs det krav på att komponenten uppfyller den önskade formen. Kraven definieras med hjälp av toleranser där speciellt koaxialitet och kast är viktigt för axlar. Exakt vilka toleranskrav som ställs med avseende på form för just den här komponenten är okänt med anledning av att tillgång till ritning. Det som dock kan konstateras är att det är fullt möjligt att 3D-printa en detalj som är rak inom ett medelytavvikelseintervall på 0,1 mm om inverterad CAD-modell används. Medelytavvikelsen kan på ett indirekt sätt kopplas till formtoleranser och ge indikation om huruvida toleranskravet uppnås. För att helt avgöra huruvida slutformen på prototypen uppfyller toleranskrav ges rekommendation att i framtida projekt utföra en uppmätning i kordinatmätmaskin för att få fram ett korrekt resultat angående formen hos komponenten.

I en svarv där axlarna är korrekt uppriktade är det enkelt att uppnå vanligt förekommande formtoleranser för axlar. Eftersom en finbearbetning ändå måste ske för att uppnå ytkravet blir lösningen att lägga till arbetsmån vid de ytor som kräver formtoleranser. På så sätt uppnås rätt form på komponenten i en svarv samtidigt som ytkravet uppnås.

5.3 Prototyptillverkning

Eftersom det uppstår problem med värmedeformationer under tillverkningen krävs förändringar av 3D-modellen eller så måste beredningen göras annorlunda. Antingen kan stödstrukturer läggas till, 3D-modellen kan omdesignas eller så kan byggorienteringen ändras så det problematiska överhänget elimineras.

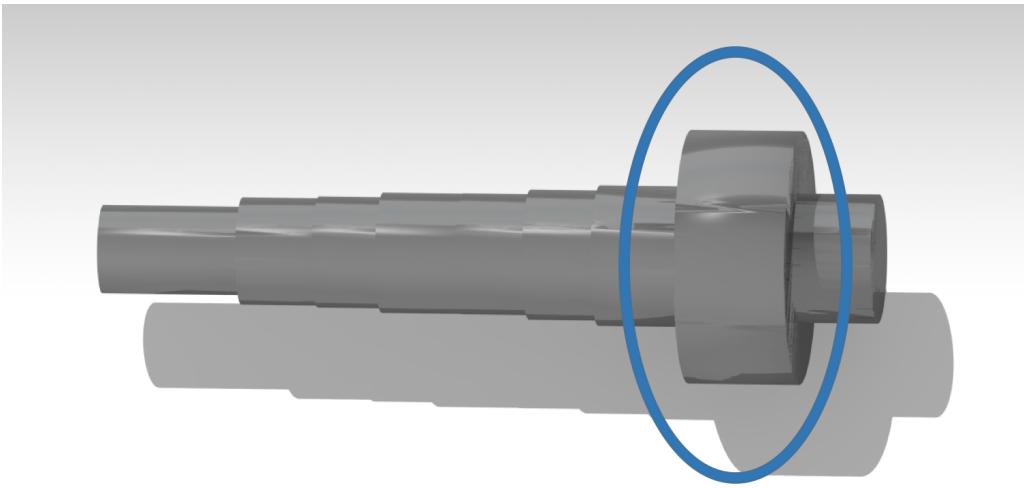
Tillverkningen har beräknats att ta nästan fem dagar (110 timmar) men stannar efter en och en halv dag, den beräknade tiden visar hur tidskrävande AM kan vara. Då andra detaljer ska 3D-printas samtidigt så påverkar axelns problem även andra projekt. Det ger en bild av hur känslig tekniken är och därmed blir det svårare att motivera AM vid serietillverkning.

Eftersom stödstrukturen inte kan avlägsnas är det inte möjligt att mäta rundhet och diameter på axeln. Om det inte uppstår problem med tillverkningen kan dessa mått mätas upp på andra delar av axeln. Det är intressant att se hur dessa mått är för att enklare kunna välja lämplig efterbearbetning.

5.4 Efterbearbetning

Den ursprungliga axeln framställs med sex stycken bearbetningssteg, se kapitel 1.3. Med hjälp av AM anser gruppen att detta projektet lyckas minska antal bearbetningssteg till tre stycken; 3D-printning, fräsning av kuggar och finsvarvning av lagerlägen och passningsytor. Det rekommenderas inte att 3D-printa kuggarna då det inte kan garanteras att de uppnår rätt form- och yttoleranser. Istället bör en

solid del 3D-printas, likt den som är inringad i figur 5.1, som sedan bearbetas med fräsning till rätt geometri.



