



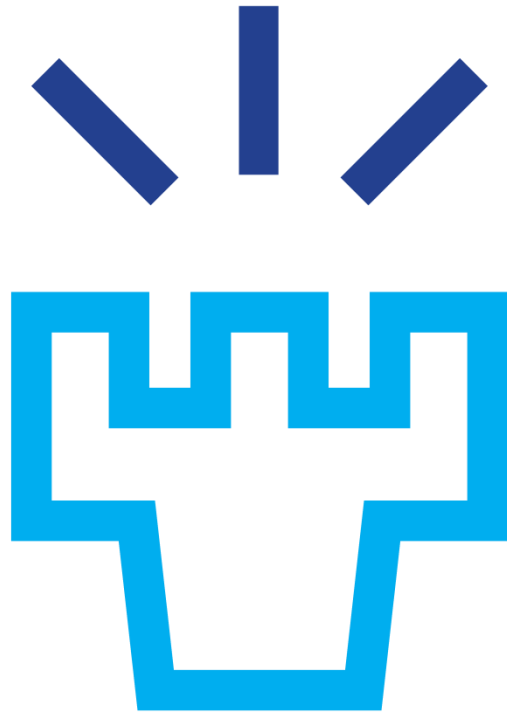
**UNIVERSITY
OF OULU**

**KERTTU SAALASTI
INSTITUTE**

***Science
With
Arctic
Attitude!***

FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





**UNIVERSITY
OF OULU**
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

Metal 3D-Printing

FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES

UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES

C3TS

Arctic platform to Create, 3D-print, Test and Sell



I samarbete med



TROMS County Council
TROMS fylkeskommune

Interreg
Pohjoinen

Euroopan aluekehitysrahasto



EUROOPAN UNIONI



LAPIN LIITTO



Upplägg



- **Inledande ord**
- **Additiv tillverkning (AM) och metoder**
- **Design med AM i åtanke**
 - Designprocessen överlag
 - Design med LBPF (SLM) metoden
- **Användande av AM i industrin**
 - Utsikter
 - Kommersiella tjänsteleverantörer
- **Slutsatser**

