

ReLed-3D

Resurseffektiv och flexibel produktion inom
fordonsindustrin genom additiv tillverkning i metall



ReLed-3D: Resource efficient flexible production in the automotive industry through additive metal manufacturing

FFI project

ReLed 3D is a RISE project in the FFI sub-program: Sustainable Manufacturing. Project time: 2017-2020 Budget: 7 500 000 kr

The project's main goal is to develop a methodology for resource efficient additive manufacturing of components in the automotive industry.

Methodology for Innovation by Additive Manufacturing

Additive Manufacturing – AM, can be used to create innovative designs, to significantly reduce weight and size of components, integrate functions and improve functionality. To start this process, a methodology inspired by set based design, has been created as a workshop. Some results of the design concepts from the pilot workshop are presented to the right.

Redesign of engine

Alternative design concepts for AM

Industrial Additive Metal Manufacturing

Knowledge, skills, digital and mechanical tools, are needed to transform the innovative concepts to 3D-printed and functional components.

Education and testbeds are tools in this process.

Powder materials for AM	Design rules for AM	Simulation and optimisation	Additive Manufacturing	Post processing operations
• Powder size • Powder shape • Powder flowability • Chemistry	• Print orientation • Support structures • Tolerances • Powder removal	• Heat transfer • Pressure drop • Part design	• Type of AM machine • Process parameters • Powder supply • Quality system	• Removal of powder • Removal of support structures • Post treatment

Quality assurance

Cost model

Heat transfer properties in specimens made by Additive Manufacturing

An evaluation of heat transfer properties will be made by specimens:

- In stainless steel and aluminium
- With different inner surface treatments
- With different inner structures

Oil at room temperature will be pumped through heated specimens. The rise in oil temperature will indicate the heat transfer capabilities. The specimen design is made by flow simulation.

Flow simulation, Figure CFD Modeller

Figure for heat transfer

Inner surfaces

3D printed specimens

Setting up

Project partners

CHALMERS EDC PEDRO Höganas LUND UNIVERSITY LASERTECH LHM AB CURTISS-WRIGHT VOLVO

RISE RISE IVF Mölndal, Sweden

Författare: Magnus Widfeldt et al

Datum: 2021-12-17

Projekt inom Hållbar Produktion

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	4
2 Executive summary	5
3 Bakgrund.....	6
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	6
5 Mål	7
5.1 Målbeskrivning i ansökan.....	7
5.2 Måluppfyllelse och bidrag till effekter	7
6 Resultat och måluppfyllelse: Kap 7 - 10	8
7 Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning	9
7.1 Workshop baserad på Set-Based Design.....	9
7.2 Introduktionskurs till additiv tillverkning	13
8 FoU om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall 14	
8.1 Provkropparnas geometri.....	14
8.2 Design av provkroppar	15
8.3 Fokus på additivt tillverkade provkroppar i aluminium	16
8.4 Testrigg och val av olja för mätning av värmeöverföringsförmågan	16
8.5 Tryckfall hos provkroppar beroende av innerstruktur och ytfinhet	18
8.6 Förmåga till värmeöverföring hos olika provkroppar	20
8.7 Simulering av strömningsdynamik (CFD) i provkropparna	23
8.8 Sammanfattning och reflektion om värmeöverföring i provkroppar	24
8.9 FoU om värmeöverföring i additivt tillverkade modeller för värmeväxling	25
9 Guide för additiv tillverkning	26
9.1 Gyllene regler för att välja Additiv Tillverkning	27
9.2 Fallstudier som metod i en utvecklingsprocess för AM	28
10 Utvecklingsprocess med industriella fallstudier	29
10.1 Fallstudier för AM: Arbetssätt och lärande	29
10.2 Tre fallstudier för AM	29
10.2.1 Remspännare	30

10.2.2 Termostatinneslutning "Thermostat Housing"	31
10.2.3 Fjäderförankring "Spring Anchorage"	34
11 Spridning och publicering	42
11.1 Kunskaps- och resultatspridning	42
11.2 Publikationer	42
12 Slutsatser och fortsatt forskning	43
13 Deltagande parter och kontaktpersoner	44
13.1 Bidrag till rapportens innehåll	44

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

ReLed-3D står för "Resurseffektiv och flexibel produktion inom fordonsindustrin genom additiv tillverkning i metall", projekt 2016-05418 inom FFIs delprogram Hållbar produktion.

Främsta målet har varit att utveckla design- och tillverkningsmetodik för en resurseffektiv additiv tillverkning "AM"¹ av komponenter inom fordonsindustrin. Detta har adresserat hela värdekedjan från innovativ design för AM till optimering utifrån funktionskrav, material och kvalitetsaspekter, samt beredning, tillverkning och efterbehandling. De huvudsakliga arbetsområdena har varit:

- Innovationsprocessen för nytänkande genom additiv tillverkning
- FoU-studier om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall
- Utvecklingsprocess för industriell nytta av additiv tillverkning genom fallstudier
- En guide för additiv tillverkning.

Arbetet har till sitt innehåll i hög grad genomförts med arbetssätt och metoder enligt den ursprungliga planen, men försenats och förändrats på grund av den oförutsedda covid-pandemin. Resultaten från ReLed-3D är sammanfattningsvis:

Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning.

Etablerade arbetssätt och metoder för innovation och produktutveckling har anpassats till AM, och använts i en workshop med parterna i projektet. Som utgångspunkt valdes en konkret komponent i ett fordon, en värmepump för oljekylning. Se kap 7.

FoU-studie om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall.

AM ger nya möjligheter att skapa geometriska former inuti en komponent. För värmepump är former med större yta för värmeöverföring en sådan möjlighet. Genom valet av värmepump som fallstudie, har en fördjupad studie genomförts om värmeöverföring i tuber med olika innerstrukturer. Denna typ av kunskap har också efterfrågats för att skapa bättre modeller för simulering och prediktering av värmeöverföring i digitala verktyg. Se kap 8.

Guide för additiv tillverkning.

Under projektiden har en utförlig guide för AM publicerats av projektparten Lunds universitet. En företagsanpassad vägledning för AM har också tagits fram i projektet. Se vidare i kap 9.

Utvecklingsprocess genom industriella fallstudier för additiv tillverkning.

Ett lärande under projektet är att en industriell mognadsprocess för att skapa nytta och värde av AM tar tid. Företag som har en väl utvecklad förmåga att ta fram egna produkter och har etablerade leverantörskedjor för tillverkning, behöver tydliga jämförelsekriterier mellan traditionellt tillverkade komponenter och alternativa lösningar med AM. Här ryms frågor som:

- Kvalitetssäkring av optimerade konstruktioner innan de når (den globala) marknaden
- Tydliga ekonomiska jämförelsetal mellan AM och traditionell tillverkning
 - o För enskilda komponenter då AM kan sänka vikt, ersätta flera komponenter etc
 - o För reservdelshållning under en produkts livslängd. Kräver jämförbara kostnader för traditionell tillverkning med lagerhållning, och AM för reservdelar. AM kan bli ett alternativ då verktyg för reservdelstillverkning behöver renoveras eller nyttillverkas.

Exempel på industriella fallstudier och lärandet från dessa ges i kap 10.

Bidrag till rapportens innehåll

Arbetet i projektet har dels genomförts enligt ursprunglig plan, dels – på grund av pandemin 2020-2021 – förlängts, förändrats och inkluderat flera personer som bidragit i projektet. Se mer information i kap 13.1 om personer som särskilt bidragit till rapportens innehåll.

¹ I rapporten skrivs additiv tillverkning med förkortningen "AM", lånat från engelskans Additive Manufacturing.

2 Executive summary

The main goal of the ReLed-3D project has been to develop design and manufacturing methodology for a resource-efficient additive manufacturing "AM" of components in the automotive industry. This has addressed the entire value chain from innovative design for AM to optimization based on functional requirements, materials and quality aspects, as well as preparation, manufacturing and finishing. The main areas of work for the project have been:

- The innovation process for innovation through additive manufacturing
- R&D studies on heat transfer in additively manufactured metal specimens
- A guide for additive manufacturing
- Development process for industrial benefit of additive manufacturing through case studies.

The work has to a large extent been carried out with working methods and methods according to the original plan, but has been delayed and changed due to the unforeseen covid pandemic situation. The deliverables and results from ReLed-3D are in summary:

Innovation process for innovation through Additive Manufacturing.

Established working methods and methods for innovation and product development have been adapted to AM, and used in a workshop with the parties in the project. As a starting point, a concrete component was chosen in a vehicle, a heat exchanger for oil cooling. The original goal of the demonstrator was to show radical step changing possibilities and resource savings:

- Reduced size of the heat exchanger by 50%, maintained efficiency ratio and back pressure
- Reduced lead time in the supply chain by 50%
- Reduced weight of the oil cooler by at least 20% / 25%. Fig 1.

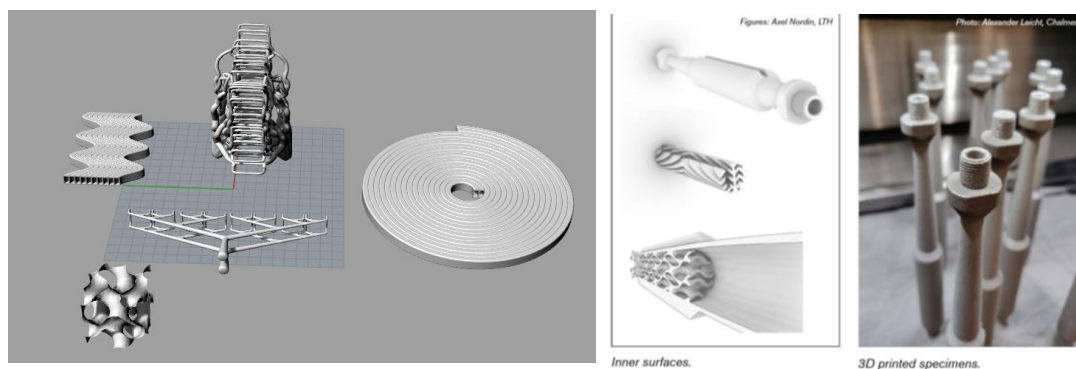


Fig 1. From left to right: Heat exchanger ideas from an innovation process workshop. Inner structures in specimens for heat transfer research, simulated, designed and 3D printed. Pictures: A Nordin (left, middle), A Leicht (right).

R&D study on heat transfer in additively manufactured specimens in metal.

AM provides new opportunities to create geometric shapes inside a component. For heat transfer, molds with a larger surface area for heat transfer are one such possibility. Through the choice of heat exchanger as a case study, an in-depth study has been carried out on heat transfer in tubes with different internal structures. This type of knowledge has also been requested to create better models for simulation and prediction of heat transfer in digital tools.

Guide for additive manufacturing.

During the project, a detailed guide for AM has been published.² How a company-adapted guide for AM can look like and be further developed has also been produced in the project.

² Diegel, O. Nordin, A. Motte, D: "A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing". Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer Verlag 2020, ISBN 978-981-13-8283-3

Development process through industrial case studies for additive manufacturing.

A learning during the project is that an industrial maturation process to create the benefit and value of AM takes time. Companies that have a well-developed ability to develop their own products and have established supply chains for manufacturing, need clear comparison criteria between traditionally manufactured components and alternative solutions with AM. This includes questions such as:

- Optimized designs must be quality assured before they reach a global market
- Clear economic comparative figures between AM and traditional manufacturing, for individual components or AM for replacement of several components
- Economic breakpoints for spare parts maintenance during the life of a product.
 - Requires comparable costs between traditional manufacturing and warehousing, and additively manufactured spare parts.
 - AM can, for example, be an alternative instead of new manufacturing or renovating tools for spare parts manufacturing

Three industrial case studies and lessons learned from these are given in the report, chapter 10.

3 Bakgrund

ReLed-3D har utgått från en hög ambitionsnivå, med en helhetssyn på industriell innovation genom additiv tillverkning utifrån olika perspektiv. I projektets planeringsfas, användes en oljekylare eller värmeväxlare som exempel. En utmanande målbild skisserades med 50% minskad storlek och 20% minskad vikt. Ett stegvis lärande om potentialen av AM, visar att denna målbild generellt kan vara både realistisk och även möjlig att överträffa. Det senare hänger i hög utsträckning samman med förmågan att designa för AM, optimera geometri och materialval, och sedan bereda och tillverka komponenten. Ett kännetecken för AM är att komplexitet i tillverkningen i princip är gratis. Det gör att en ursprunglig bedömning av lämpliga komponenter för AM, snarast bör gälla den funktion och det sammanhang komponenter ingår i. Två eller flera befintliga komponenter kan till exempel konsolideras till en enda komponent.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektets syfte: Att visa industrinytta genom additiv tillverkning utifrån flera perspektiv i framtagningen av komponenter eller produkter.

Projektet har fyra huvudsakliga FoU-områden utifrån Additiv Tillverkning, som redovisas i rapporten med frågeställningar, arbetssätt, metoder och resultat.

1. Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning. Kap 7
2. FoU-studie om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall. Kap 8
3. Guide för additiv tillverkning. Kap 9
4. Utvecklingsprocess med industriella fallstudier. Kap 10

Metoderna för respektive moment har engagerat expertis inom olika områden, för att bidra till planering, genomförande och utvärderingar. Se introduktionstexter samt kap 13.1.

5 Mål

Två målperspektiv redovisas:

- 5.1 Målbeskrivning i ansökan
- 5.2 Måluppfyllelse och bidrag till effekter.

5.1 Målbeskrivning i ansökan

Projektets främsta mål har varit att utveckla design- och tillverkningsmetodik för en resurseffektiv additiv tillverkning av komponenter inom fordonsindustrin, och adresserar därigenom hela värdekedjan från design och designoptimering till kvalitetsaspekter.

Utgångspunkt var att arbeta med en realistisk fallstudie, för att studera flera viktiga aspekter utifrån mekaniska egenskaper, behov av efterbehandlingssteg, ytstruktur samt användning och utvärdering av tekniker för oförstörande provning av additivt tillverkade detaljer.

Till detta planerades för att arbeta med en modell för kostnadsberäkning anpassad för AM och relaterad till fallstudien.

Förväntade långsiktiga effekter av metodik och mekanismer för AM i fordonsindustrin är möjligheter till radikalt förkortade ledtider, ökad flexibilitet i produktionen, hållbar produktion genom hög utnyttjandegrad av råmaterialet (minimerat materialspill och inkurans), och förbättrade komponentegenskaper via optimal design, samt möjlighet att tillverka detaljer med komplex design i lägre vikt i ett stycke (konsolidering som ger artikelrationalisering).

ReLed-3D har utgått från en demonstrator i form av en oljekylare i metalliska material till en lastbil. För att visa fördelarna med AM inom fordonsindustrin var målet att visa radikalt nya möjligheter och resursbesparingar.

5.2 Måluppfyllelse och bidrag till effekter

Måluppfyllelsen relateras till de fyra huvudområdena, se kap 4, enligt följande:

Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning, AM.

En tydlig insikt från projektet är att det krävs en mognadsprocess i företag för att implementera möjligheterna med AM, och successivt skapa effekter av att tillämpa AM i företaget. Det är en omfattande process att för en komponent som levereras globalt, byta från en etablerad tillverknings- och leverantörskedja till ett helt annat sätt att tillverka. För denna process har ReLed-3D levererat:

- En innovationsworkshop för framtagning av komponenter, produkter eller funktioner med AM. Workshopen är baserad på metoder för produktutveckling
- En industriellt anpassad introduktionsutbildning om additiv tillverkning för industrinytta. Genomförd av professor Olaf Diegel under tre dagar.
- Vägledning för additiv tillverkning genom fallstudier med företagsexempel för AM.

Ett särskilt fokus har varit funktionen hos en värmeväxlare.

FoU-studie om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall.

En planerad process har varit att kartlägga möjligheterna att använda AM för att skapa nya komplexa geometrier för ökad värmeöverföring i en värmeväxlare, här en oljekylare. Detta har undersökts genom systematisk framtagning av provkroppar med olika inre struktur och ytor. Flödessimulering har tillämpats för att utforma provkropparnas geometri. En provrigg har byggts för provningen. Oljor har undersökts för att välja olja med rätt viskositet, som vid provtemperatur efterliknar viskositeten hos oljan vid den verkliga drifttemperaturen. Prov har genomförts som

dels visar resultat i linje med förväntade, dels visar på behov av hur en mer avancerad provning bör genomföras.

Guide för additiv tillverkning. Kap 9

En utförlig guide för AM har tagits fram under projektet av Lunds Universitet, kap 9. Kunskap från denna tillsammans med lärande av innovationsprocess och fallstudier, har också bidragit till en struktur för planering och genomförande av de industriella fallstudierna. En industriell vägledning för AM har tagits fram under projektet.

Utvecklingsprocess med industriella fallstudier

I rapporten redovisas tre representativa industriella fallstudier. Dessa visar, tillsammans med innovationsprocessen ovan, en successiv industriell mognad och implementering av AM som resurs i företaget. Valet av fallstudier har dels påverkats av covid-pandemin, dels av det lärande som gjorts i samarbetet mellan projekten ReLed-3D och Concept Line. Resultatet är en tydlig start på en långsiktig innovationsprocess med industriellt använd AM.

En ökad förståelse för komplexiteten att jämföra ekonomin vid ersättning av traditionell tillverkning med AM, har tydliggjort behovet av en betydligt mera grundlig analys. En sådan omfattar en komponents kostnader i olika faser, exempelvis villkoren vid montering i nya fordon, eller vid leverans som reservdel när fordonsmodellen slutat tillverkas.

6 Resultat och måluppfyllelse: Kap 7 - 10

Projektets fyra huvudsakliga resultatområden utifrån AM redovisas i följande kapitel 7 – 10 med rubrikerna:

Kap 7: Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning

Kap 8: FoU om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall

Kap 9: Guide för additiv tillverkning

Kap 10: Utvecklingsprocess med industriella fallstudier

7 Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning

En utgångspunkt för projektet har varit att radikalt söka förbättra egenskaper och funktionalitet hos en given produkt eller komponent. Som utmaning valdes redan i projektplanen en oljekylare för lastbilar från Volvo AB. Bild 2.