Figur 5.1: Markeringen visar hur grunden till kuggen bör se ut vid 3D-printning

Axeln behöver inte längre grovsvarvas då geometrin är färdigställd vid 3D-printningen. Även momenten med borrning försvinner då axeln 3D-printas med hålen redan modellerade. Hålens ändamål är smörjning och viktminskning därför dras slutsatsen att måttoleransen på respektive hål är försumbar och därför behöver ingen vidare bearbetning göras. Den 3D-printade ytan med uppskattad ytfinhet på 10-15 μm uppfyller inte kraven för lagerlägen och passningsytor som kräver 0,4-0,8 μm och behöver därför finsvarvas för att nå fullgod ytjämnhet. Det optimala är att tillverka en komponent med en ytjämnhet som uppfyller kraven, något som inte går i dagsläget. En anledning till detta är utrustningens nuvarande kapacitet.

5.5 Slutsatser

AM kan appliceras på en axel i en växellåda i form av att implementera gitterstruktur. För att utnyttja all potential som finns med AM och då placera sig längst till höger på AM-skalan, krävs det att andra delar i växellådan designas om. I det här projektet antas det att axelns yttre geometri är tvungen att bibehållas då den är sammankopplad med flera andra detaljer som inte omfattas av projektet. Därmed blir designfriheten begränsad och projektets omdesign av komponenten placerar sig således i mitten på AM-skalan vilket illustreras i figur 2.2. Trots att projektet inte når total designfrihet kan projektet implementera en annan möjlighet som AM ger i form av viktreducering.

Målet med minskad vikt uppfylls genom att det implementeras en gitterstruktur som gav 23,5% mindre volym. Materialvalet rostfritt stål PH1 har lägre densitet än verktygsstål och bidrar därför till en total viktminskning med 25,0%.

Det kan konstateras att i nuläget är det inte möjligt att tillverka en axel som uppnår tillräckligt fina toleranser efter AM-processen utan vidare efterbearbetning. Anledningen är att ytfinheten som fås med AM inte är tillräckligt bra för lagerlägen och kontaktytor för kugghjul.

Med bättre kunskap om värmeledning kan axeln vara tillverkningsbar med hjälp av extra struktur inuti för att leda bort värme. Gruppen ser ingen annan anledning till att den inte är möjlig att bygga då gitterstrukturen är samma över hela axeln och väggtjockleken är inte tunnare på den del av axeln inte tillverkas jämfört med den som

Till sist går det även att dra slutsatser om att arbetsgången med finit element analys, topologioptimering, simulering av tillverkningsprocessen, materialval, beredning och prototyptillverkning från projektet går på ett generellt sätt att tillämpa vid omdesign med AM av liknande komponenter.

6
Rekommendationer

I kapitlet diskuteras det vad som kan göras annorlunda för att få bättre resultat. De idéer som framförs här kan ses som rekommendationer inför eventuella framtida projekt som behandlar samma ämne.

6.1 FEM av gitterstruktur

De modeller som tas fram i Magics med en gitterstruktur behöver testas så att hållfastheten uppfylls, alternativt inte försämras för mycket, för att kunna föra vidare AM-konceptet från datorsimuleringar till prototyper och fysiska tester. Försök görs men filformatet hos de filer som exporteras från Magics kan inte öppnas korrekt i ANSYS. En orsak till det kan vara att den gitterstruktur som skapas invändigt är för fin och leder till ett alldeles för komplext elementnät som de tillgängliga datorerna inte kan hantera, ett problem som återkommer vid användning av programvaran Simufact Additive. En lösning på problemet kan vara att manuellt skapa en CAD-modell med samma väggtjocklek som väljs i Magics och rita upp ett förenklat fackverk som motsvarar gitterstrukturen och inte leder till ett för komplext elementnät.

Vidare rekommenderas mer tillgång till handledning i ANSYS då det är en programvara med många användningsområden som inte utnyttjas i projektet. Exempelvis så kan tillverkningsprocessen simuleras med ANSYS och därmed kan förhoppningsvis problem med felaktiga filformat undvikas. Det finns alltså potential att lyfta nivån på underlaget som krävs för designförändringar.