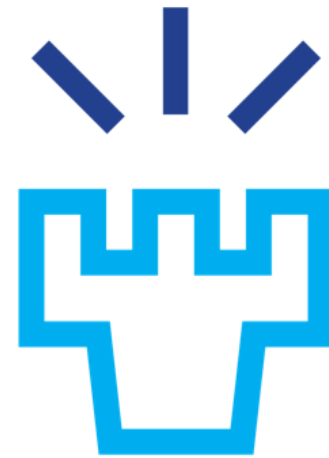


FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES



Kari Mäntyjärvi
Forskningsledare



UNIVERSITY
OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

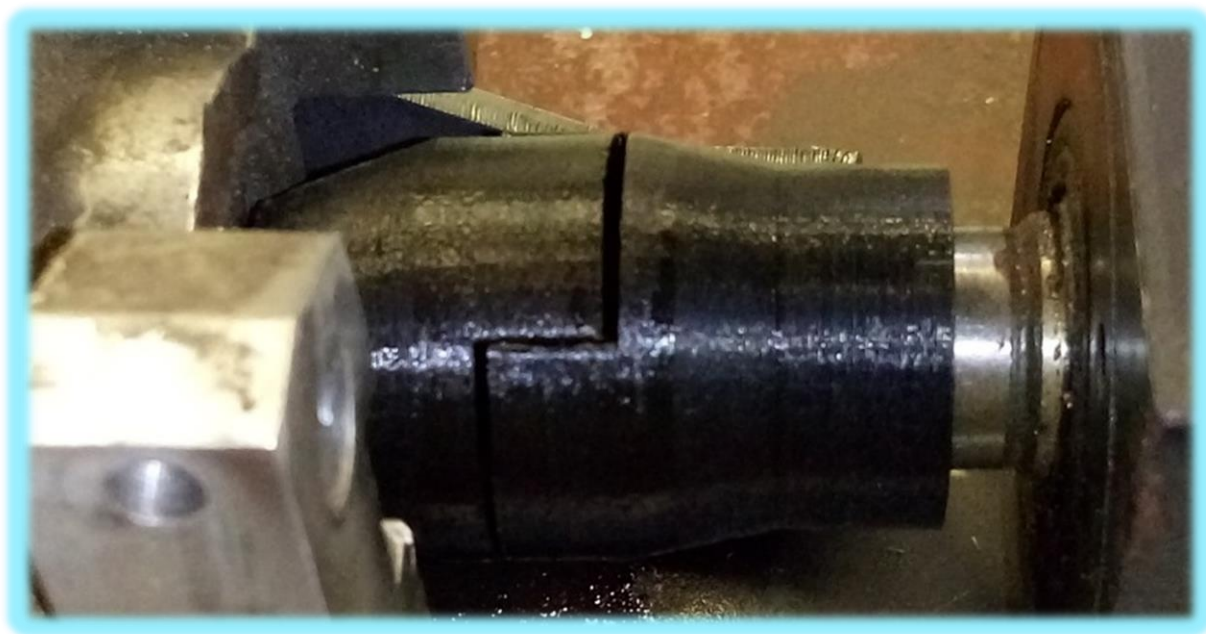


Tero Jokelainen
Projektforskare
AM Expert





Future Manufacturing Technologies (FMT) gruppen



Resurser

- 18 anställda, verkar i Nivala (ELME Studio), Oulu (Linnanmaa campus) och Raahe (Aiku)
- Mångsidig utrustningstillgång - från laserbearbetning till materialbearbetning och forskning

Forskning

- Över 60 internationella akademiska publiceringar 2007-2017
- Offentligt finansierade internationella och nationella projekt och forskningsuppdrag
- Drivs av behov hos lokala företag, ofta implementerade inom 0-5 år

Företagstjänster

- Forskningsfall, prototyper och rådgivning
- Årligen nära 50 forskningsuppdrag från företag

Avhandlingar

- 19 MSE och 35 ingenjörer

International samverkan

- Sverige, Egypten, Norge, Island, Irland, Skotland, Tyskland, Frankrike, Polen, Iran och Indien
- Samarbete med internationella utrustning och teknikutvecklare

CASR
Centre for Advanced
Steels Research



FMT forskning – Fokusområden



Lätta och rigida strukturer + Laser teknikstillämpning

- Material, design and tillverkning
- Honungsstrukturteknik, gjutning, svetsforskning
- Nyttjande av ultrahöghållfasta material
- Nyttjande av simulering

Specialstål – från stål till produkt

- Småskalestål
- Gjutning och speciella processer
- Effekter av utmattning
- Metallografi

Additive tillverkning och nyttjande av det för andra tillverkningsmetoder

- Material, design och tillverkning

Kostnadseffektiv produktion

- Skräddarsydd automation
- Produktionsövervakning
- Digitalisering och industriellt internet



C3TS

Arctic platform to Create, 3D-print, Test and Sell

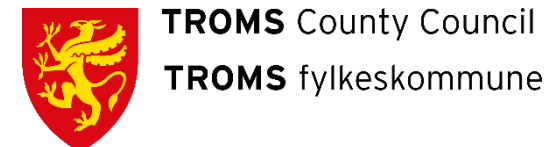


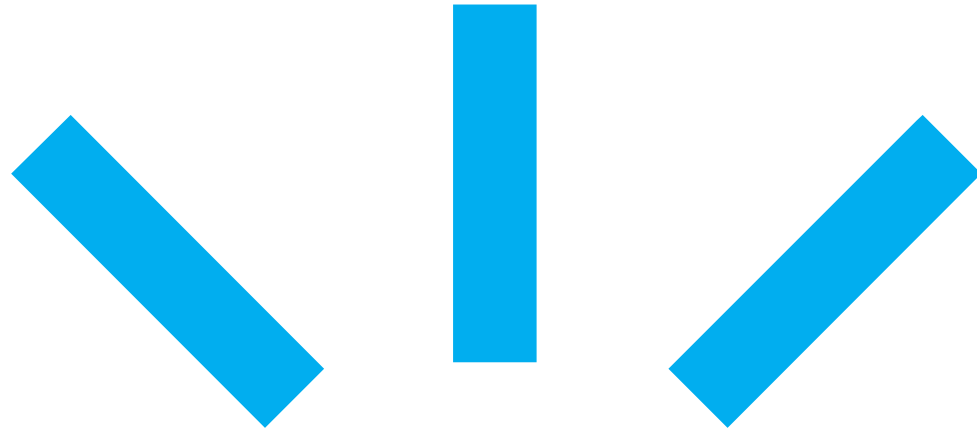


C3TS finansieras av Interreg Nord-programmet och leds av Luleå tekniska universitet, där FMT verkar som associerad partner.

Projektets övergripande mål är att förbättra SMF:s internationella konkurrenskraft genom att göra 3D-skrivning av metall känd som en konkurrenskraftig tillverkningsmetod.

Metall 3D-skrivningsteknik gör det möjligt att skapa mer innovativa former, sänka tillverkningskostnader och göra mindre påverkan på miljön med mindre använt material och förbättrade tillverkningsstegier än i traditionella tillverkningsstekniker.