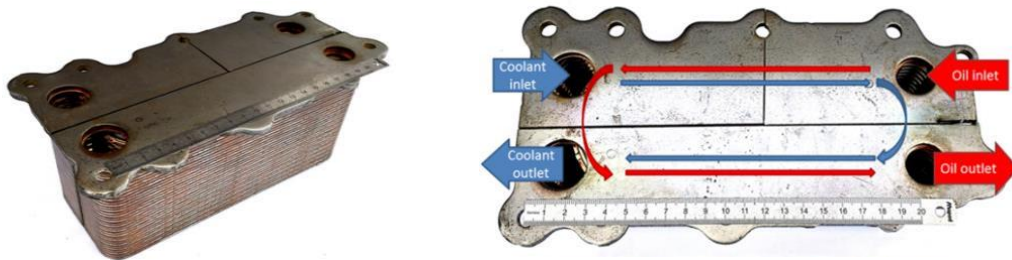


Bild 2. Plattvärmeväxlare för oljekylning t v. Flödespilar för kylmedel och olja t h. Bilder Volvo Technology.

Den nuvarande utformningen och funktionaliteten har varit utgångspunkten, och målbilden är en innovativ kylare med tydliga utmaningar: 50% minskad storlek och 20% minskad vikt.

7.1 Workshop baserad på Set-Based Design

Resultat är en workshop med en förenklad variant av Set-Based Design, "Instant SBD" för att ta fram koncept för nytänkande genom AM. Som fallstudie användes en oljekylare för tunga fordon. Workshopen har tagits fram av Mikael Ström, RISE IVF. Som inspiratörer och experter bidrog Johan Svenningstorp, Volvo Technology, Olaf Diegel och Axel Nordin, Lunds Universitet.

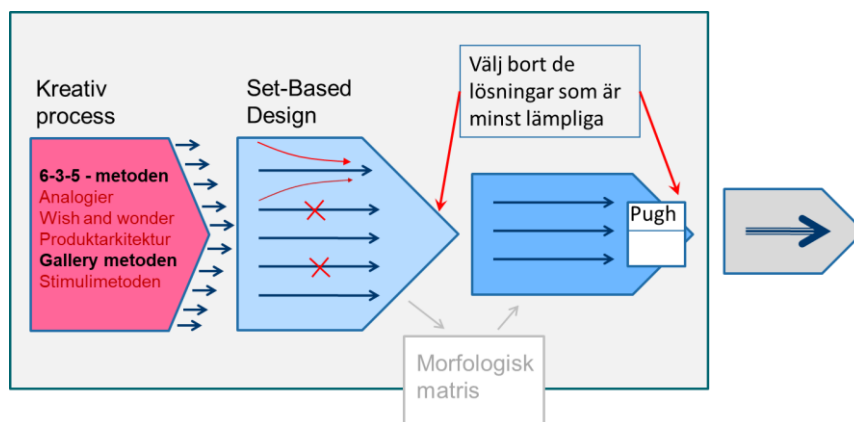


Bild 3. Instant Set Based Design. Bild: Mikael Ström, RISE IVF.³

Bild 3 visar flödet i grova drag för Instant SBD. Vi börjar med två kreativa metoder, 6-3-5 och Gallerimetoden (Pahl et al. 2007). I rött står några andra metoder som också kan prövas. Information om dessa söks lämpligen i litteraturen. Begreppet Morfologisk matris är ett verktyg för att kombinera lösningar på delfunktionsnivå. Beteckningen Pugh i bild 3 står för Pughmatris efter dess skapare Stuart Pugh, och är en matris för värdering och jämförelse av koncept. Vill man vara säker på att kunna genomföra hela workshopen på en dag, är det en god idé att gå igenom teorin i förväg.⁴

³ Bilden är inspirerad av Ward, A. C. and Sobek, D. K. (2014) 'Lean Product and Process Development, Cambridge, Massachusetts, USA: Lean Enterprise Institute.

⁴ Se kapitel 3.2.2, 3.2.4 och 3.3.2 i Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., and Grote K.-H., (2007), "Engineering Design - A Systematic Approach", 3rd ed., Springer, Berlin, Germany, kapitel 6 i Ward, A. C. and Sobek, D. K. (2014) 'Lean Product and Process Development, Cambridge, Massachusetts, USA: Lean Enterprise Institute, kapitel 14 i Pugh S., (1996) "Creating innovative products using total design", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. och sid 150-153 i Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D. (2012) 'Product Design and Development, 5th ed.', Boston, Massachusetts, USA: McGraw-Hill.

Agenda för innovationsworkshop:

Med de metoder och arbetssätt som presenterats översiktligt ovan, skapades en workshop för att genomföra en "Instant Set Based Design" under en dag. Bild 4.

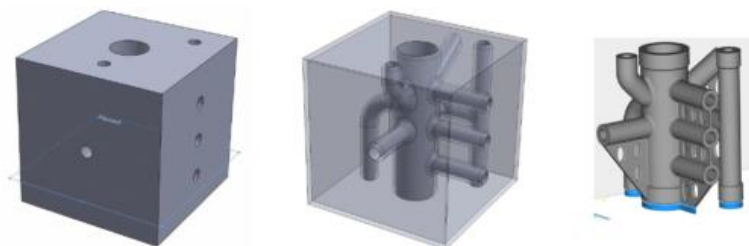
Tid	Agenda för Workshopen	Kommentar och orientering
9.15	Introduktion	Mål för workshopen
9.30	Skapa ett öppet sinne	Kreativ övning att kombinera vardagsredskap
10.00	Metoder som används i WS	Introduktion av metoder samt information om kompletterande metoder
10.20	Produktkunskap	Funktion: Tre huvudsakliga mål för vald komponent eller produkt
10.35	DFAM, Design för additiv tillverkning	Tre huvudsakliga fördelar Tre huvudsakliga begränsningar
11.05	Gallerimetoden	Varje deltagare skisserar en idé på papper som sätts upp på väggen
12.00	Lunch	
13.00	"6-3-5"- metoden	Grupparbete: 6 personer genererar 3 lösningar som skickas till 5 medarbetare
14.20	Elimineringsprocess	Halvera antalet skisserade lösningar och koncept från ca 20 till ca 10. En morfologisk matris kan användas för att hitta nya lösningskombinationer.
15.00	Pugh - matris	Utvärdera, värdera, kombinera, eliminera lösningar. Reducera från ca 10 till 3 koncept.
15.45	Summering, nästa steg, avslutning	Resultaten från WS tas vidare till nästa steg i en produktutvecklingsprocess.

Bild 4. Agenda för en "Instant Set-Based-Design på en dag".

Något om de olika stegen för workshopen:

DFAM, design för additiv tillverkning är en nödvändighet

Att framgångsrikt ersätta en solid komponent med en additivt tillverkad, kräver kunskap om design för additiv tillverkning, DFAM. AM ger mycket stora möjligheter till innovativa lösningar, förbättrade funktioner, färre komponenter, reducerat materialbehov och lägre vikt. Bild 5.



Källa: Prof Olaf Diegel

	Solitt block	Ytterskal med rör	Optimerad lösning
Tillverkningstid 50u lager	191 h	36,5 h	19,7 h
Materialvikt	7,4 kg	1,23 kg	0,56 kg
Materialkostnad \$70/kg + 10% spill	\$ 571	\$ 95	\$ 43
Kostnadsförslag för tillverkning i 316L rostfritt	\$ 15.294	\$ 3.735	\$ 1.986

Bild 5. Referensdata för tre olika sätt att tillverka en komponent med samma funktion.

Till vänster ett additivt tillverkat solitt block.

I mitten ett additivt tillverkat ytterskal med invändiga rör och evakuerat pulver.

Till höger en optimerad lösning, med ca 1/10 tillverkningstid, som väger knappt 8% av det solida blockets vikt och kostar ca 13% av det solida blockets tillverkningskostnad.

En viktig insikt vid AM är de kostnader som knyts till förarbete och efterarbete. Efterarbete är till exempel borttagning av stödstrukturer, värmebehandling, maskinbearbetning och ytbehandling. Förarbete och efterbearbetning kan stå för upp till 70% av totalkostnaden för en additivt tillverkad komponent, källa: Olaf Diegel.

DFAM är i sig ett stort kunskapsområde. I kap 9 ges en introduktion som guide och vägledning om DFAM. I en innovationsworkshop behövs åtminstone en introduktion om de "gyllene reglerna" för DFAM, kap 9.1.

Gallerimetoden

- Varje person tar fram en lösning
- Lösningarna sätts upp på väggen
- Varje deltagare presenterar sin lösning, övriga ser på.
- Deltagarna får nya idéer
- Varje deltagare tar en eller flera lösningar och jobbar vidare med

6-3-5 metoden

Genomförs idealt med 6 personer i varje grupp. Presentera problemet, och varje person ritar tre lösningar. När alla är färdiga skickar man sina lösningar vidare medsols runt bordet till nästa person som tar vid, låter sig inspireras av vad den gjort som skickade lösningarna. Alla jobbar vidare med dessa nya lösningar tills man har tillför det man kan.

När lösningarna vandrat runt bordet och kommit tillbaka till den som skapade dem först så sammanfattar denne resultaten och eventuellt inspireras av vad de andra gjort runt sin ursprungliga lösning och lägger till något som man kommer på.

- 6 personer genererar vardera
- 3 lösningar som skickas runt till övriga
- 5 medarbetare som arbetar vidare på lösningarna



Bild 6. Resultat av den kreativa processen för att tillverka en värmeväxlare med AM.

Den omvända Pugh-matrisen

		Koncept			
		1	2	3	4
Osäkerheter och efterfrågad kunskap		Vad måste vi lära oss om koncept 1 för att överbrygga osäkerheten	Vad måste vi lära oss om koncept 2 för att överbrygga osäkerheten	Vad måste vi lära oss om koncept 3 för att överbrygga osäkerheten	Vad måste vi lära oss om koncept 4 för att överbrygga osäkerheten
Kriterier	A	+	-	+	R
	B	-	S	S	E
	C	S	-	+	F
	D	S	+	S	E
$\Sigma+$		1	1	2	R
$\Sigma-$		1	2	0	E
ΣS		2	1	2	NS
Total = ($\Sigma+$) - ($\Sigma-$)		0	-1	2	0
Eliminera			Ja		

Bild 7. Pughmatris Ref: Pugh S., (1996), *Creating Innovative Products Using Total Design*, Addison-Wesley Reading MA. Se vägledning i texten nedan.

En vägledning om arbete med Pughmatrisen i bild 7 är:

- Kriterier A – D är de kriterier som Koncept 1 – 4 ska utvärderas mot.
- Koncept 4 är en referens som de övriga koncepten ska jämföras med. Koncept 4 har per definition summan 0. Övriga koncept jämförs med koncept 4.
- Om konceptet är sämre så får det ett minus i den rutan, är det bättre så blir det ett plus i rutan och ett "S", samma, om det är lika bra som referensen.
- Om Kriteriet B är energiförbrukning och koncept 1 drar mer energi än referens 4, så får koncept 1 ett minus i rutan för kriteriet B. Antal minus, plus och samma (S) kan summeras ner och ger en jämförande bild mellan koncepten.
- Totalsumman ska inte enbart tjäna som urvalskriteriet utan man ska föra ett resonemang grundat på helhetsbilden när man bedömer vilket koncept som är bra eller dåligt.
- På raden om "Osäkerheter och efterfrågad kunskap" anges vad man måste lära sig om konceptet för att veta om det kommer att ge avsett kundvärde och vad vi bedömer att vi måste göra för att få denna kunskap. Det kan vara tester, läsa i en bok, fråga en expert, fråga en leverantör, fråga kunden med mera.

Utifrån den ifyllda Pughmatrisen väljs de lösningar bort som man bedömt som sämst. Antalet som väljs bort behöver inte vara stort, och man bör vara säker att man väljer bort rätt annars kan man låta bli.

Hur fortsätta efter workshopen

- Begrunda resultaten från workshopen
- Samla kunskap för att fylla i kunskapsluckor
- Gör eventuellt en ny värdering
- Ersätt antaganden med faktabaserade beslut
- Välj bort de sämsta alternativen
- Undersök marknadsmodellens rymd.

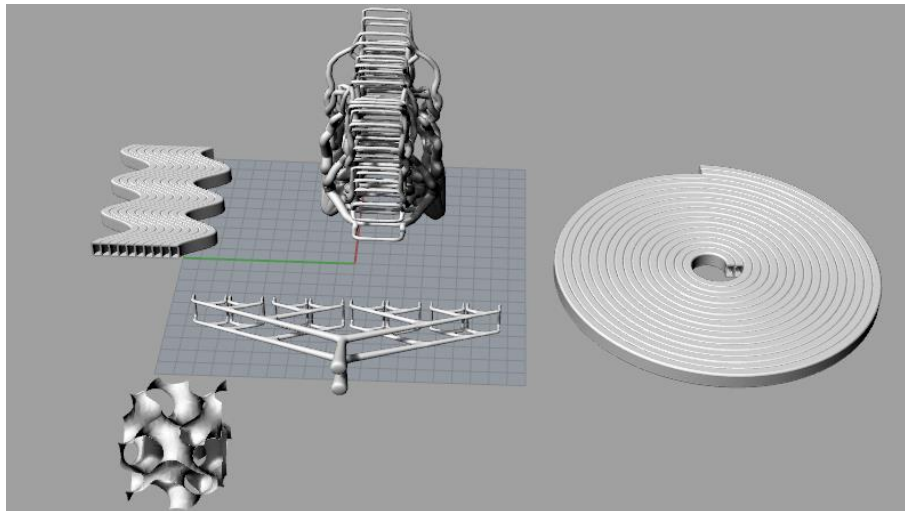


Bild 8. Designförslag som tagits fram i ReLed-3D efter workshopen. Bild: Lunds Universitet

7.2 Introduktionskurs till additiv tillverkning

En tredagars introduktion och utbildning om Additiv Tillverkning genomfördes under våren 2018. Lärare var professor Olaf Diegel. En översiktlig agenda för utbildningen ges i bild 9.

	Content of a three-day AM training course
Day 1, hours	
½	Introduction
1	Intro to AM. The state of the AM industry.
1 ½	AM process: from CAD to part.
2	Topology optimization
1 ½	AM Design optimisation exercise
Day 2, hours	
1 ½	AM process: from CAD to part
1 ½	Designing for metal AM and Lattice structure exercise
2	Design for mass-customization exercise
1 ½	Part consolidation exercise
Day 3, hours	
¾	Designing for other AM processes
¾	Tooling applications of AM
½	Economics of AM
1	AM and Innovation
2	Putting it all together
½	AM in the near future

Bild 9. Program för en tredagars kurs om additiv tillverkning, genomförd av prof Olaf Diegel under ReLed-3D för en grupp inom AB Volvo från olika verksamheter.

8 FoU om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall

Resultaten från FoU-arbetet om värmeöverföring har sammanställts i rapporten "ReLed-3D R&D report 2020-06-04: Heat Transfer Capability of Surfaces Manufactured using Selective Laser Melting". Författare: Sepehr Hatami, RISE IVF. Rapporten har ingått som bilaga i lägesrapporteringen från projektet, och har här översatts till svenska.

Introduktion

Arbetet har i huvudsak innehållit följande moment: Simulering av flödet i provkropparna, val av innerstrukturer, AM av provkropparna och uppbyggnad/anpassning av testrigg för mätning av värmeöverföringsförmågan. Se bild 10 samt mer detaljerade presentationer därefter.

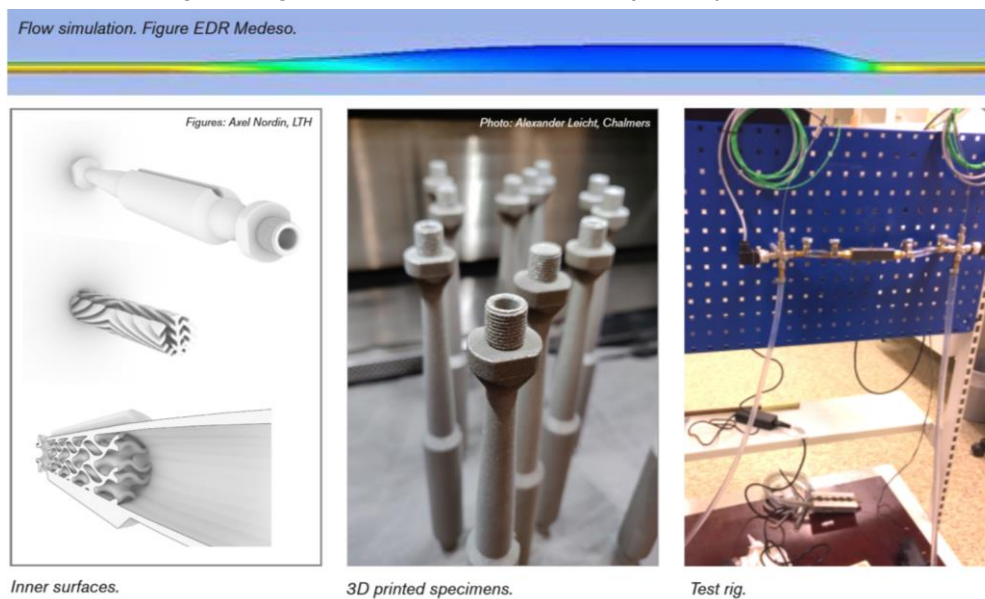


Bild 10. Fyra illustrationer av FoU-arbetet om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall.

- Överst: Genom flödessimulering bestämdes den geometriska utformningen av provkropparna. Bild: EDR Medeso
- Till vänster: Tre innerstrukturer valdes. Rör, plattor/ribbor och gyroid. Olika ytfinitet har också varit en variabel. Bild: Lunds Universitet, A Nordin
- Mitten: Additivt tillverkade provkroppar. Bild: Chalmers, A Leicht
- Till höger: Testrigg under uppbyggnad för mätning av värmeöverföringsförmågan hos olika provkroppar. Bild: RISE IVF

8.1 Provkropparnas geometri

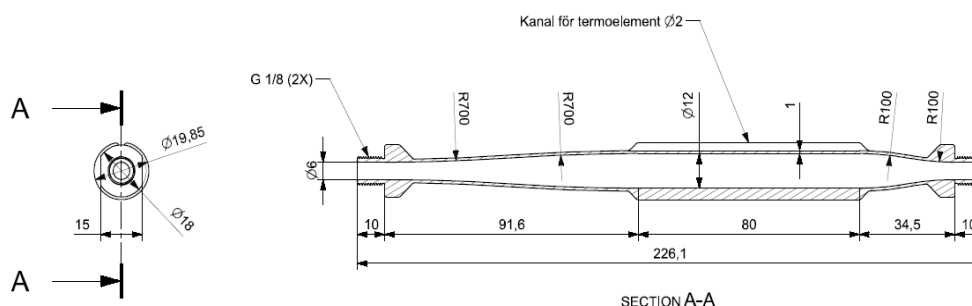


Bild 11. Provkroppens geometri indelad i tre sektioner: Expansion. Test. Kontraktion. Tre olika innerstrukturer valdes med olika ytor och i olika material, se bild 10 och bild 12.