6.2 Material

En fråga som väcktes under materialvalsprocessen var varför det idag inte går att 3D-printa stål. Särskilt med tanke på hur vanligt förekommande materialet är i konstruktioner i dagens samhälle samt att det är materialet som används hos orginalaxeln. Därför är det intressant att undersöka saken vidare.

6.3 Simulering

Det är inte möjligt att simulera tillverkningsprocessen av modellen med gitterstruktur applicerad. Anledningen till det är att elementnätet som beräkningarna baseras

på blir alldeles för små för Simufact Additive att hantera med datakraften vi har tillgänglig. Det går att dra en relativt träffsäker slutsats av simuleringen om hur resultatet kan se ut eftersom skillnaden mellan de två simuleringarna är tillräckligt liten för att vara försumbar. För att få ett korrekt resultat är det nödvändigt att simulera med gitterstrukturen applicerat för att skapa en inverterad CAD-modell. Därför finns en utvecklingspotential i att undersöka vidare när programvaror som kan hantera de här problemen finns tillgängliga. Det blir då även möjligt att validera simuleringen med uppmätning i en koordinatmätmaskin på en prototyp vilket är ett bättre resultat.

6.4 Prototyptillverkning

Den misslyckade tillverkningen ger oss erfarenhet av vad som kan gå fel. Värmeledning är en faktor som vi inte har tagit enskild hänsyn till på grund av kunskapsbrist. Det är även intressant att tillverka prototypen i en annan orientering och undersöka vad som händer med yta och om byggbarhet förbättras. Om fler prototyper tillverkas någon gång är det intressant att se hur väl AM klarar av att producera de mått som CAD-modellen har designats med eller hur stor avvikelsen blir.

6.5 Design

I början utav projektet var utgångspunkten att applicera DFAM hos komponenten. Målet var givetvis högt ställt och vi började analysera vilka problem som finns med axeln i dagsläget. Det vi kom fram till med hjälp av CEVT var att smörjningen av insidan hos lagerlägena inte fungerar helt optimalt.

I dagsläget är lösningen att olja förs in i det stora genomgående hålet för att sedan fortplanta sig ut i de små hålen vid lagerlägena. För att försöka få jämnt med olja vid varje läge så ser lösningen ut som så att storleken på hålet ökar ju längre från inflödet det är lokaliserat. En lösning på det här problemet som diskuterats är att omdesigna smörjningssystemet till någon form av individuella oljekanaler, något som är princip omöjligt med konventionella tillverkningsmetoder men som är teoretiskt möjligt med AM. Tanken är att uppnå ett individuellt och konstant flöde av olja till varje lager. Det kan konstateras att det funktionella värdet på komponenten definitivt skulle höjas om det här skulle vara möjligt att implementera. Ett problem som kan uppstå vid tillverkning av ett komplext kanalsystem är att det är svårt att tömma kanalerna på pulver. Därför måste det utredas vidare vilken dimension som är möjlig att implementera på en tillverkad prototyp. Anledningen att gruppen inte själva gick vidare med den här idén beror på att kunskapen för att modellera den avancerade geometrin som krävs inte var tillräcklig. Det krävs mer tid samt handledning för att kunna möjliggöra en implementering av den idén.

Litteraturförteckning

[1] Research Institutes of Sweden AB [RISE]. 2018.

[2] Bugatti. 2018. Bugatti Develops World's Largests Titanium Functional Component: Produced by Additive Manufacturing.

[3] AM Sub-platform. 2014. Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda.

[4] Åstedt, B. (2009). Stålets Egenskaper. *Stålbyggnadsinstitutet*. Hämtad från http://sbi.se/uploads/source/files/Artiklar/Stalets_egenskaper.pdf

[5] Diegel, Olaf. 2017, 11 oktober. Metal Additive Manufacturing, a Reality Check [online]. Chalmers Production Area of Advance. https://www.youtube.com/watch?v=yveN0-gl1wM (Hämtad 2019-02-10).

[6] Murr, L., Martinez, E., Amato, K., Gaytan, S., Hernandez, J., Ramirez, D., ... Wicker, R. (2012) Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science.

[7] Simplify3D. (2019) Ultimate 3D Printing Materials Guide [online]. https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/. (Hämtad 2019-02-09).

[8] European Powder Metallurgic Association [EPMA] (201 Introduction to Additive Manufacturing Technology: A guide for Designers and Engineers, 2nd edition.

[9] Loughborough University. About Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion [online]. https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/. (Hämtad 2019-02-12).