Additiv Tillverkning (Additive Manufacturing – AM) och dess metoder



Additiv tillverkning

3D-Printing

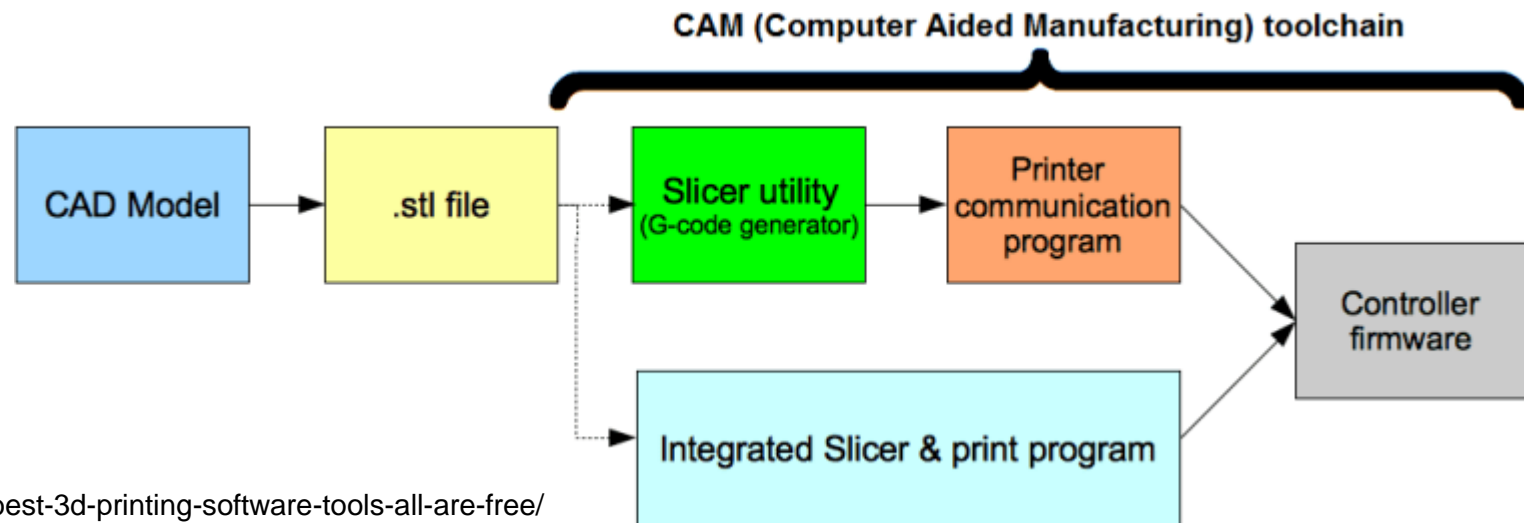


- **Additiv Tillverkning**
 - Tillverkningsmetod för adderande av material
 - 3D-printing (3D-skrivning)
 - En grupp av tillverkningstekniker som baseras på tillägg av material (i motsats till borttagande eller fögningsprocesser)
 - Brett menat alla tekniker där en komponent produceras genom att gradvis addera material lokalt
 - Metoder (engelska termer):
 - Powder Bed Fusion
 - Material Extrusion
 - Vat Photopolymerization
 - Material Jetting
 - Binder Jetting
 - Directed Energy Deposition
 - Sheet Lamination



Från 3D-modell till utskrivnen produkt

- Ta hänsyn till metod när produkten designas
 - Behov av stödstrukturer, orientering för byggande, minimerande av efterbearbetning, anisotropi hos materialet
- **Förbereda den designade produkten för utskrift med förbearbetningsmjukvara**
 - Placering av komponent på utskriftsplattform
 - Placering av stödstrukturer
 - Välja och placera utskriftsparametrar
- **Definiera programmet (automatiskt)**
 - Dela upp strukturen i lager
 - Forma tillverkningsbanor för lager
- **Överföring till printer**
- **Utskrift**