Provkropparnas geometri har bestämts efter CFD-simulering för att säkra att vätskeflödet inte återcirkulerar vid ett flöde på 5 l/min. Provkropparna har också utformats för att kunna tillverkas additivt utan att behöva någon inre stödstruktur, förutom i öppningarna.

En begränsning för provkropparna har varit maximal höjd för stående tillverkning i de tillgängliga AM-maskinerna. Bild 14. Några geometriska data för provkropparna baserade på flödessimulering:

- Ytterdiameter 20 mm
- Inlopp/utlopp diameter 6 mm
- Innerdiameter 12 mm
- Längd totalt 226 mm
- Expansionslängd 91,65 mm från diam 6 mm till diam 12 mm
- Testlängd 80 mm
- Kontraktionslängd 34,64 mm

8.2 Design av provkroppar

Initialt bestämdes att ta fram provkroppar i rostfritt 420, tillverkade av Chalmers, och i Aluminium AlSi10Mg tillverkade av Lunds Universitet. Variabler hos provkropparna: Inre design, material och ytbehandling av insidan enligt bild 12. Två olika ytfinheter har utvärderats, dels obearbetad yta, dels med abrasivt flytande medium, så kallad "extrude honing".

	Inner design	Material	Inner treatment	Nr:s to be AM	Marking	AM by	Post treated
1	Ribbing	Alu	As printed	4	RA 1-8	LTH	IVF thread all specimens and send for post treatment
2			Honed	4		LTH	
3	Ribbing	Stainless	As printed	4	RS 1-12	Chalmers	
4			Honed	4		Chalmers	
5			Chem treat	4		Chalmers	
6	Gyroidal	Alu	As printed	4	GA 1-8	LTH	
7			Honed	4		LTH	
8	Gyroidal	Stainless	As printed	4	GS 1-12	Chalmers	
9			Honed	4		Chalmers	
10			Chem treat	4		Chalmers	
11	Tube	Alu	As printed	4	TA 1-8	LTH	
12			Honed	4		LTH	
13	Tube	Stainless	As printed	4	TS 1-12	Chalmers	
14			Honed	4		Chalmers	
15			Chem treat	4		Chalmers	

Bild 12. Tillverkning av provkroppar

Inre geometri: Rör, plattor/ribbor och gyroid.

Material: Aluminium AlSi10Mg och rostfritt 420.

Tre innerbehandlingar planerades, kemisk för rostfritt genomfördes ej

Tillverkningen utfördes av Chalmers och Lunds Universitet.

8.3 Fokus på additivt tillverkade provkroppar i aluminium

Under arbetet med prov av värmeöverföring framkom att de rostfria provkropparna gav alltför liten temperaturskillnad och fick därigenom utgå till förmån för provkropparna i aluminium. En möjlighet kan vara att t ex seriekoppla uppvärmda provkroppar, vilket inte fanns utrymme för i projektet.

Material i provkropparna var AlSi10Mg aluminium, bild 13. Tillverkade provkroppar i bild 14.

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn
Bal.	9-11	0.20-0.45	≤0.55	≤0.10	≤0.35	≤0.05	≤0.10	≤0.05	≤0.05

Bild 13. Den kemiska sammansättningen för materialet i provkropparna.



Bild 14. Tillverkningen har gjorts i en 3D Systems ProX DMP 320 maskin hos Lunds Universitet. Varje lager var 30 μm . Effekt varierade från 260 W till 300 W. Högsta hastighet 2000 mm/s.

Provkropparna tillverkades med små lätt borttagbara stödstrukturer i öppningarna. Resterande pulver avlägsnades med tryckluft och dammsugare.

8.4 Testrigg och val av olja för mätning av värmeöverföringsförmågan

För att utvärdera olika provkroppars värmeöverföringsförmåga byggdes en testrigg, bild 15.

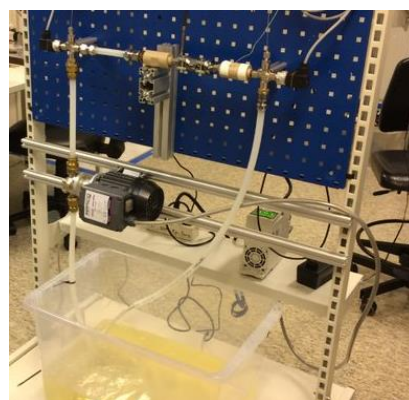
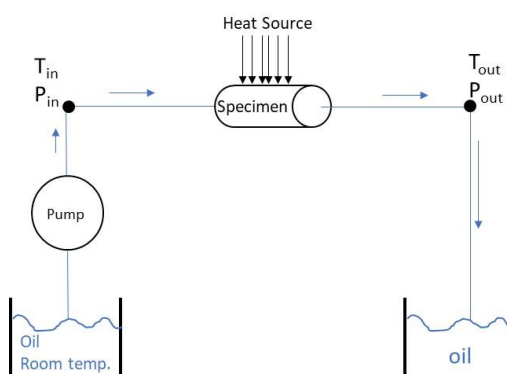


Bild 15. Principen för testriggen. Olja i rumstemperatur med rätt viskositet pumpades genom en uppvärmd provkropp "specimen" och temperaturen samt trycket hos oljan mättes före och efter uppvärmningen.

I testriggen värmdes provkropparna av ett noselement rörspiral, modell Z122 från International Heating Products. Värmarens rörspiral har en innerdiameter på 20 mm och en längd av 80 mm. För provning värmdes provkropparna under 30 min med värmeelementet inställt på 300°C. Värmeelementet var fortsatt påslaget under provningen, då olja pumpades från tanken med rumstempererad olja, t h i bild 15. Pumpen var en brons-impeller pump, 50010 Series från JABSCO.

Värmeöverföringsförmågan baseras på ekvation 1: $\Delta T = T_{out} - T_{in}$
Tryckfallens storlek enligt ekvation 2: $\Delta P = P_{in} - P_{out}$

Val av olja med rätt viskositet

Motorolja har i det valda exemplet kvaliteten 10W30 och en drifttemperatur på 120°C. I testriggen valdes av säkerhetsskäl att genomföra provningen med olja som höll rumstemperatur. Värmeöverföringen påverkas starkt av viskositeten hos oljan. Därför beslöts att mäta olika oljors viskositet, för att välja en olja som vid rumstemperatur har en viskositet nära viskositeten hos en motorolja 10W30 med en drifttemperatur på 120°C. Mätningarna utfördes med en rheometer (CS Rheometer Nova, Rheologica Instruments AB, Sweden) bild 16.

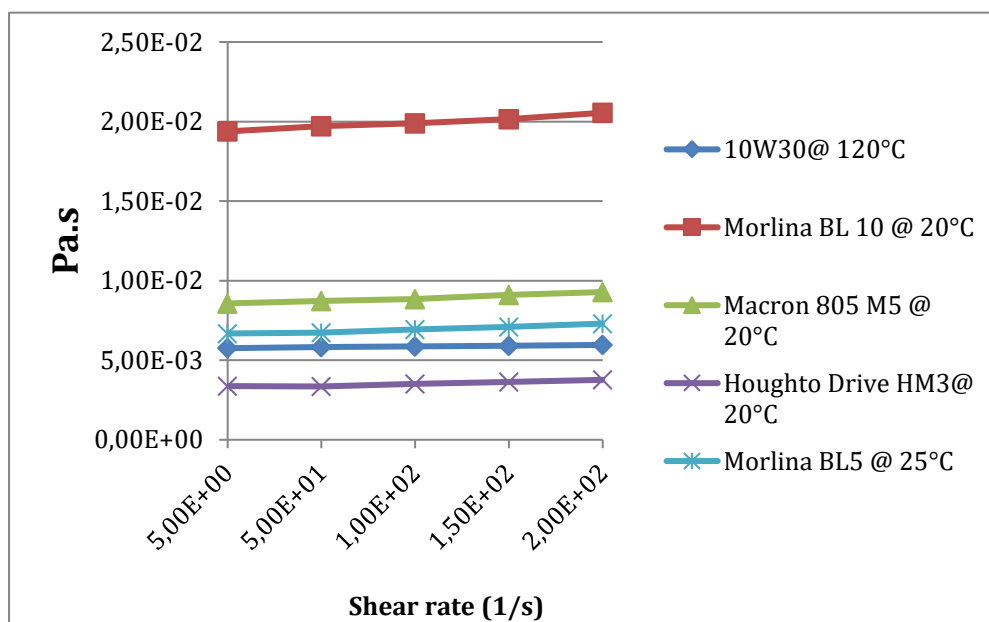


Bild 16. Viskositeten hos olika oljor vid rumstemperatur i jämförelse med viskositeten hos en motorolja med kvaliteten 10W30 vid 120°C.

Mätresultaten enligt bild 16 visar att viskositeten vid 25°C för Morlina BL5 stämmer väl överens med viskositeten hos 10W30 med temperaturen 120°C. För provningarna av värmeöverföringsförmågan valdes oljan Shell Morlina S2 BL 5.

8.5 Tryckfall hos provkroppar beroende av innerstruktur och ytfinhet

Tryckfallet i provkropparna är beroende av innerstrukturen, här ytfinheten. Tryckfallen vid flödet 5 l/min för obehandlade provkroppar i bild 17 a och efter hening för ökad ytjämnhet i bild 17 b.

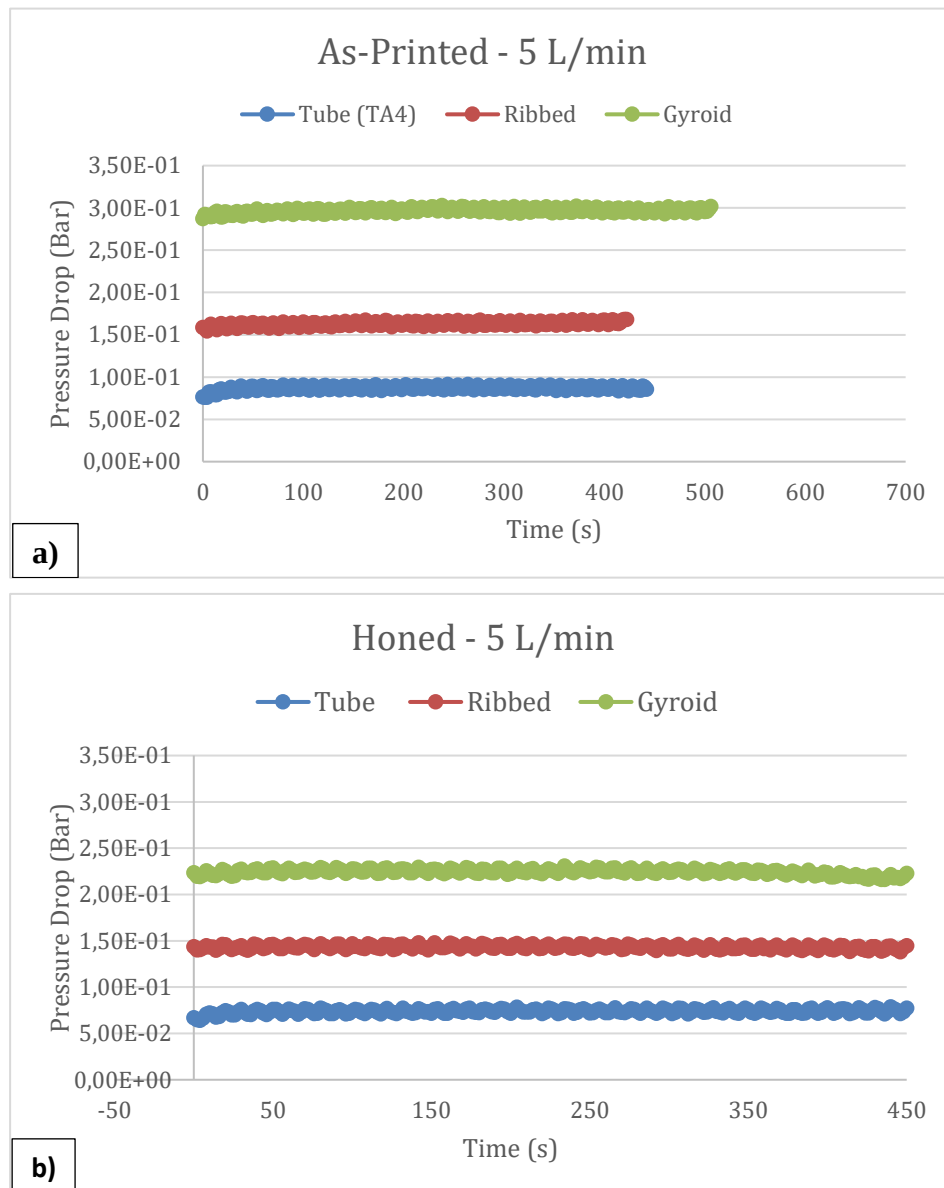


Bild 17. Hur additivt tillverkade provkroppars olika innergeometrier och ytfinhet påverkar tryckfallet vid ett flöde på 5 l/min. a) obehandlade provkroppar b) hennade ytor. Högst tryckfall hos provkroppar med gyroid innerstruktur, lägst hos rörformade provkroppar utan någon innerstruktur.

Vid ett flöde på 0,5 l/min blir tryckfallen avsevärt lägre än vid 5 l/min. Även vid det lägre flödet orsakar gyroid-strukturen störst tryckfall och en rörformig provkropp lägst tryckfall. Obehandlade innerytor ger ett något högre tryckfall än behandlade ytor hos provkroppar med gyroid- och platt-strukturer. Bild 18.

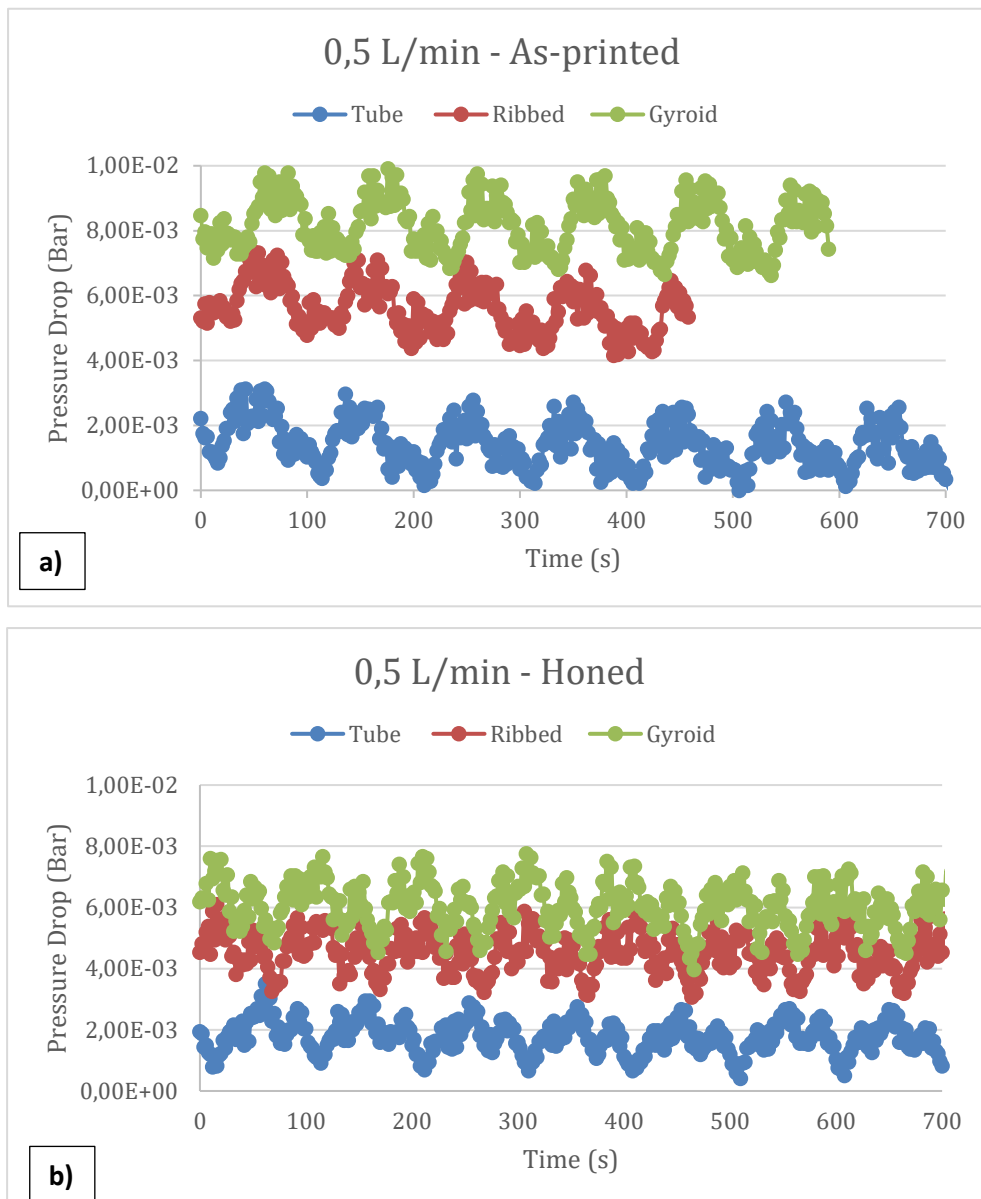


Bild 18. Innergeometrins påverkan av tryckfallet hos provkroppar vid ett flöde på 0.5 l/min a) Obehandlad yta b) honad yta

8.6 Förmåga till värmeöverföring hos olika provkroppar

Värmeöverföring med henade ytor

Värmeöverföringen mäts genom skillnaden i temperatur hos oljan in respektive ut ur den uppvärmda provkroppen i två flödesfall 5 l/min and 0.5 l/min. För henade provkroppar ser gyroid-strukturen ut att ge bäst resultat av de tre olika innerstrukturerna oavsett flödet. Bild 19. De andra två strukturerna ger i stort sett samma effekt. De korta provkropparna ger tydliga men små temperaturskillnader mellan de olika innerstrukturerna.