[10] Sartin, B. (2016). 316L POWDER REUSE FOR METAL ADDITIVE MANUFACTURING. *Honeywell Federal Manufacturing and Technology*. Hämtad från http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2017/Manuscripts/316LPowderReuseforMetalAdditiveManufacturing.pdf (Hämtad 2019-02-12)

[11] Gregor, J. (2016). Effects of powder recycling on stainless steel powder and built material properties in metal powder bed fusion processes. *National Institute of Standards and Technology.* Hämtad från https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=921901 (Hämtad 2019-02-12)

[12] Additive News. (2017). Top 10 Materials used in Additive Manufacturing Industry. [online]. texttthttps://additivenews.com/top-10-3d-printing-materials-additive-manufacturing/. (Hämtad 2019-02-13)

[13] GE Additive. (2019). A Guide to Metals Used in Additive Manufacturing. [online]. https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/metal-additive-manufacturing-materials?fbclid=IwAR1vAJzedYDETXb5Qti9Nr-ENoHzVFNLM8h6iMd7YxxF4OYcuEfXQ5Dyu4I. (Hämtad 2019-05-10)

[14] Ålgårdh Joakim, Swerea. Additiv tillverkning-från prototyp till produktion. [online]. http://www.svets.se/download/18.3e05ab4b152843357af212db/1460985825714/3.+Additiv+tillverkning+från+prototyp+t+produkt+-++J+Agardh.pdf (Hämtad 2019-02-13)

[15] Amato, K. N., et al. (2012) Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting.Ächta Materialia, 60.5, 2229-2239.

[16] WIndform. Windform XT 2.0. [online] http://www.windform.com/windform-xt-2-0.html. (Hämtad 2019-02-20)

[17] Dmitry Y. Kovalev, Sergey V. Konovalihin. Boron Carbide from Comprehensive Organometallic Chemistry III, 2007. https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/boron-carbide (Hämtad 2019-02-20)

[18] Faleh, Hazim. Muna, Noori. Ştefănescu, Florin. Properties and Applications of Aluminium-Graphite Composites. (2015). https://www.scientific.net/AMR.1128.134. (Hämtad 2019-02-20).

[19] Simufact Additive Tutorial. (2018). Simufact Engineerinering GmbH.

[20] Scheffler, M. och Colombo, P. (2006) "Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications," John Wiley Sons

[21] Wadley, H., Fleck, N., and Evans, A. (2003) "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," Composites Science and Technology, 63(16), s. 2331-2343.

[22] Tao, W. och Leu, M. (2016) Design of lattice structure for additive manufacturing. doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182

[23] Gibson, L. and J., and Ashby, M. (1997). *Cellular solids: structure and properties* Cambridge University Press.

[24] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., och Emmelmann, C. (2016) Additive manufacturing of metals. Acta Materialia, 117, 371 – 392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.

[25] M. Koike, M. K. Chan, K., Mason, R., S. Hummel, S., Kobayashi, Y., och Okabi, T. (2013) Fatigue life of titanium alloys fabricated by additive-layer manufacturing techniques.

[26] Svenska institutet för standarder. 1989. SS 674. Ytjämnhet - Riktlinjer för ytjämnhetsbestämning. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från `https://www.sis.se/produkter/metrologi-och-matning-fysikaliska-fenomen/langd-och-vinkelmatning/ytstruktur/ss674/`

[27] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang. 2017 Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Hämtad från `https://old.matse.psu.edu/modeling/research_files/papers/2018PMS_DebRoy.pdf`

[28] Alkaios Bournias Varotsis. Introduction to Binder Jetting 3D printing. Hämtad från `https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing` (Hämtad 2019-05-16)

[29] Svenska institutet för standarder. SS-EN ISO 1101:2017. Geometriska produktspecifikationer (GPS) - Geometriska toleranser - Form- och lägetoleranser. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från `https://www.sis.se/produkter/metrologi-och-matning-fysikaliska-fenomen/langd-och-vinkelmatning/matinstrument/sseniso11012017/`

[30] Björklund, Stefan, Hågeryd, Lennart och Lenner, Matz. 2002. Modern Produktionsteknik Del 1. Andra upplagan. Stockholm: Liber AB.

[31] EOS. Materials for Metal Additive Manufacturing. `https://www.eos.info/material-m` (Hämtad 2019-04-20)

[32] CES EduPack software, Granta Design Limited, Cambridge, UK, 2019 (www.grantadesign.com).