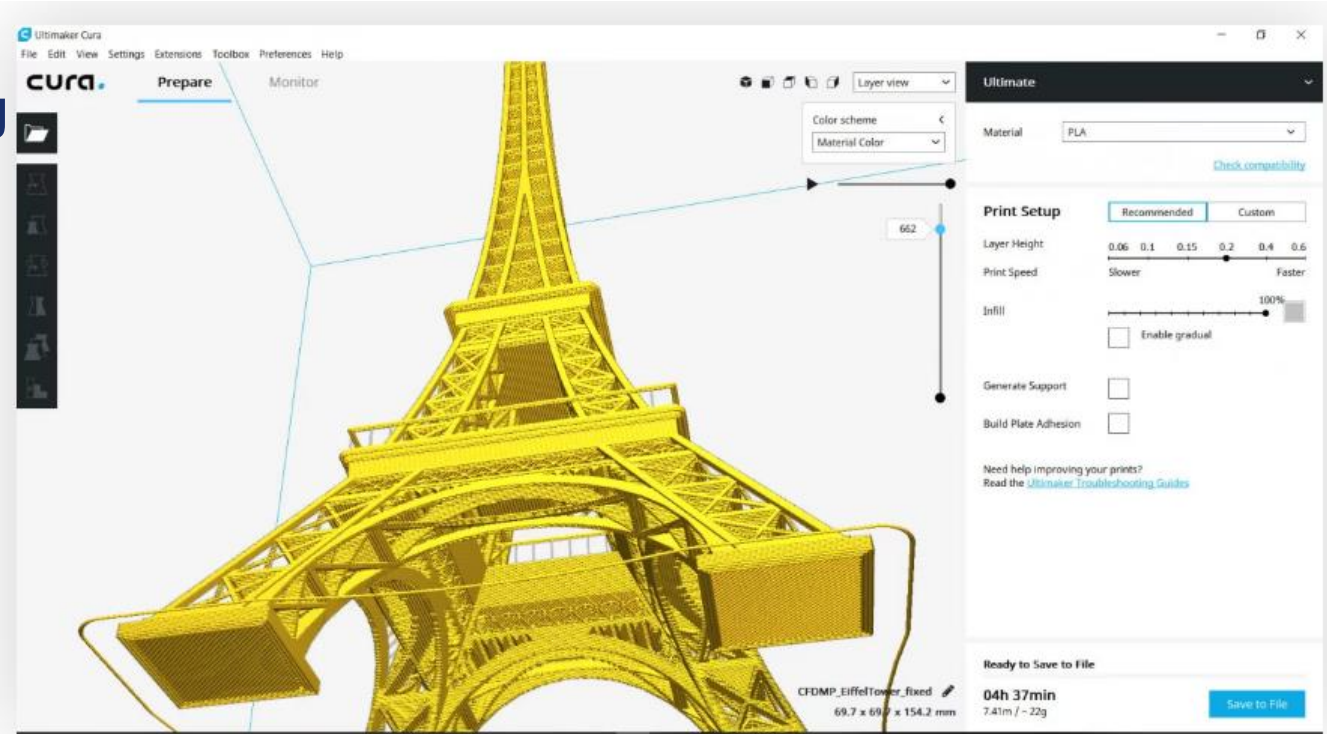




Programmera 3D-skrivare

Gratis mjukvaror för utskrivning

KISSlicer	Slicer	Intermediate	Windows, Mac, Linux	KISSlicer
Slic3r	Slicer	Intermediate	Windows, Mac, Linux	Slic3r
SliceCrafter	Slicer	Intermediate	Browser	SliceCrafter
Cura	Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Windows, Mac, Linux	Cura
OctoPrint	Slicer, 3D Printer Host	Intermediate	Windows, Mac, Linux, Raspbian (as OctoPi image)	OctoPrint
Repetier-Host	Slicer, 3D Printer Host	Intermediate	Windows, Mac, Linux	Repetier
AstroPrint	Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Browser	AstroPrint
MatterControl 2.0	Slicer, 3D Printer Host, Design	Beginner	Windows, Mac, Linux	MatterControl
IceSL	Slicer, Design	Intermediate	Windows, Linux	IceSL
3D-Tool Free Viewer	STL Analysis	Intermediate	Windows	3d-Tool Viewer
MakePrintable	STL Editor, STL Repair	Intermediate	Browser	MakePrintable
Meshmixer	STL Editor, STL Repair	Intermediate	Windows, Mac	Meshmixer
MeshLab	STL Editor, STL Repair	Professional	Windows, Mac, Linux	MeshLab
3DPrinterOS	STL Editor, STL Repair, Slicer, 3D Printer Host	Beginner	Windows, Mac, Ubuntu, Raspberry Pi	3DPrinterOS
Netfabb	STL Repair, Slicer	Professional	Windows	Netfabb



Cura settings can be quite extensive. (Source: All3DP)