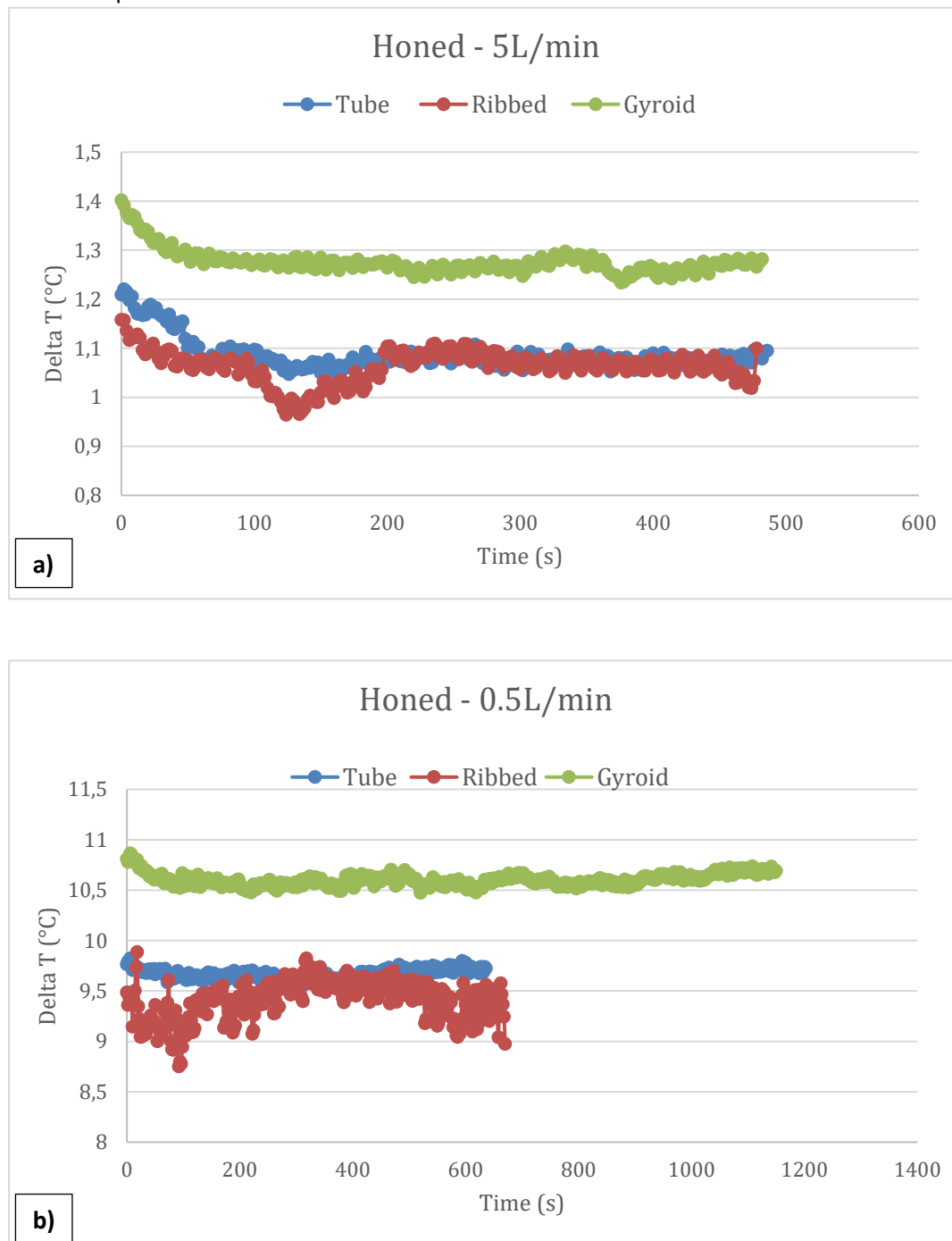


Bild 19. Påverkan av innergeometrins utformning på värmeöverföring hos henade provkroppar vid oljeflödena a) 5 l/min b) 0.5 l/min.

Värmeöverföring vid obehandlade provkroppar

Hos obehandlade provkroppar ser rörstrukturen ut att ge lägst värmeöverföring av de tre olika. Skillnaderna är dock små. Bild 20.

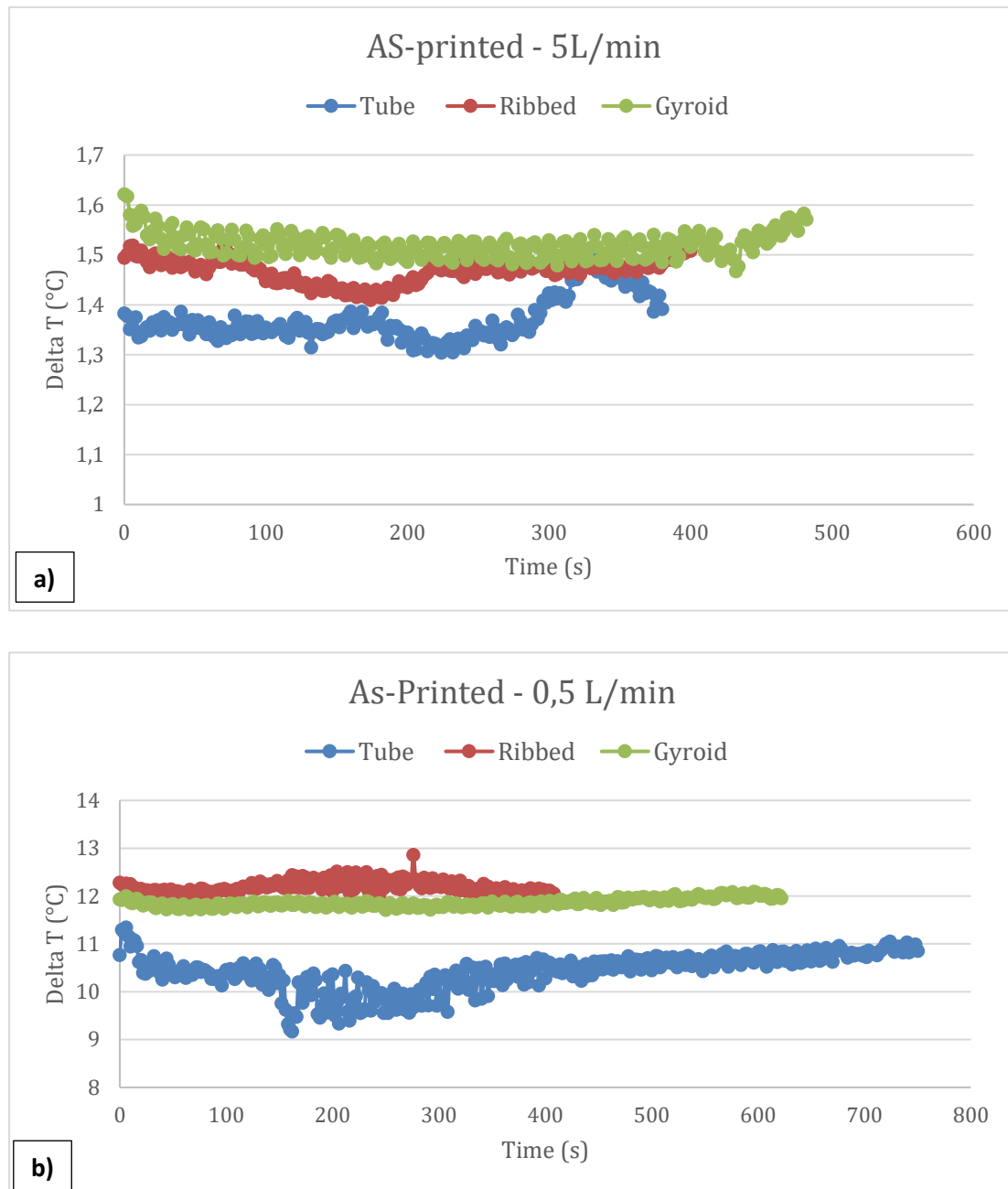


Bild 20. Innergeometrins inverkan på värmeöverföringsförmågan hos obehandlade provkroppar vid a) 5 l/min b) 0.5 l/min. Tube/Rör. Ribbed/Plattor. Gyroid.

Obehandlade och henade provkroppar

Additivt tillverkade obehandlade provkroppar har högre värmeöverföringsförmåga än henade med finare yta. Bild 21.

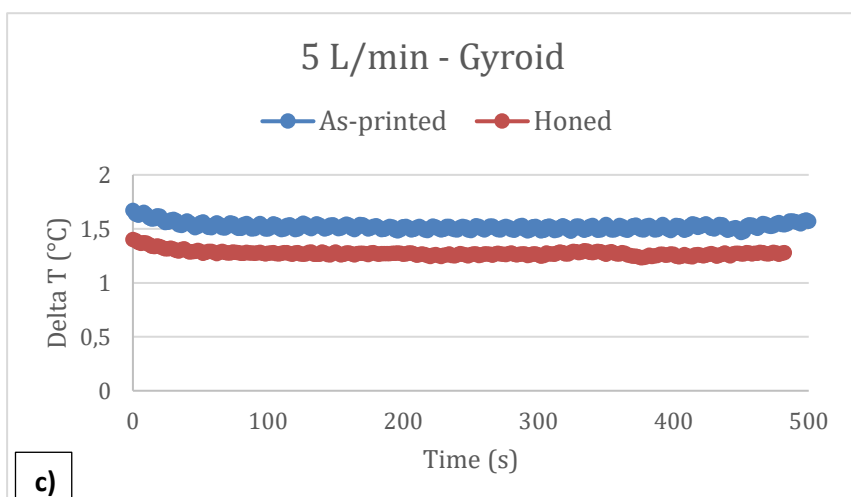
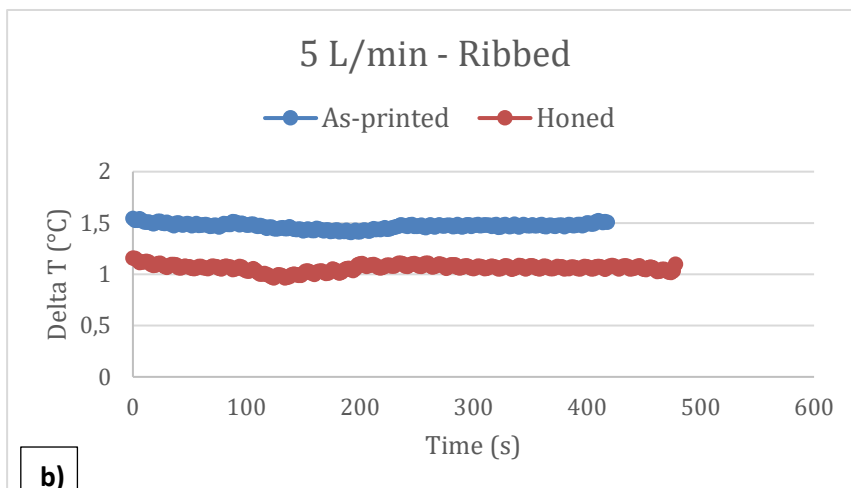
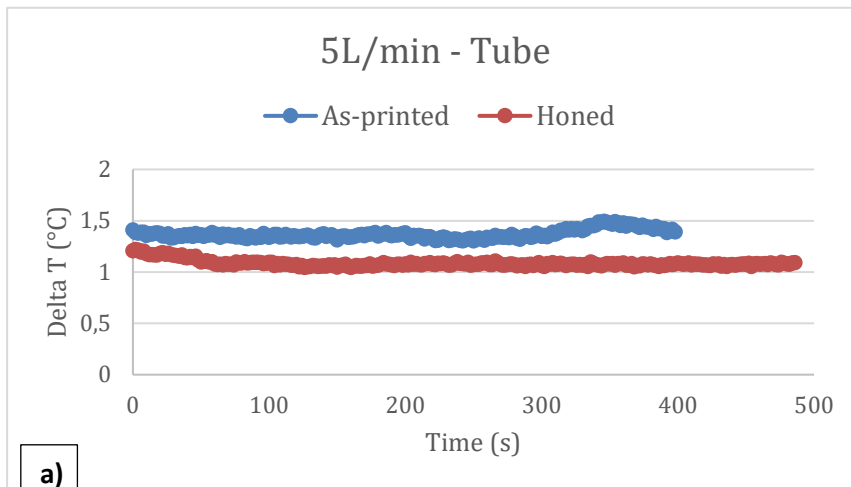


Bild 21. Inverkan på värmeöverföringsförmågan utifrån två ytstrukturer: Obehandlad (blå kurva) respektive henad (röd kurva). a) Tube/Rör b) Ribbed/Plattor c) Gyroid.

8.7 Simulering av strömningsdynamik (CFD) i provkropparna

Simulering av strömningsdynamik, CFD-simuleringar, har gjorts för tryckfall i provkroppar med antagande av släta innerytor hos provkropparna. Hänsyn har alltså inte tagits till ojämnheter i ytan. Simuleringarna kunde ganska exakt förutsäga de tryckfall som uppmätts experimentellt. Bild 22.

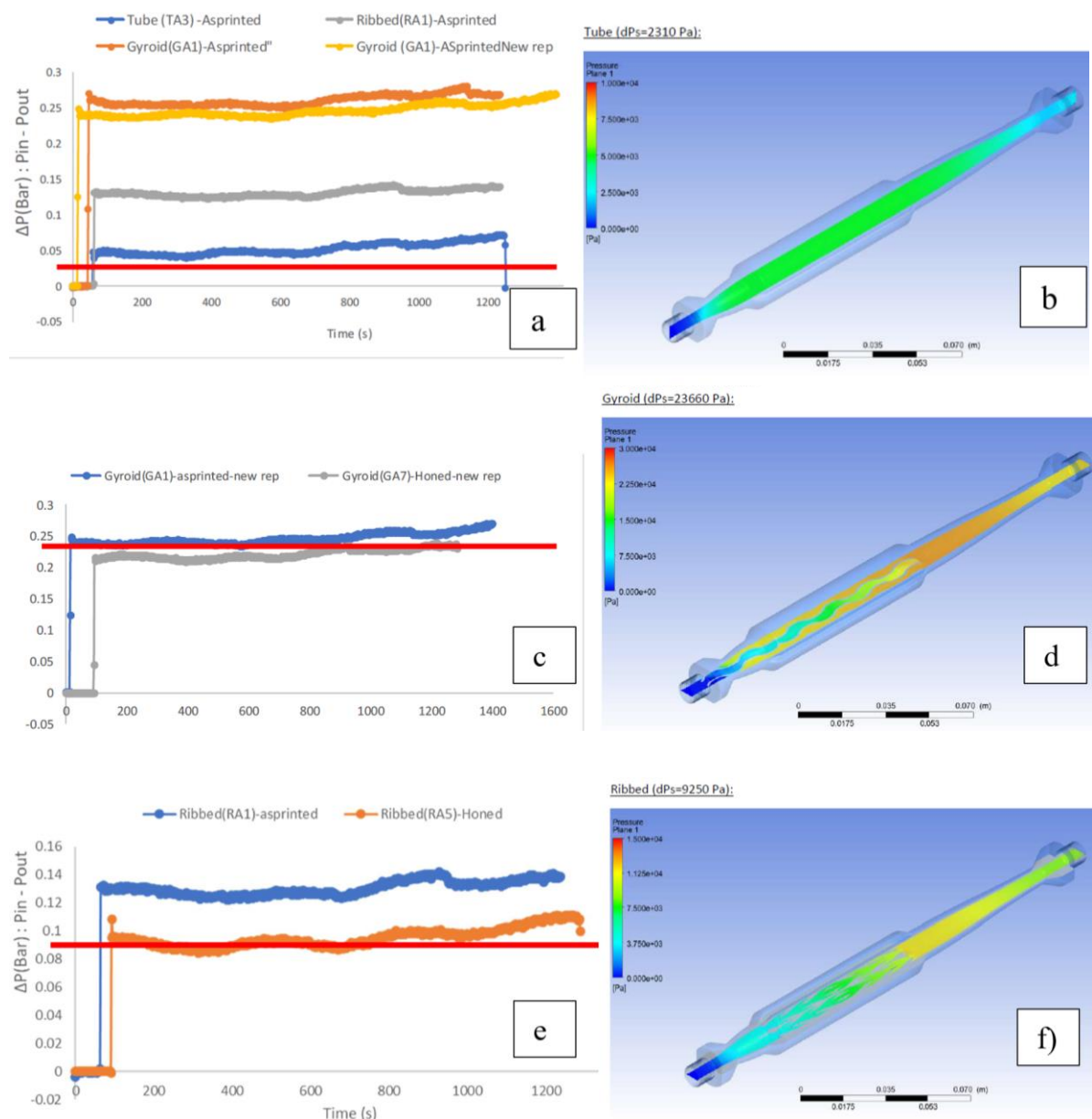


Bild 22. CFD-simulering av tryckfallet vid flödet 5 l/min. Den röda horisontella linjen i tabellerna visar de simulerade värdena för a) och b) Tube/Rör c) och d) Gyroid e) och f) Ribbed/Plattor.

Simuleringsresultaten av oljetemperaturskillnaden visas i bild 23. Simuleringarna bygger på antagandet att inloppsoljans temperatur är 293 K. Temperaturskillnaden för strukturerna gyroid och räfflad överskattas i simuleringarna, se bild 23 b och c. En högre inloppstemperatur i simuleringarna resulterar i en lägre temperaturskillnad, särskilt för gyroid- och ribbproverna. En räfflad innerstruktur och en oljeflödeshastighet på 0,5 l/min ger vid antagen inloppstemperatur 303K (istället för 293K) en minskad temperaturskillnad från 20 K till 16,5K.