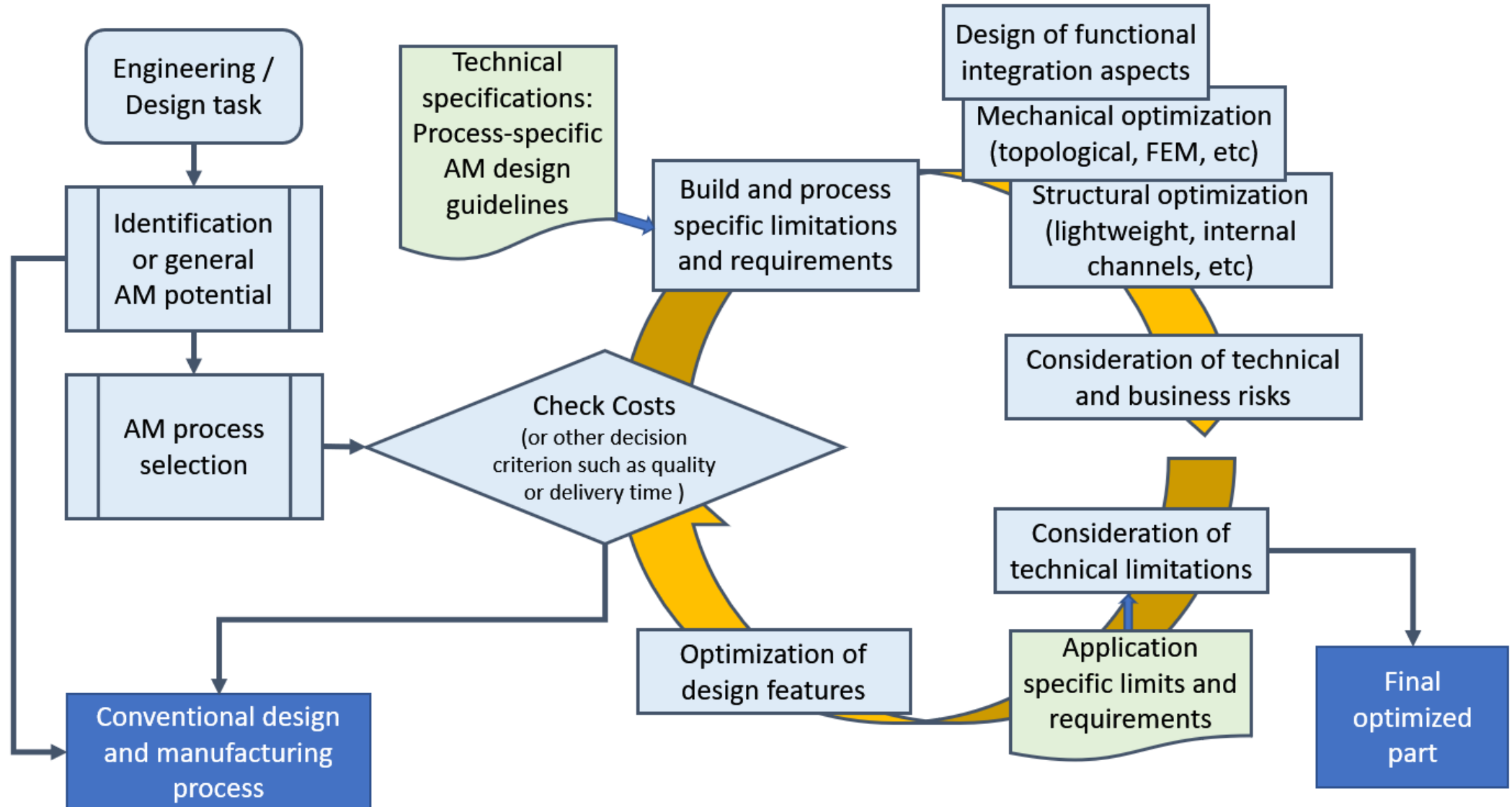
FEATURES

Software	Cura	Price	Free
Function	Slicer, 3D Printer Host	System	Windows, Mac, Linux
Level	Beginner	Download/Visit:	Cura

<https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/>

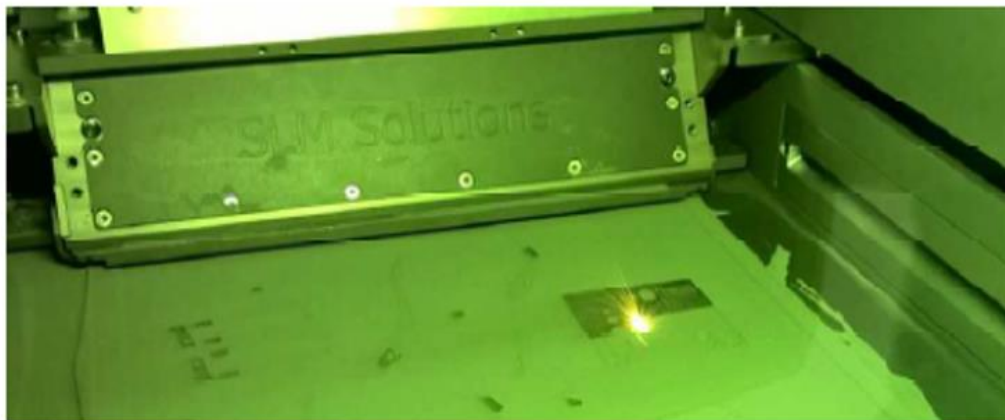


Identifierring av AM metods potential, val och design process enligt Standard ISO/ASTM 52910:20





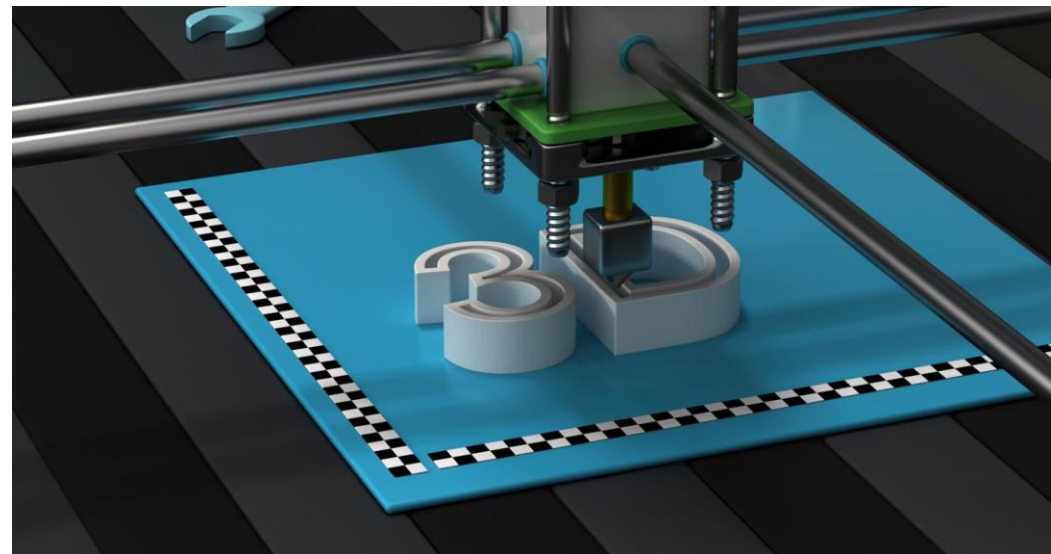
Olika AM processer



Picture: FMT

- Enfas \leftrightarrow Multifas
- Material (metall, polymer, keramik)
- Fogningsprocesser för materialet (fogning vs montering)
- Ämnets första steg

- Mer information:
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base>



Picture: <https://www.machinedesign.com>



ISO/ASTM 52900:2015(E)