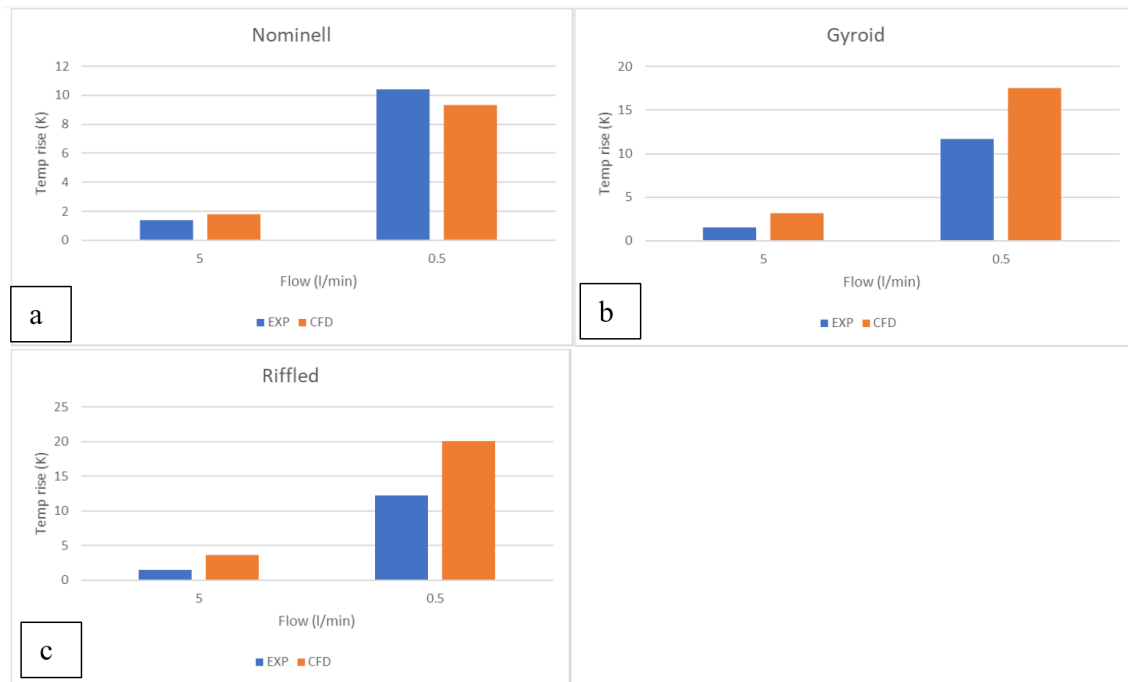


Bild 23. CFD-simulering av förändrad oljetemperatur ($T_{ut} - T_{in}$) för olika provkroppar, a) Tube/Rör, b) Gyroid och c) Riffled/Ribbed/Plattor. Orange staplar visar resultat av CFD-simuleringen och blå staplar visar experimentella mätdata.

8.8 Sammanfattning och reflektion om värmeöverföring i provkroppar

En kort sammanfattning av resultaten:

- Resultaten av tryckfallet är som förväntat
- Additivt tillverkade ytor som är obehandlade visar bättre värmeöverföringsförmåga än henade och därigenom slätare ytor. Den större yta som de obehandlade och ojämna ytorna har bör därför kunna öka förmågan att överföra värme jämfört med en slätare yta.
- Generellt visades förbättringar i värmeöverföringen med de mer komplicerade inre strukturerna. De små skillnader som uppmäts mellan olika inre strukturer kan bero på otillräcklig längd på provkropparna, vilket gör att vätskan alltför snabbt passerade de uppvärmda provkropparna.
- Det fanns i gyroid- och platt-strukturerna designfel som ledde till oljefickor och ineffektiva ytor. Detta avslöjades genom datortomografi och analys av CAD-modellerna.

En slutsats utifrån punkterna ovan visar – trots begränsningarna – att studien når resultat som ligger i linje med de förväntade. En tydlig rekommendation är dock att göra en mer omfattande studie om värmeöverföring, som reducerar eller eliminerar de begränsningar detta projekt haft.

8.9 FoU om värmeöverföring i additivt tillverkade modeller för värmeväxling

Ett omfattande arbete om additivt tillverkade värmeväxlare har genomförts vid Lunds Universitet i samband med ReLed-3D. Arbetet har utförts som ett examensarbete, master thesis, av Isak Wadsö and Simon Holmqvist⁵.

Arbetet har utförts med ett helhetsperspektiv, med litteraturstudier, innovationsprocess med nytänkande, simulering, utvärdering och produktutveckling av provkroppar. Provkropparna har sedan utvärderats experimentellt och med simulering. Bild 24 och 25.

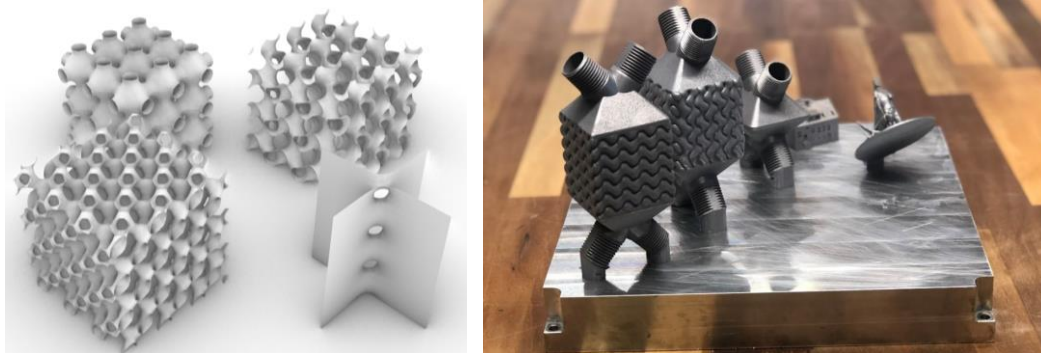


Bild 24. T v: Olika innerstrukturer designades och simulerades, varav två tillverkades med AM, t h. Material var aluminium AlSi10Mg. Bilder: Wadsö, Holmqvist.

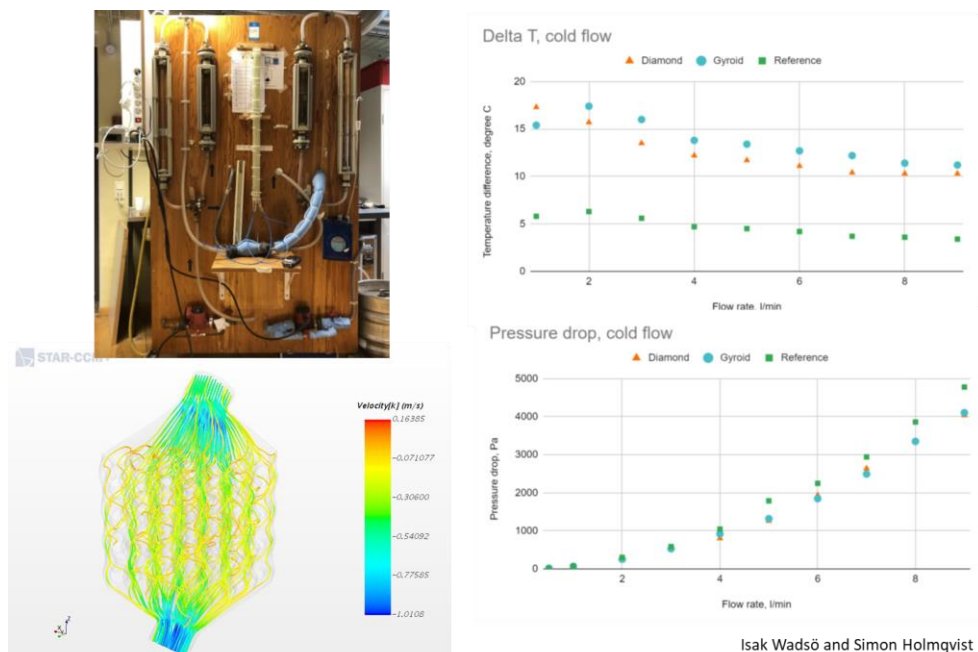
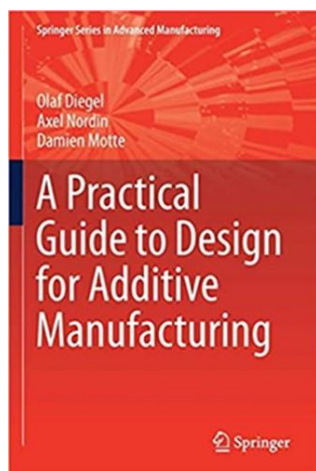


Bild 25. Provgigg och resultat av provning utifrån flöde och mottryck. Tre strukturer provade varav en referens.

En sammanfattning av resultaten hämtade ur examensarbetet: ”Denna rapport antyder likvärdig användbarhet som värmeväxlare för de två föreslagna utformningarna, och demonstrerar deras tillverkningsbarhet. Innerstrukturen erbjuder hög blandning och en jämn flödesfördelning”.

⁵ Additively Manufactured Heat Exchangers
Development and Testing
Copyright © 2020 Isak Wadsö and Simon Holmqvist
Published by Department of Design Sciences
Faculty of Engineering LTH, Lund University
[download \(lu.se\)](https://www.lth.se/download/lu.se)

9 Guide för additiv tillverkning



Part Requirements for AM

The ReLed-3D guide to industrial Additive Manufacturing

How to select, design and produce metal components by AM



Bild 26. T.v: Under projektiden har Lunds Universitet publicerat "A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing". En omfattande vägledning om additiv tillverkning. Författare: Diegel, O. Nordin, A. Motte, D.⁶

T.h: En riktad "ReLed-3D guide to industrial Additive Manufacturing" är ett förslag till vägledning till företag och fallstudier inom AM. Lunds Universitet, RISE IVF och AB Volvo. Se även kap 10.

En guide för vägledning om additiv tillverkning har tagits fram av Lunds Universitet, bild 26. En riktad industriell vägledning har skett under projektet utifrån:

- Innovationsprocess för nytänkande
- Utbildning
- Riktad FoU för kunskapsuppbyggnad
- Industriella fallstudier

En processbild för val av komponenter ges i bild 27, som kompletteras med åtta "gyllene regler" för att välja AM på följande sida.

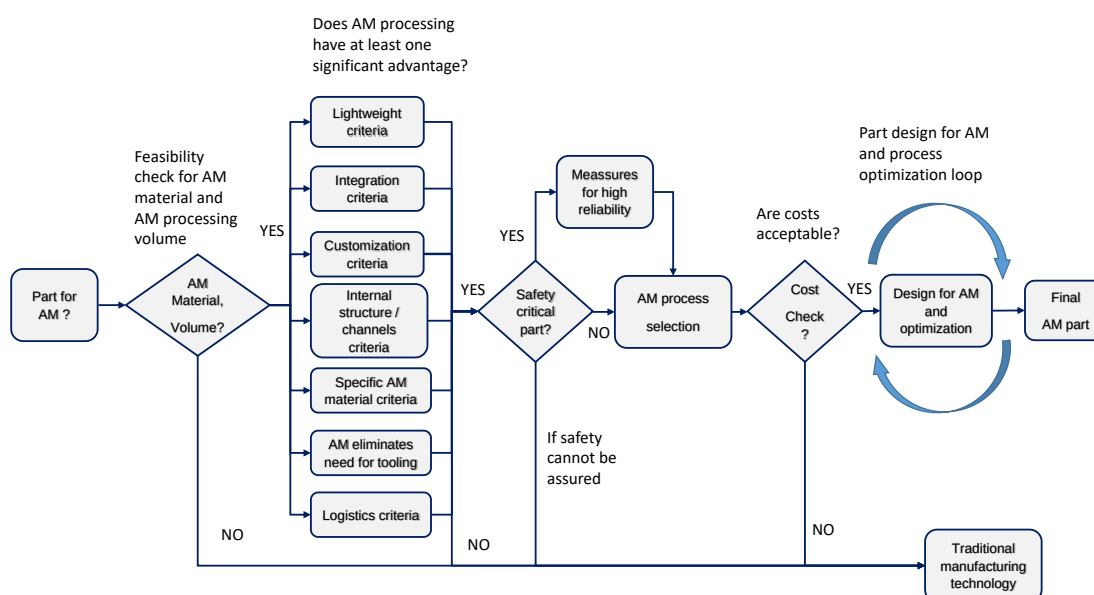


Bild 27. Vägledning för att välja om en komponent (part) är lämplig kandidat för AM eller inte. Ref: Nordin, A. Tavcar, J. Lunds Universitet.

⁶ Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer Verlag 2020, ISBN 978-981-13-8283-3

9.1 Gyllene regler för att välja Additiv Tillverkning

De krav som gäller en komponent eller produkt utifrån funktion, konstruktion och design bör vara utgångspunkt oavsett tillverkningsmetod. För att utvärdera om AM är lämplig för en viss komponent eller produkt, ges här åtta "gyllene regler", som en utgångspunkt för en sådan analys⁷.

1. Bör AM användas i första hand?

- a. Vilka är kraven (mekaniska, materialegenskaper, toleranser, ytjämnhet...)?
- b. Vad är designfriheten?
- c. Finns det fördelar att uppnå genom AM som:
 - i. Estetisk frihet. Komplexitet är gratis
 - ii. Lättvikt. Optimering
 - iii. Materialanvändning
 - iv. Kundanpassning av form eller funktion
 - v. Konsolidering för att reducera antalet komponenter
 - vi. Reducerad efterbearbetning
 - vii. Verktygsfri produktion (t ex för prototyper eller för låga antal)
 - viii. Kortare tid till marknaden.

2. Designa alltid med orienteringen för AM i åtanke

3. Gör en design för AM som minimerar eller eliminerar stödstrukturer och stödmaterial

4. Planera och överväg alla steg efter tillverkningen. Exempel:

- a. Borttagning av bottenplatta och stöd
- b. Borttagning av pulver
- c. Värmebehandling, bearbetning, ytbehandling, montering

5. Undvik stora materialmassor. De kostar mycket, skapar restspänningar och har lågt tekniskt värde

6. Det kostar inte mer att göra produkten vacker. Addera användbara detaljer, logotyper, artikelnummer etc

7. Gör mjuka övergångar i alla vinklar, hörn etc. Skarpa vinklar och hörn skapar spänningskoncentrationer som ökar behovet av stödstrukturer och riskerar deformationer och defekter

8. Överväg om funktioner ska tillverkas med AM eller skapas i efterhand. Exempel:

Om en hålöppning måste fyllas med stödstruktur för att inte deformeras, kan det vara bättre att

- a. Inte göra hålet med AM utan borra det i efterhand
- b. Skapa en design med droppform som i bästa fall inte behöver någon stödstruktur

⁷ Referens: De "Gyllene reglerna" är hämtade från Lunds Universitet, här något modifierade

9.2 Fallstudier som metod i en utvecklingsprocess för AM

Fallstudier för AM kan övergripande identifieras som:

- Komponenter i produktionen, till exempel verktyg, fixturer och gripdon till robotar
- Artiklar som ingår i leveranser till kunder som
 - Nya produkter
 - Reservdelar.

Under en längre tids samarbete med industriföretag kan en tydlig mognadsprocess identifieras. Det är tidskrävande att omsätta möjligheter med AM till en "standardprocess" inom företagen. Här ryms både tekniska och ekonomiska utmaningar, som att:

- Välja komponenter där AM ger tillräckliga fördelar jämfört med traditionell tillverkning
- Kvalitetssäkra komponenter för en marknad som kan vara global
- Ta fram fakta för en korrekt ekonomisk jämförelse mellan att tillverka med AM och i befintlig leverantörskedja under en komponents livslängd
- Ta fram fakta om ekonomiska brytpunkter att använda AM för reservdelstillverkning
- Bedöma om AM, inklusive efterbearbetning, ska lokaliseras mer centralt eller distribueras till mer lokala resurser.

Mognadsprocessen för AM innebär också att tillgodogöra sig kunskap och kompetens om utvecklingen av AM, en stor uppgift i sig.

10 Utvecklingsprocess med industriella fallstudier

Strax före pandemin 2019/2020 identifierades en potential till synergi mellan ReLed-3D och ett parallellt initiativ kallat Concept Line för additiv tillverkning, där bland annat Volvo AB / Volvo Technology och Höganäs varit parter i både ReLed-3D och i Concept Line. Detta samarbete har varit mycket konstruktivt, och har inneburit arbete med fallstudier, för att visa möjligheter och begränsningar med additiv tillverkning, och bidra till en industriell innovationsprocess

Resultat är en tydligare och djupare förståelse för hur additiv tillverkning kan integreras i ett företag med kvalificerad produkt- och produktionsutveckling, där många medarbetare och leverantörer är involverade. Samarbetet mellan projekten har ur ett ReLed-3D perspektiv enbart medfört en förstärkning och fördjupning av de insatser för AM som redan inrymts i ReLed-3D projektet. Tack vare samarbetet och förlängningen av ReLed-3D, har pandemieffekterna för projektet kunnat hanteras och i stort elimineras. En förändring är dock att den ursprungliga fokuseringen på fallstudie med värmeväxlare har modifierats. Både Concept Line och ReLed-3D har avslutats under hösten 2021.

Redovisningen av fallstudierna i detta kapitel har i huvudsak gjorts av David Ohlsson, RISE.

10.1 Fallstudier för AM: Arbetssätt och lärande

Ett generellt resultat av de industriella fallstudierna är att utgå från ett systematiskt och metodiskt arbetssätt, som redovisas i följande punkter:

- | | |
|--------------------|------------------|
| - Bakgrund | Background |
| - Utmaningar | Challenges |
| - Lösning/Resultat | Solution/Results |
| - Lärdomar | Lessons learned |

En vägledning i detta arbete är också de gyllene reglerna, se kap 9.1.

Fallstudierna har successivt ökat i komplexitet utifrån olika perspektiv. Exempel är:

- Komponenter med allt högre krav på beräkningar, provningar och kvalitetssäkring
- Ökat behov av rättvisande jämförelser av livscykelkostnader för en komponent, om den
 - o Tillverkas med AM eller
 - o Tillverkas traditionellt av leverantörer och i leverantörskedjor

10.2 Tre fallstudier för AM

Tre fallstudier för AM är beskrivna i rapporten:

1. Remspännare
2. Termostatinnestutning, "thermostat housing"
3. Fjäderförankring, "spring anchorage".

För både Remspännaren och Fjäderförankringen gäller omkonstruktion, med syfte att minimera vikt och samtidigt anpassa komponentgeometrin till additiv tillverkning med hjälp av topologioptimering. För Fjäderförankringen utvärderades dessutom flera material.

För Termostatinnestutningen är både geometri och materialval låsta, och fokuset var istället att utforma beredningen för AM och geometrisäkring, samt förenkla efterbearbetningen, främst genom borttagande av stödstrukturer. Detta arbete uttrycker sig rent praktiskt som en iteration mellan termomekanisk processimulering och beredningen i sig, där utfall för olika komponentorienteringar utvärderats.