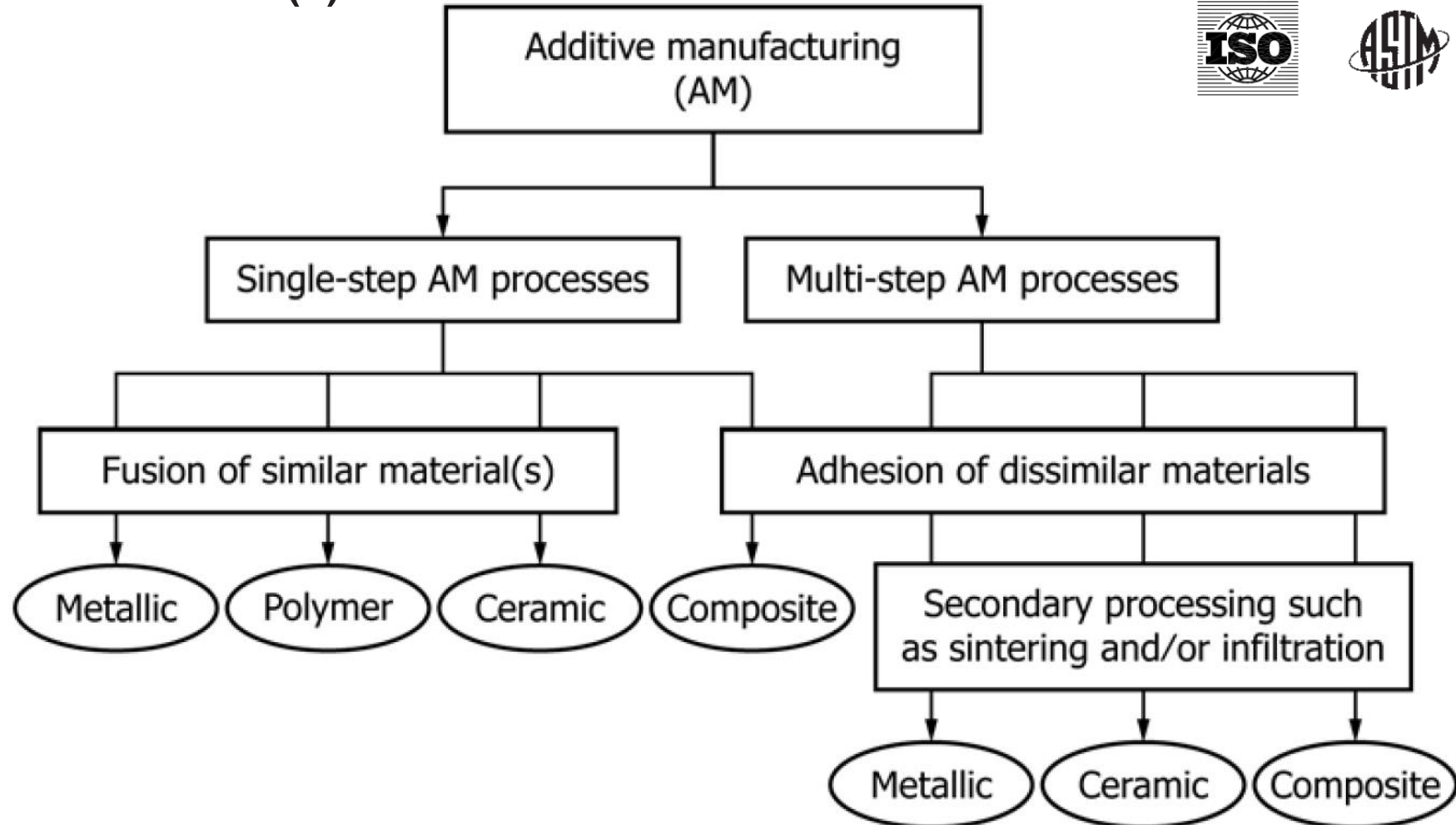


FIG. A1.1 Single-step and Multi-step AM process principles



- Powder Bed Fusion
 - Laser Powder Bed Fusion
 - Selective Laser Melting
 - Selective Laser Sintering
 - (Selective) Electron-Beam Melting
- Direct Energy Deposition
 - Direct Laser Deposition
 - Electron-Beam Deposition