10.2.1 Remspännare

Bakgrund

Remspännaren är en momentnyckel som används vid motormontage hos Volvo Penta i Vara. Här är förutsättningarna full designfrihet, med en definierad designvolym med ett föreskrivet maxmoment, se bild 28. Materialet är rostfritt stål 316L.

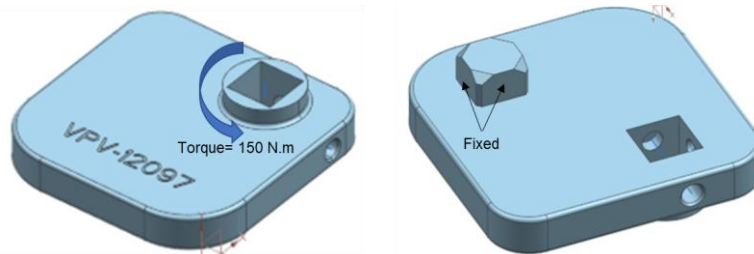


Bild 28. Utgångsläge för fallstudie remspännare.

Utmaningar

Målet är att minimera vikt och samtidigt uppfylla krav på hållfasthet.

Lösning/Resultat

Omkonstruktion med topologioptimering leder till komponentgeometri visad i bild 29.

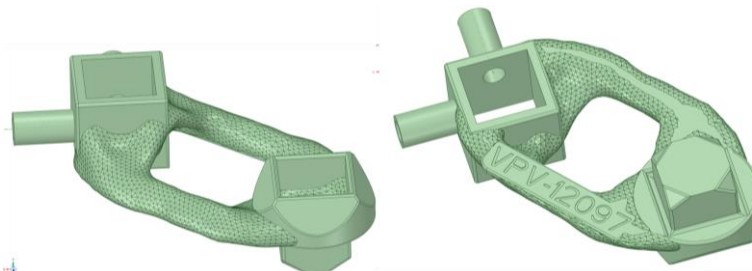


Bild 29. Omkonstruerad och topologioptimerade remspännare. Materialbesparing ca 80%.

Materialbesparingen är i detta skede drygt 80%. Olika komponentorienteringar med tillhörande stödstruktur utvärderades och printades, se bild 30.

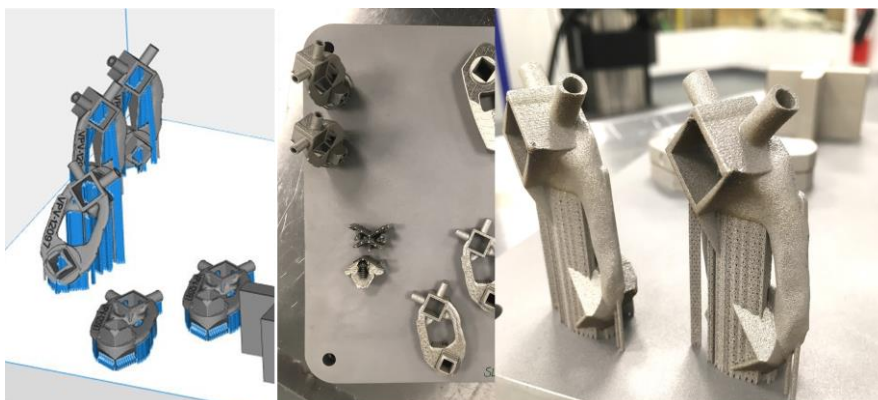


Bild 30. Additivt tillverkade remspännare.

Lärdomar

Omfattande stödstrukturer adderar materialbehov som inte kan återanvändas, samt ökar tid och kostnad för borttagning och efterbearbetning. En analys och optimering behöver göras av värdet med AM, som knyts till betydelsen av låg vikt, funktionalitet och ergonomisk anpassning, eventuell komponentkonsolidering etc hos en färdig komponent. En lösning som kombinerar metall för högt belastade delar och ett omslutande plasthandtag kan vara ett alternativ.

10.2.2 Termostatinneslutning "Thermostat Housing"

Bakgrund

Termostatinneslutning (Thermostat Housing) är en typ av rörkomponent i lastbilens motorkylkrets. Som namnet indikerar innehåller den en termostat, som reglerar kylmediets flöde, se bild 31. I grundutförandet är det en gjuten komponent i grå- eller segjärn, vilkas anslutningsytor maskinbearbetas. Det är en motorkomponent som utsätts för stora temperaturväxlingar, det vill säga en kritisk komponent med höga prestandakrav.

Utmaningar

Denna fallstudie handlar om att utvärdera möjligheten att tillverka en reservdel med egen-skaper så nära den gjutna förlagan som möjligt. Ersättningsmaterialet väljs till rostfritt stål 316L.

Risken för tillverkningsinducerade fel, såsom deformationer och separation från byggplatta och/eller stödstruktur, ökar med geometrins storlek och komplexitet. Komponenten är i sammanhanget stor, den tar upp en stor del av byggvolymen (280x280x365 mm) i RISE IVF:s största 3D skrivare. Dessutom har den en komplex geometri och höga geometriska toleranskrav för dess 4 anslutnings- eller interfaceytor.

En så stor komponent tar flera dagar, upp till en vecka att skriva ut, vilket motiverar en omfattande analys för att undvika avbrott och omstart av tillverkningen, men också för att minimera risk för tillverkningsinducerade avvikelser på slutprodukten.

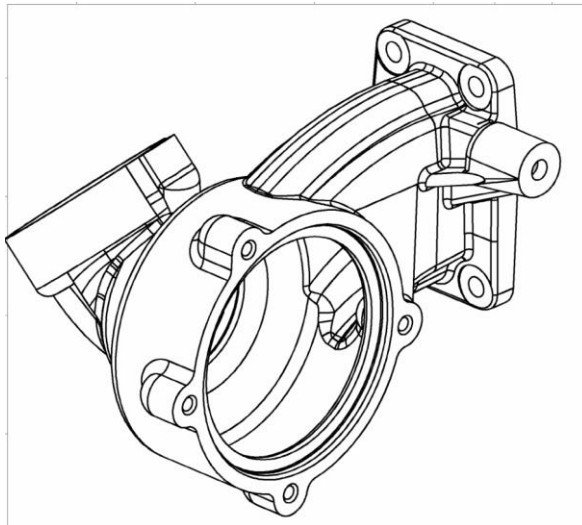


Bild 31. Fallstudie Termostatinneslutning.

Då inga konstruktionsanpassningar kan göras, begränsas frihetsgraderna för AM till processparametrar, orientering och dimensionering av stödstruktur. Processparametrar, till exempel lagertjocklek lasereffekt och -hastighet kan i princip också användas för att minimera byggtid och tillverkningsinducerade defekter, men här fokuseras på de två förstnämnda frihetsgraderna, orientering och stödstrukturkonstruktion. Utvärderingen av olika scenarios görs med hjälp av processimulering, en termomekanisk finita elementanalys. En generell, beprövad processparameteruppsättning för materialet 316L används i analyserna och i tillverkningen. Man kan säga att det handlar om en simuleringsdriven dimensionering av stödstruktur för olika orienteringar.

Genomförande

I beredningsprogrammet Materialize Magics tas flera "skisser" fram med ett orienteringsverktyg där man matar in och viktar förutbestämda geometriska parametrar. Med hjälp av detta verktyg kan man få fram ett stort antal förslag som kan analyseras och förbättras vidare varvid man kontinuerligt utesluter kandidater. I bild 32 visas tre av kandidaterna optimerade på "minimal stödyta" (på komponenten), minsta fotavtryck samt minsta största scannat lager.

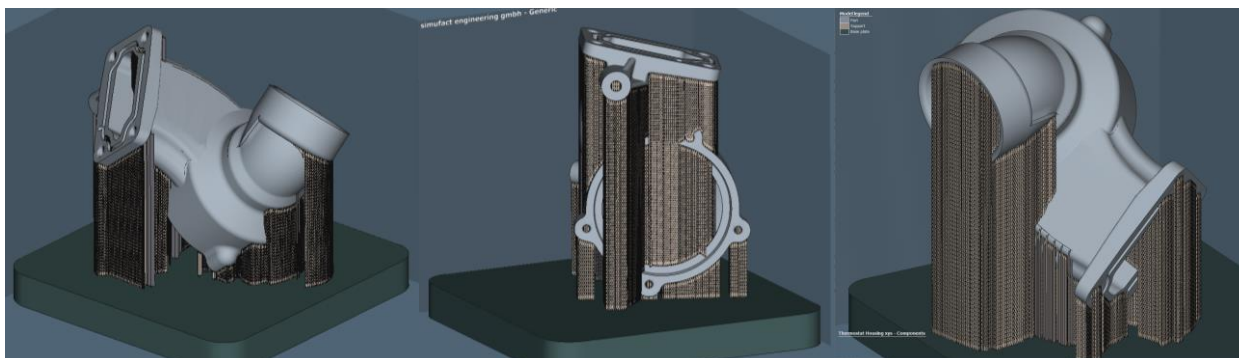


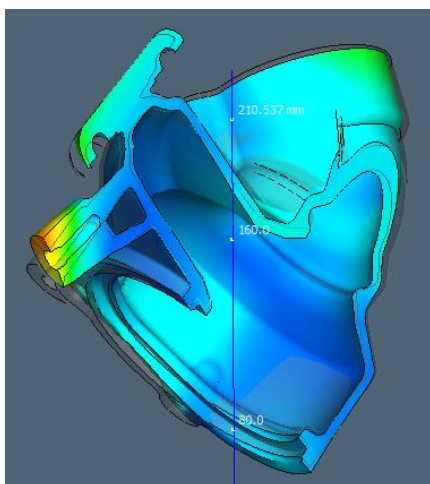
Bild 32. Orienteringar, från vänster till höger "Minimize support", "XY projection" och "XY Section".

I detta skede görs en ingenjörsmässig bedömning om för och nackdelar med dessa tre orienteringar och en prioritering mellan olika, mer eller mindre kvantifierbara utparametrar, bild 33. Borttagande av stödstruktur på insidan av komponenten bedöms som en svårighet och prioriteras högst. Sedan i fallande ordning, risk för deformerad slutprodukt, risk för avbrott av tillverkningen (sk. Blade crash) och slutligen byggtid.

General Requirerments	Priority	Minimise support	XY Projection	Max XY section
External support stucture (ease of removal / surface roughness)		Not so much support on the outside (-)	Much	Quite
Internal support stucture (ease of removal / surface roughness)	1	Most support in the big pipe - not so much otherwise	Not so much	Much
Deformation	2	See "interfaces"	See "interfaces"	See "interfaces"
Buildability	3	No sudden changes of cs	Pipe connection horisontal, risc for bending springback	Area reduces towards the end of build - good from
Build time / cost	4	best guess 30 my - 6 days	best guess 30 my - 6 days	best guess 30 my - 6 days
Z-height		213 mm	222 mm	207 mm

Comments related to the interfaces	Minimise support	XY Projection	Max XY section
Square Flange	No support on interface surface (+), Shrink	Clean both in- and outside	Support in slot, otherwise clean
Pipe connection	Almost no support on interface surface (+)	Support on the interface but not so much on the	Clean both in- and outside
Threaded bold joint	Risc for springback (-) Shrinkline (-)	Horisontal but low risc for shrink lines	Clean outside, good buildability

Bild 33. Bedömning av beredningskandidater.



De tre huvudkandidaterna simuleras i mjukvaran Simufact, för att prediktera restspänningsutveckling, risk för tillverkningsavbrott, återfjädringseffekter vid borttagande av stödstruktur och byggplatta, samt kvarvarande deformationer. Att fånga stelningsprocess och restspänningstillståndet är jämfört med gjutning mer utmanande på grund av de extrema temperaturgradienterna vid AM, som är ett resultat av en koncentrerad värmekälla som rör sig snabbt. För att över huvud taget få fram ett bra resultat krävs stor följsamhet och noggrannhet i modelleringen, med känslighetsstudier för olika typer av antaganden och idealiseringar. Metoderna som används här är rent mekanisk, sk. inherent strain, och transient termomekanisk analys. I bild 34 visas ett exempel på predikterad återfjädring efter stödborttagning för ett vertikalt snitt.

Bild 34. Predikterad återfjädring efter stödborttagning. OBS överdriven skillnad mellan konturlinjerna av ursprunglig geometri och den predikterade geometrin i färgbilden.

Resultatet av simuleringarna analyseras och itereras med beredningen, där stödstrukturen förbättras för att möta de problem som predikteras i finita element analysen. Utvecklingsarbetet resulterar till sist i den slutliga beredningen och tillverkningen kan börja.

Resultat/lösning

Komponenten tog ca 6 dagar att tillverka, och första försöket lyckades med gott resultat, bild 35. Endast mindre defekter noterade vid den efterföljande inspektionen.

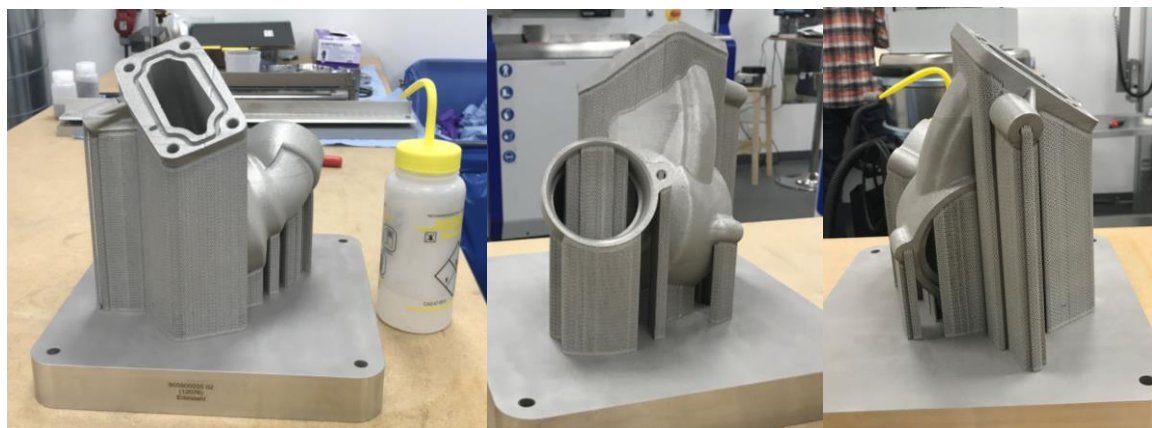


Bild 35. Additivt tillverkad termostatinneslutning i en SLM 280. Lyckades i huvudsak bli rätt första gången.

Operation Lista (OP)	Val	Beskrivning	Tid (h)
OP01 Set up	x	CAD anpassning & DfAM	8
OP02 Beredning	x	Beredning i Magics & KPV	12
OP03 Process Simulering	x	Process simulering - ANSYS/RISE	50
OP04 Pulver Siktning	x	Sikta och hantera pulver	8
OP05 Starta Byggjobb	x	Starta byggjobb	1
OP06 Printning	x	Print jobb	120
OP07 Plocka ut byggjobb	x	Rengöra bygget från pulver	2
OP08 Proverhantering	x	Hantera prover	2
OP09 Pulverhantering	x	Pulverhantering & förvaring	2
OP10 Städning	x	Maskin städning	12
OP11 Värmebehandling	x	Värmebehandla - HÖGAN ÄS	3
OP12 3DSkanning	x	Skanna hela utskriften - RISE	1
OP13 Gnistning	x	Gnista från byggplatan - BOMEK	4
OP14 Bearbetning byggplattor	x	Bearbeta byggplattor yttan - RISE	1
OP15 Bearbetningstödstruktur	x	Bearbeta stödstruktur - RISE	1
OP16 3DSkanning	x	Skanna hela utskriften - RISE	1
OP17 Bearbetning komponent	x	Bearbeta komponent/tolerans - RISE/VOLVO	8
OP18 3DSkanning	x	Skanna hela utskriften - RISE	1
OP19 Admin / Rapportering	x	Rapport / database uppdatering	2
OP20 Leverans	x	Skicka detaljerna	1

Bild 36. Operationslista och tidsåtgång för beredning, simulering, tillverkning (printning) och efterbearbetning av termostatinneslutningen i bild 35.

Lärdomar

Här beskrivs arbetet med en betydligt mer komplicerad produkt än tidigare fallstudie. Genom noggrann beredning och simulering/prediktering för AM, visas också att det går att komma rätt vid tillverkningen. Att genomföra tillverkningen "Printning" tar ca 6 dygn maskintid med för- och efterarbete, och komponenten är så stor att den i vald maskin måste tillverkas en i taget.

10.2.3 Fjäderförankring "Spring Anchorage"

Bakgrund

Fjäderförankringen (Spring Anchorage) är en kraftbärande del i lastbilens främre hjulupphängning, se bild 37. De mekaniska belastningarna kommer av fordonsaccelerationer såsom inbromsning, sväng etc. Det betyder att man behöver dimensionera både för maxlast och för lågcykelutmattning. Komponenten är också exponerad till en korrosiv utemiljö. En potential till viktoptimering genom omkonstruktion för additiv tillverkning av fjäderförankringen har identifierats av Volvo genom utvecklingsingenjörer på Chassiavdelningen. Inledande motiveringar och kravställningar illustreras i bild 38. Motsvarande omkonstruktion för ett gjutningsscenario görs parallellt av Volvo själva.

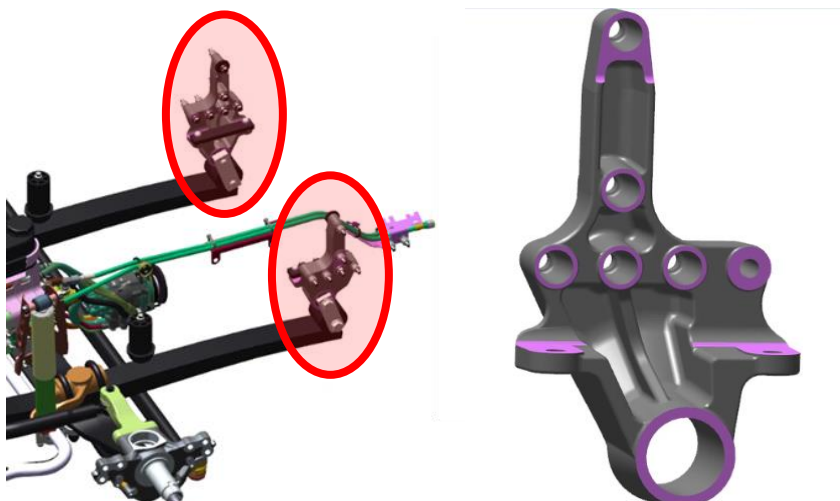


Bild 37. Fjäderförankringens position i främre hjulupphängningen. Bilder: AB Volvo.

Request	Sample response
Why was this part chosen for additive ?	Low volume + good candidate to investigate high weight reduction
What is the value additive can provide ?	Tooling cost
Component operating environment	See TR 21403391
Functional requirements	Surface finish
Performance requirements	Stiffness, hardness, ... : Must meet same level as serial part
Material requirements	SPHEROIDAL GRAPHITE IRON - VISG500/7+AC/HT STD 310-0002. Fatigue to be checked (ie post-treatment mechanic and/or chemical).
Part/system limitations	
Component validation testing	FEA analysis (both static and fatigue) + Rig test + AET
System validation testing	Metalurgic analysis, dimension analysis, ... Printed part should meet serial part durability (Max forces, fatigue)

Bild 38. Bakgrund för valet av fjäderförankringen som fallstudie. Tabell från AB Volvo.

Utmaningar

Detta fall har många utmaningar, inte minst den stora konstruktionsfriheten, som innefattar både topologioptimering (geometri), materialval samt processoptimering. Fjäderförankringen har dessutom höga prestandakrav och skall tåla till exempel utmattningslast och korrosion, samtidigt som den skall vara så lätt, billig och snabbproducerad som möjligt. Den stora konstruktionsfriheten som additiv tillverkning medger är en utmaning, men framför allt en möjlighet, att genom innovativ omkonstruktion för AM nå lägsta möjliga kostnad/prestanda-kvot. Bild 37 och 38.

Nyckelord är: Konstruktion för Additiv Tillverkning, Topologioptimering med tillverkningsrandvillkor, Materialval, Rostfritt stål, Titan, Viktreduktion, Högprestanda komponent, Utmattning, Maskinbearbetning, Korrosionsmiljö, Produktionskostnad, Verifiering.

Konstruktionsprocess

Det praktiska genomförandet av omkonstruktion av fjäderförankringen utförs av RISE enligt Volvos konstruktionsprocess. Fallstudien är begränsad till att nå en tidigt konceptuell konstruktion, där aktiviteter som materialval och topologioptimering med tillverkningsbivillkor ingår. Aktiviteterna i detta tidiga stadium är av iterativ karaktär. De steg som följer därpå, och alltså inte omfattas av denna fallstudie är detaljerad strukturell verifiering (utmattning) på komponent- och systemnivå, tillverkning samt fysiska tester i rigg.

Materialval

I fallstudien ingår en kartläggning av möjliga ersättningsmaterial till segjärn (Sferoidal grafite iron) som den gjutna förlagan består av. Förutom kvalitetskrav som mekaniska egenskaper och korrosionsbeständighet, så är en förutsättning att ersättningsmaterialet är "icke-exotiskt", dvs det är ett moget material som är lättillgängligt vid en eventuell upphandlingssituation.

De materialkandidater som identifierades inledningsvis var 316L, 420, 17/4, In718 och Ti6Al4V, grovt sett arrangerade efter pris och mekanisk prestanda. Alla kandidater har god korrosionsbeständighet förutom 420. Kandidaterna 316L, Inconel 718 och Ti6Al4V undersöktes lite närmare. Bild 39 visar mekaniska egenskaper och några olika produktionsförutsättningar för de tre kandidaterna.

	316L		Inconel 718		Ti6Al4V			Comments
	As built	As built	As built	Heat treated	As built	Heat treated	HIP	
Layer height [μm]	50	60		60		60		More process combinations in SLM solutions data sheet
Power [W]	400	400		400		700		
Build up Rate [cm^3/h]	15,3	24,6		25,9		38,9		
Density [kg/m^3]	7900	7900		8200		4430		
Component density [%]	>99.5							min Mean (V,H) SLM Solutions data sheet
Yield Strength [MPa]	529	498	606	1206	1098	870	860	
Tensile Strength [MPa]	640	616	942	1369	1251	963	998	
Elongation [%]	41	40	31	13	8	14	15	
Young's Modulus [GPa]	178	173	154	182	108	113	121	
Vickers hardness HV10	211	214	292	458	-	-	-	

Bild 39. Materialegenskaper för pulverkvaliteterna 316L, Inconel 718 och Ti6Al4V.
www.slm-solutions.com/

Motståndskraft mot utmattning är centralt i detta fall, då komponenten är utsatt för lågcykel-utmattning (LCF). Utmattningsbrott är i stora delar ett lokalt fenomen drivet av orenheter och mikrostrukturell heterogenitet. Ytans beskaffenhet och porositeten internt kroppen är därför styrande för sprickinitiering och spricktillväxt.

Det finns olika sätt att för varje given pulverkvalitet uppnå nödvändig materialkvalitet både på och under ytan, antingen genom optimering av det additiva byggsteget och/eller genom olika typer av efterbearbetning. När det gäller porositet så är processparametrarna för AM lasereffekt, laserhastighet och laserskanningsmönster samt lagertjocklek ofta kvalificerande för hög komponentdensitet (låg porositet), i förekommande fall >99.5% (bild 39). Man skall dock komma ihåg att testerna oftast är gjorda på små kuber, vilket gör att geometriberoendet för porositet/densitet för en unik komponentform inte är beaktat. Vidare är ytfinheten (as-built) starkt beroende av ytans orientering. Dessa egenskaper och inbördes beroenden är bra att vara medveten om, men samtidigt behöver man hitta en praktiskt lämplig nivå på analysen inför ett materialval. Utmattningsförsök där provkroppar tillverkade med additiv tillverkning jämfört med smidda visar en sämre utmattningskapacitet, speciellt för högcykelutmattning, se bild 40.

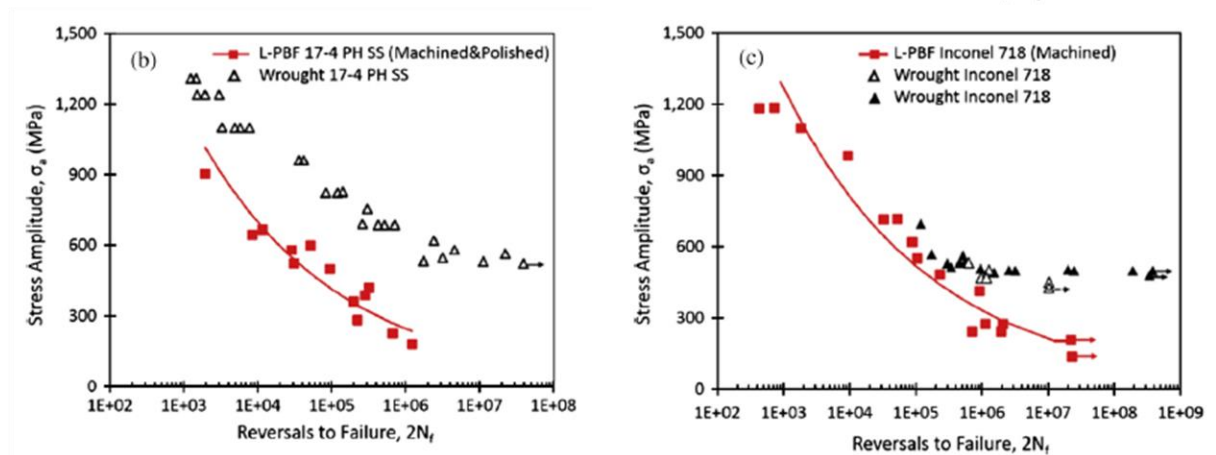


Bild 40. Jämförelse S-N kurvor för 17/4 och Inconel 718, additivt tillverkat (L-PBF) och smitt (Wrought).
A. Yadollahi, N. Shamsaei / International Journal of Fatigue 98 (2017) 14–31

I processteget Hot Isostatic Pressure (HIP), är en av de förväntade effekterna att porositeten minskar, vilket är gynnsamt för utmattningskapaciteten. I bild 41 visas försök där lastväxlingar till brott för provkroppar i Ti6Al4V och 316L, med och utan HIP. För Titan är effekten väsentligt positiv med HIP medan för 316L visas en försämring.

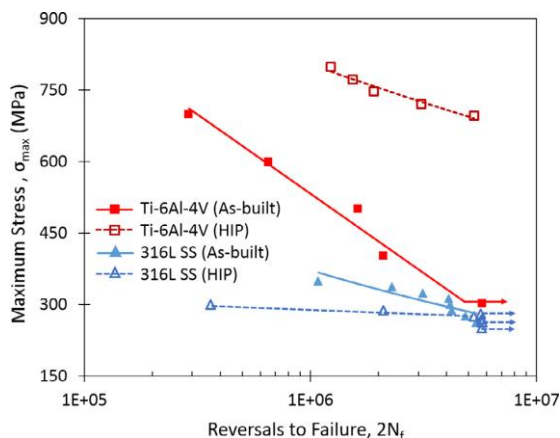


Bild 41. Jämförelse S-N för Ti-6Al-4V och 316L additivt tillverkat (L-PBF), med och utan efterföljande HIP

I bild 42 varieras i stället lagertjockleken mellan 30 μm och 50 μm och dessutom studeras effekten av maskinbearbetning av prover tillverkade i 316L. Försöken visar att maskinbearbetning har stor positiv effekt, medan minskning av lagertjockleken (och därmed ökning av produktionstiden) har en begränsad effekt på utmattningskapaciteten.

Andra materialegenskaper som är viktiga i sammanhanget är bearbetbarheten (machinability) med hänsyn till vibrationer och verktygsslitage.

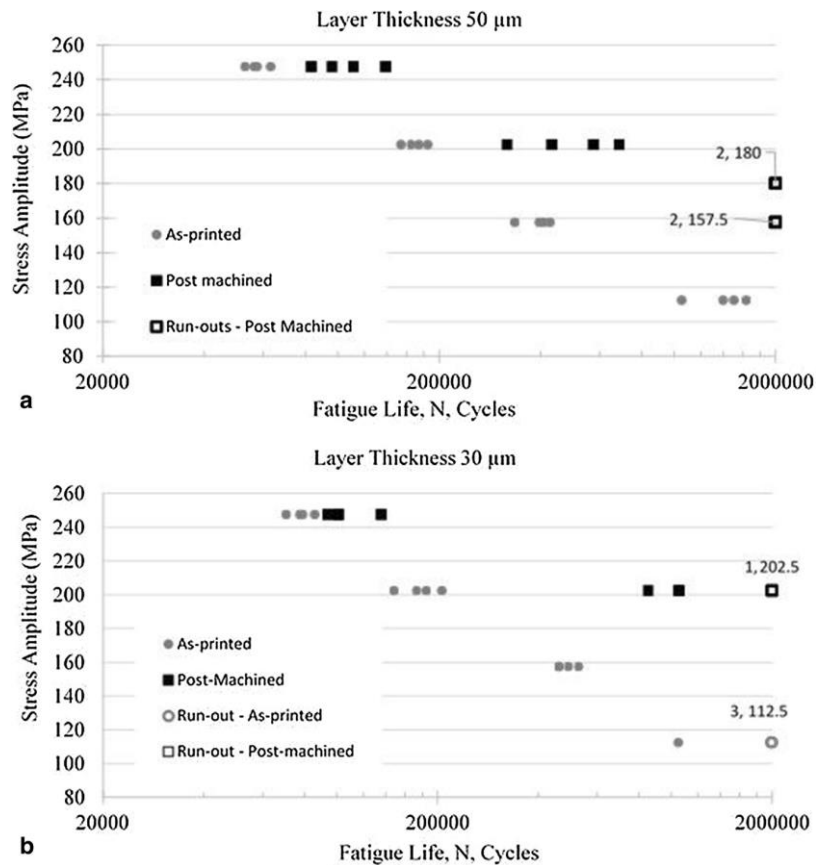


Bild 42. Effekt av lagertjocklek och maskinbearbetning för 316L som tillverkas med L-PBF Hatami et al. JMEPEG (2020) 29:3183–3194, DOI:10.1007/s11665-020-04859-x

Topologioptimering – Modell och scenarion

Topologioptimeringsmodellen illustreras i bild 43.

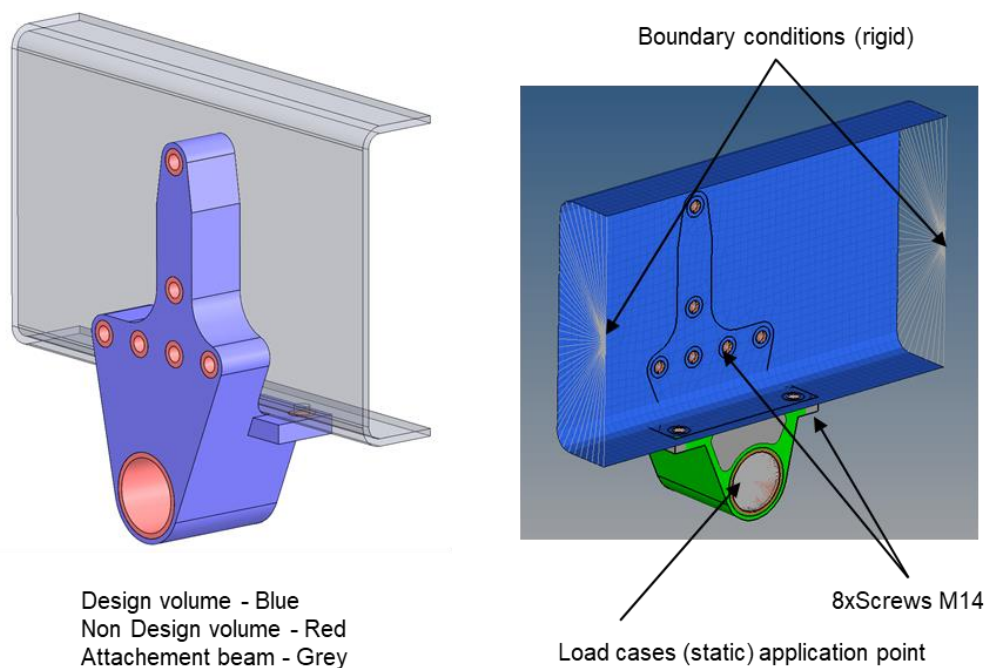


Bild 43. Topologioptimeringsmodell

20 statiska lastfall reducerades till 4 dimensionerande lastfall. E-modulen är 180 GPa för fjäderförankringen vilket motsvarar 316L, och 210 GPa för stålbalcken. Spännings- och förskjutningskriterium utvärderas. Spänningar utvärderas i förhållande till aktuell flytgräns och förskjutningskriterie för hela topologioptimeringsmodellen yttrycks som minimistyheter $[K_x, K_y, K_z] = [95, 38, 101]$ kN/mm. En mängd iterationer utfördes, men här redovisas endast ett urval av preliminära resultat.

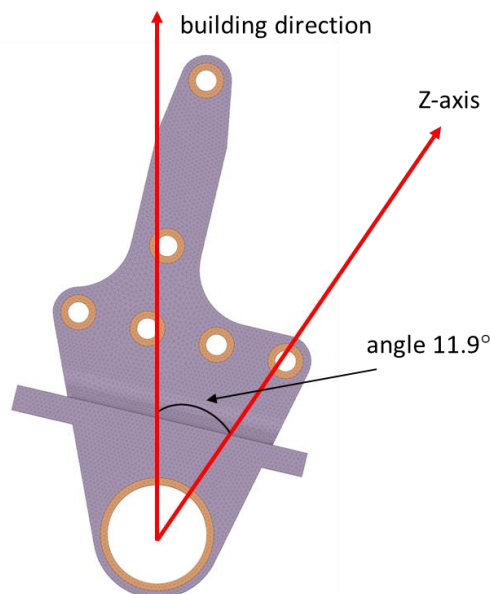
9. V1_316L - Vertikal, roterad 11.9° ,
 - a. 45° överhängskriterium.
 - b. Responsvillkor: max 25% bibehållen massa.
 - c. Tröskelvärde solid/void 0.3
10. V2_316L – Som V1_316L men tröskelvärde solid/void 0.1
11. H1_316L – Som V1_316L men liggande.

Proceduren liknar remspännaren (kap 10.2.1) med några skillnader. I remspännarfallet är det ett lastfall, topologioptimeringen utförs med ANSYS Mechanical och CAD realiseringen med ANSYS SpaceClaim med en facetterad solid som slutresultat. För Fjäderförankringen utförs topologioptimeringen med Altair och Hyperworks, det är 4 lastfall som behöver beaktas och CAD realiseringen sker i ANSYS Space Claim med en "patchad" solid som slutresultat. Resultat:

- Byggriktning för fallen V1 och V2, bild 44
- Den resulterande geometrin, bild 45 och
- Spänningsresultat för de fyra dimensionerande lastfallen för fallet V1_316L, bild 46.

Spänningsresultaten ligger under tillåtna värden för 316L med god marginal, och det finns utrymme för att ta bort ytterligare material.

- Resulterande geometri för fallet V2_316L, bild 47 och
- Resulterande geometri samt preliminär beredning av fallet H1_316L, bild 48.



Overhang constraint is set to 45° .

Bild 44. Illustration av byggriktning för fallen V1 och V2

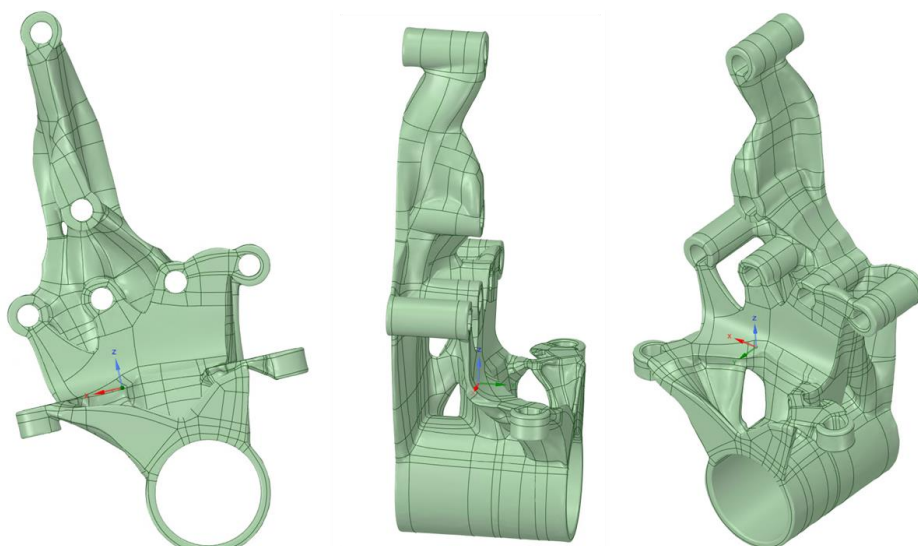


Bild 45. Resulterande geometri för fallet V1_316L. Vikt 6.79 kg

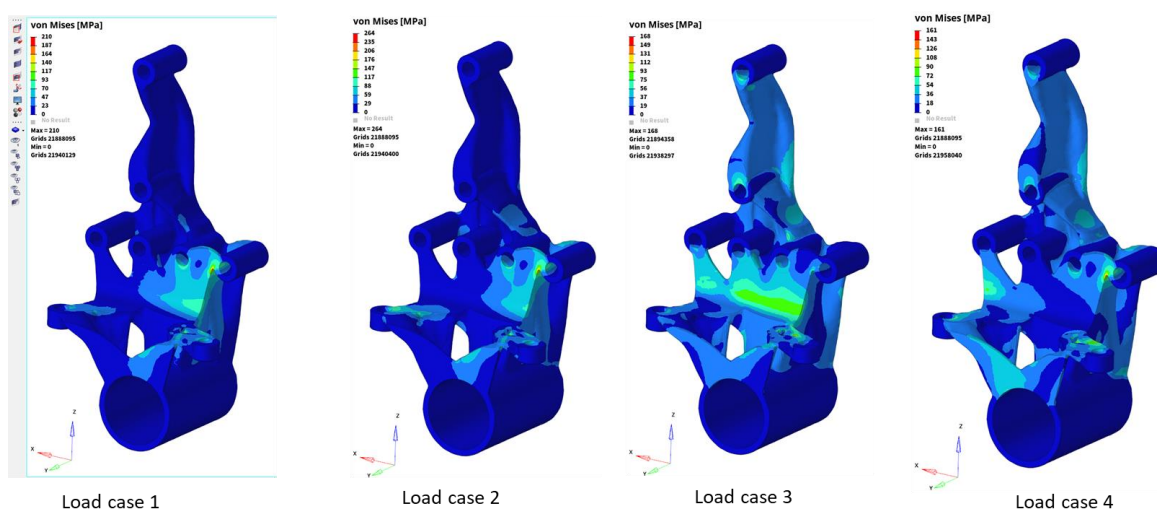


Bild 46. Spänningsresultat för de fyra lastfallen, för fallet V1_316L

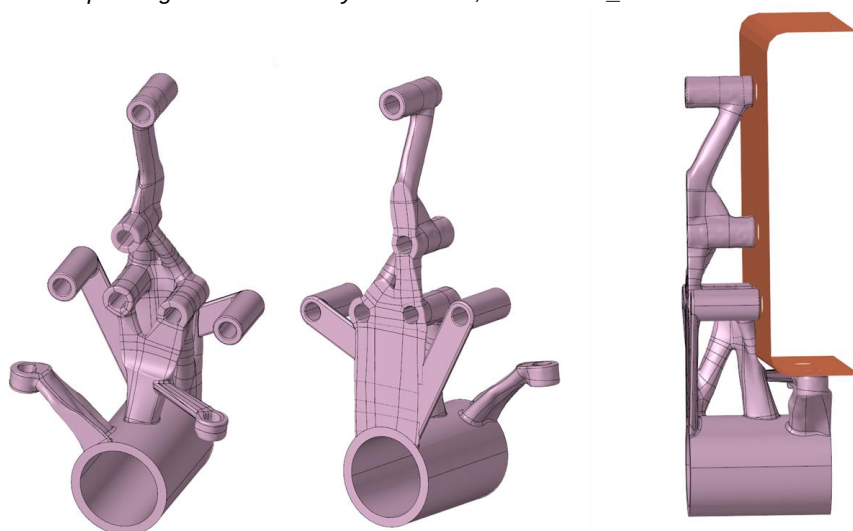


Bild 47. Resulterande geometri för fallet V2_316L. Vikt 4.87 kg

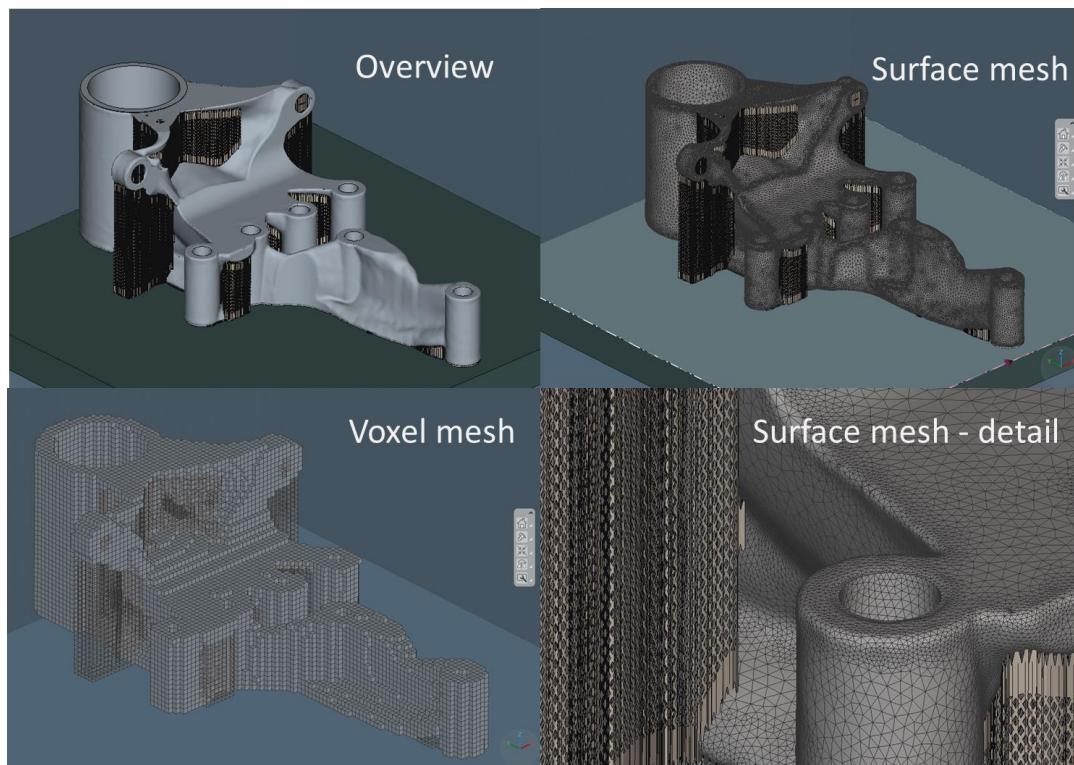


Bild 48. Preliminär beredning fall H1_316. Vikt 6.81 kg (exklusive stödstruktur)

Processimulering

En preliminär processimulering utfördes i Simufact Additive för fallet H1, deformationsresultat efter sista lagret men innan friläggning visas i bild 49. Ett problemområde identifierades vid en av anslutningspunkterna.

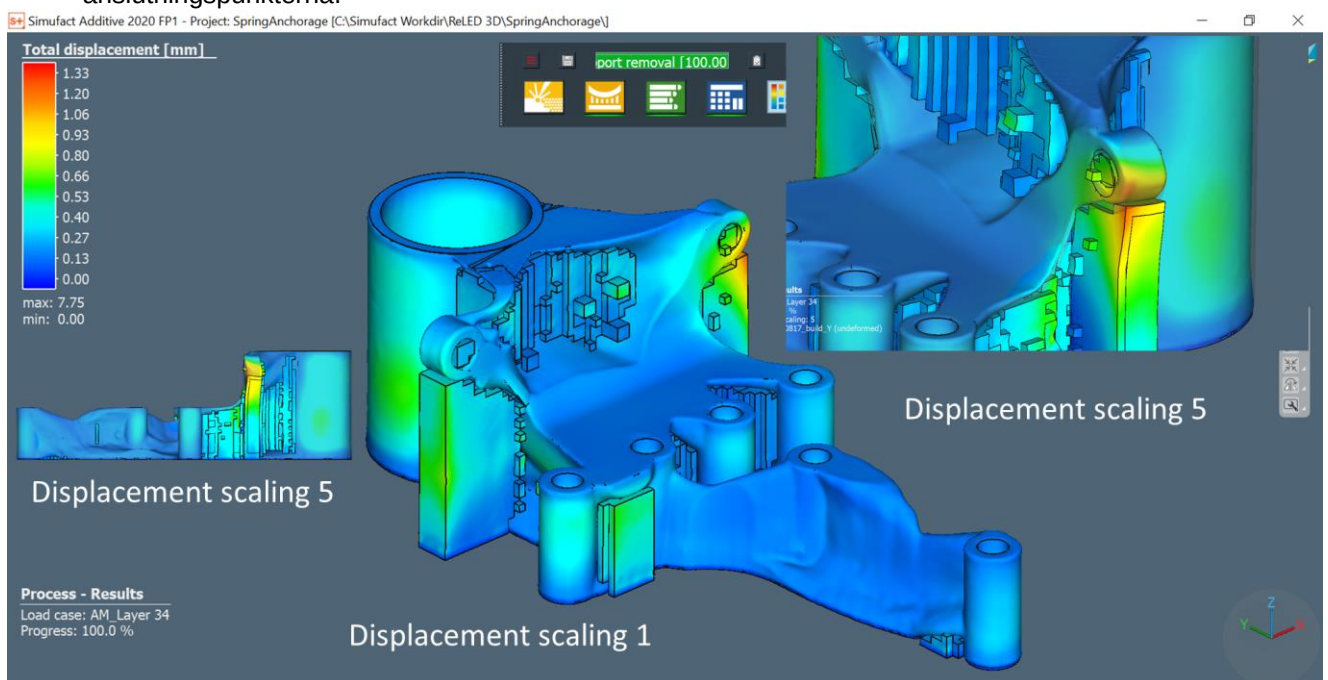


Bild 49. Deformationsresultat efter sista lagret men innan friläggning, från Simufact Additive.

Sammanfattning

- *Litteraturstudie på inverkan av lagertjocklek och maskinbearbetning på utmattningskapaciteten för valda AM material genomförd.*
- *Designrymd upprättad med*
 - *Geometrisk utbredning, designvolym*
 - *Dimensionerande lastfall*
 - *Mekaniska komponentkrav, deformation(styvhet), hållfasthet (spänning)*
 - *Fem möjliga material identifierade varav tre (316L, In718, Ti6AlV) kvalificerade som huvudkandidater*
 - *Två orienterings kandidater utvärderades*
- *Arbetsflöde etablerat för komponent- och process optimering*

Lärande & nästa steg

Det är en utmaning att hålla alla design- och kostnads variabler öppna i början. Men det är samtidigt en möjlighet att nå optimerade konstruktioner om man lyckas. En förutsättning för detta är ett holistiskt synsätt och samarbete över disciplingränserna för materialvetenskap, konstruktion och (tillverknings) processkunskap. Arbetet med Fjäderförankringen visar på möjligheter att nå stora framgångar om man kan ta med tillverkningsaspekter tidigt i konstruktionsprocessen.

Nästa steg är först och främst att färdigställa en eller flera AM-anpassade konstruktioner och utvärdera dem mot utmattning med hållfasthetsanalys. När det slutliga komponentutförandet är spikat, då bereda, printa, efterbehandla, verifiera komponenterna mot konstruktionsunderlaget och slutligen funktionstesta komponenterna fysiskt. Därefter kan hela konstruktions- och tillverkningskedjan utvärderas och utvecklas vidare.

11 Spridning och publicering

11.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	x	ReLed-3D bidrar tydligt till ökad kunskap om hur additiv tillverkning kan implementeras i ett industriföretag. Förståelsen för innovationsprocessen i företag ingår exempelvis i en stor pilotsatsning i VGR-regionen för additiv tillverkning, "3D-action".
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	Resultaten från projektet ingår i en långsiktig process att bygga kunskap och kompetens för industrialisering av additiv tillverkning. Resultaten kommer att föras vidare i utvecklingsprojekt med industri och akademi, exempelvis genom det av RISE och parter nyligen startade applikationscenter för additiv tillverkning. Det visade behovet av ökad kunskap för simulering och prediktering av värmeöverföring bör följas upp och kartläggas utifrån nuläge och målbild för ny FoU.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	Den process med industriella fallstudier som redovisas i rapporten, är en utgångspunkt för att utveckla kommande komponenter som drar nytta av AM.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

11.2 Publikationer

I samband med projektet:

1. ReLed 3D DOE design of experiments. 2018-10-31. S Hatami. Bilaga till lägesrapport.
2. Heat transfer and flow performance in additively manufactured cooling channels with varying surface topography O. FLYS, M. JOHANSSON, S. B. HOSSEINI, J. BERGLUND, S. HATAMI, C. OIKONOMOU and B.-G. ROSÉN
3. Under projektiden har Lunds Universitet publicerat: Diegel, O., Nordin, A., Motte, D. (2020). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Springer Series in Advanced Manufacturing Singapore
4. Simulering av additivt tillverkade komponenter. Presentation vid Klusterkonferensen 2019: Johansson, K. EDR&MEDESO AB
5. Additively Manufactured Heat Exchangers. Development and Testing (2020). Lund University, Master thesis. Wadsö, I. Holmqvist, S

12 Slutsatser och fortsatt forskning

ReLed-3D är ett projekt som ingår i ett sammanhang med fokus på ökad förståelse om additiv tillverkning, som en resurs för innovativ produkt- och produktionsutveckling. Slutsatser och fortsatt forskning är summerat utifrån de fyra FoU-områdena för projektet:

Innovationsprocess för nytänkande genom Additiv Tillverkning, AM.

En tydlig insikt från projektet är att det krävs en mognadsprocess i företag för att implementera möjligheterna med AM, och successivt skapa effekter av att tillämpa AM i företaget. Det är en omfattande process att för en komponent som levereras globalt, byta från en etablerad tillverknings- och leverantörskedja till ett helt annat sätt att tillverka och hantera.

Fortsatt forskning bör inriktas på:

- Lära, anpassa och tillämpa etablerade innovations- och produktutvecklingsmetoder som omsätts till AM.
- Lärande av industriella fallstudier, som successivt ökar kunskap och kompetens om hur en innovationsprocess fungerar och ger effekt. Detta inkluderar både teknik och ekonomi, inklusive utveckling av affärsmodeller
- Långsiktigt bygga kunskap och kompetens genom test- och demoanläggningar, "testbäddar", med processer för industriellt nytänkande, som kan omsättas till optimerade prototyper, förindustriell provning och provproduktion.

För industriell effekt, bör initiativ tas att nå flera företag som kan dra nytta av ett "AM-lyft".

FoU-studie om värmeöverföring hos additivt tillverkade provkroppar i metall.

FoU-studien har visat behov av fortsatt forskning med inriktning:

- Ökad kunskap om värmeöverföring som underlag för bättre precision vid simuleringar
- Framtagning av större provkroppar och mer anpassad testutrustning för vätskeflöden
- Välja riktade fallstudier där design för AM kan ge stor effekt.

Guide för additiv tillverkning.

Nytan av vägledning och en guide för AM är mycket påtaglig. Framförallt gäller detta i samband med tekniköverföring till företag som är i början av sin AM-mognad. Fortsatt forskning är här mer knuten till företagsutveckling, genom att knyta samman guiden med innovationsprocessen som beskrivs ovan. Exempel på ekonomiska jämförelser behöver också tas fram, för att tydliggöra brytpunkter mellan AM och traditionell tillverkning.

Utvecklingsprocess med industriella fallstudier.

I rapporten ges tre exempel på fallstudier, med successivt ökad komplexitet. Dessa speglar hur ett systematiskt lärande sker i företag, som leder till allt större och utmanande möjligheter med AM. En insikt generellt är att en sådan utvecklingsprocess leder fram till allt större steg med AM jämfört med de första skisserade förslagen. Kort uttryckt är det en resa från "substitution med AM", dvs ersätta en befintlig dyr komponent med AM, till "innovation med AM".

13 Deltagande parter och kontaktpersoner

ReLed-3D inleddes med åtta parter med kontaktpersoner under projektet:

Volvo Technology	Johan Vallhagen, Johan Svenningstorp
EDR Medeso	Per Fredriksson,
Höganäs AB	Sven Bengtsson
Lasertech LSH AB	Torbjörn Holmstedt
Curtiss Wright	Olle Widman (tom 2020)
Chalmers	Lars Nyborg
Lund University	Axel Nordin
RISE IVF	Magnus Widfeldt



Genom en serie effekter, främst beroende på Covid-pandemin, har parternas roller förändrats under projektet. Detta har medfört att ett par av parterna inte deltagit som avsett, och samtidigt har, trots pandemin, huvudparterna under slutfasen av projektet kunnat öka sitt engagemang i projektet. Summerat överträffar därför industrin sin medverkan i projektet jämfört med ursprunglig projektplan.

13.1 Bidrag till rapportens innehåll

Arbetet i projektet har dels genomförts enligt ursprunglig plan, dels genom pandemin 2020-2021 förlängts, förändrats och inkluderat flera personer som bidragit i projektet.

Särskilt har följande personer bidragit till arbete och rapportering i projektet:

RISE	Sepehr Hatami, Alexander Mann, Jerry Börjesson, Ola Lyckfeldt, David Ohlsson, Sargon Jidah, Taoran Ma, Christophe Lyphout, Sven Karlsson, Mikael Ström, Seyed Hosseini (initialt PL för ReLed-3D)
Chalmers	Lars Nyborg, Alexander Leicht, Mats Norell
Lunds Universitet	Olaf Diegel, Axel Nordin, Joze Tavcar
EDR Medeso	Per Fredriksson, Klas Johansson
Höganäs	Sven Bengtsson, Sigurd Berg
AB Volvo	En stor grupp personer har summerat varit involverade i olika faser av ReLed-3D. Kontaktpersoner har främst varit Johan Svenningstorp och Johan Vallhagen.

Rapporten har sammanställts av RISE, Magnus Widfeldt, PL för ReLed-3D.