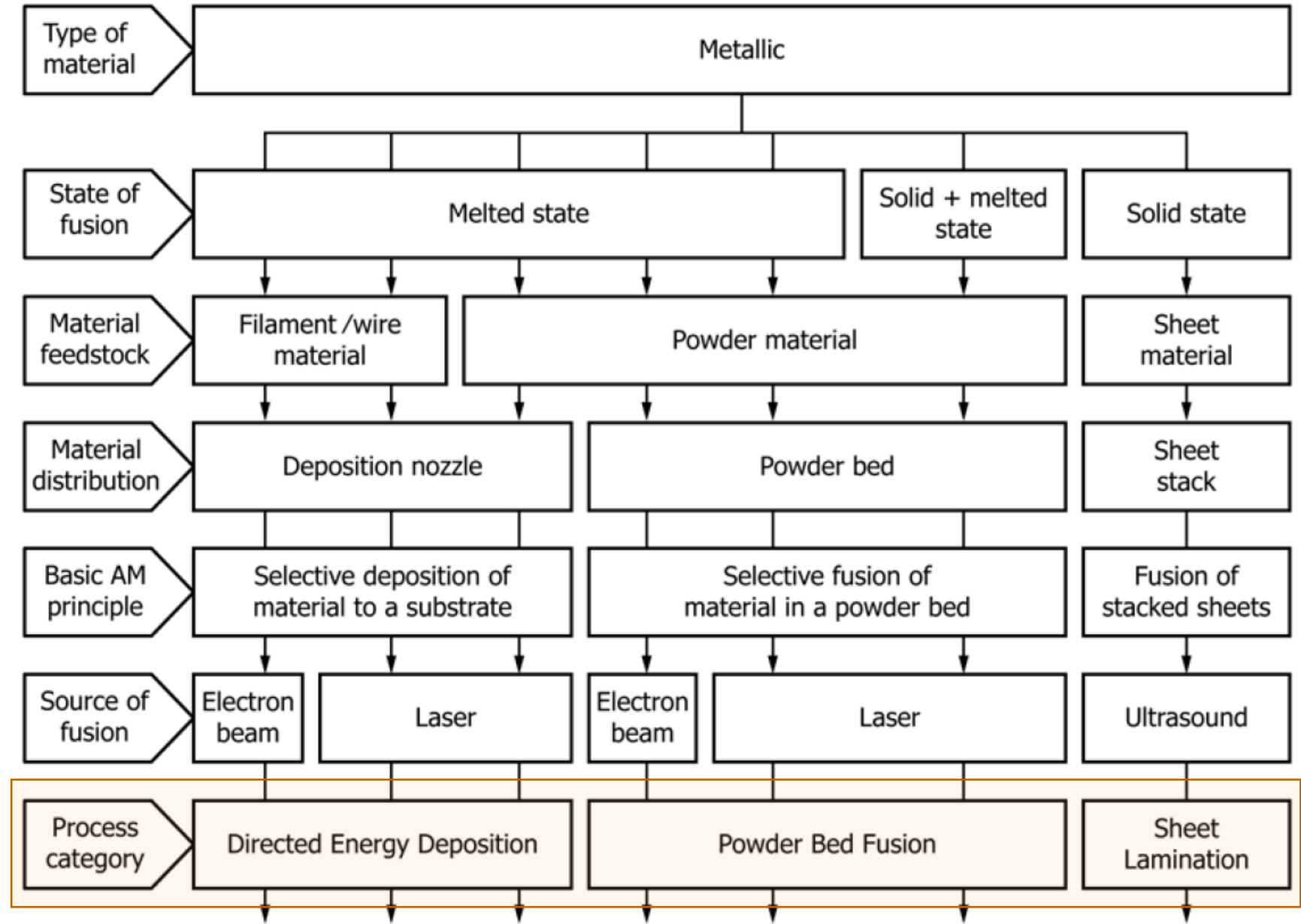
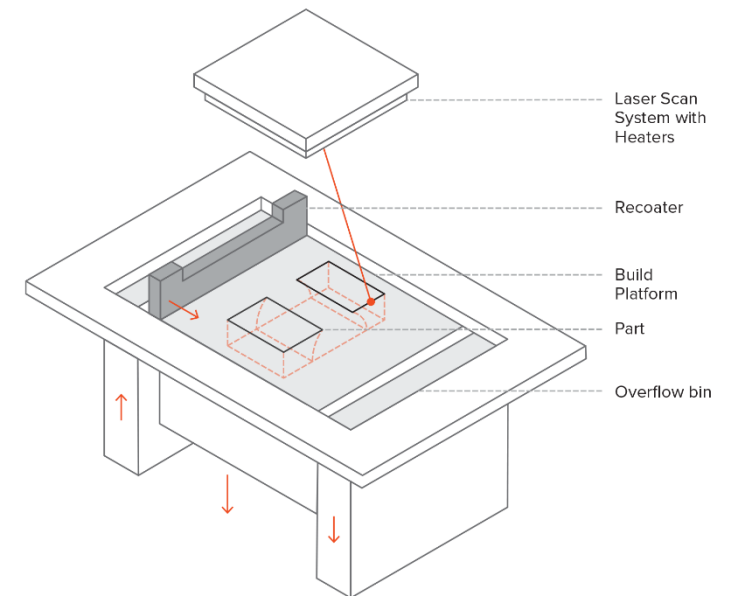
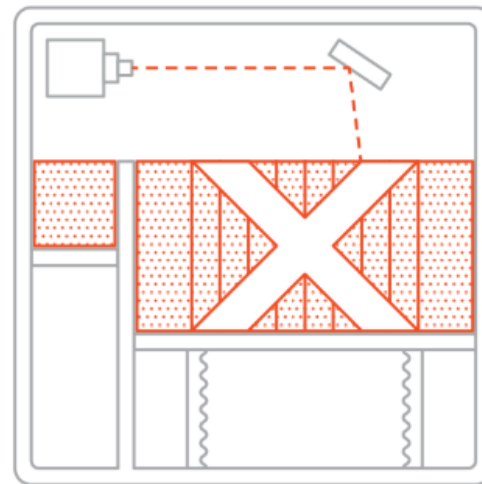
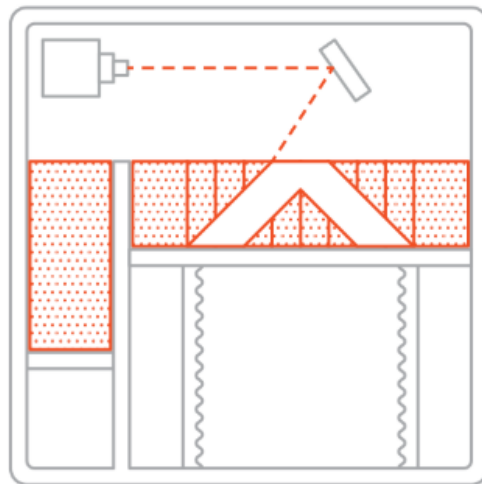
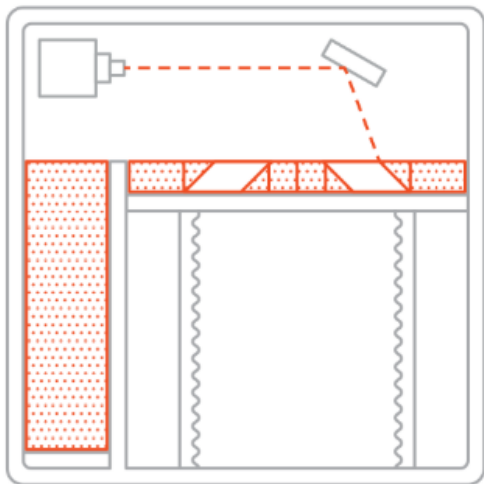


FIG. A1.2 Overview of single-step AM processing principles for metallic materials

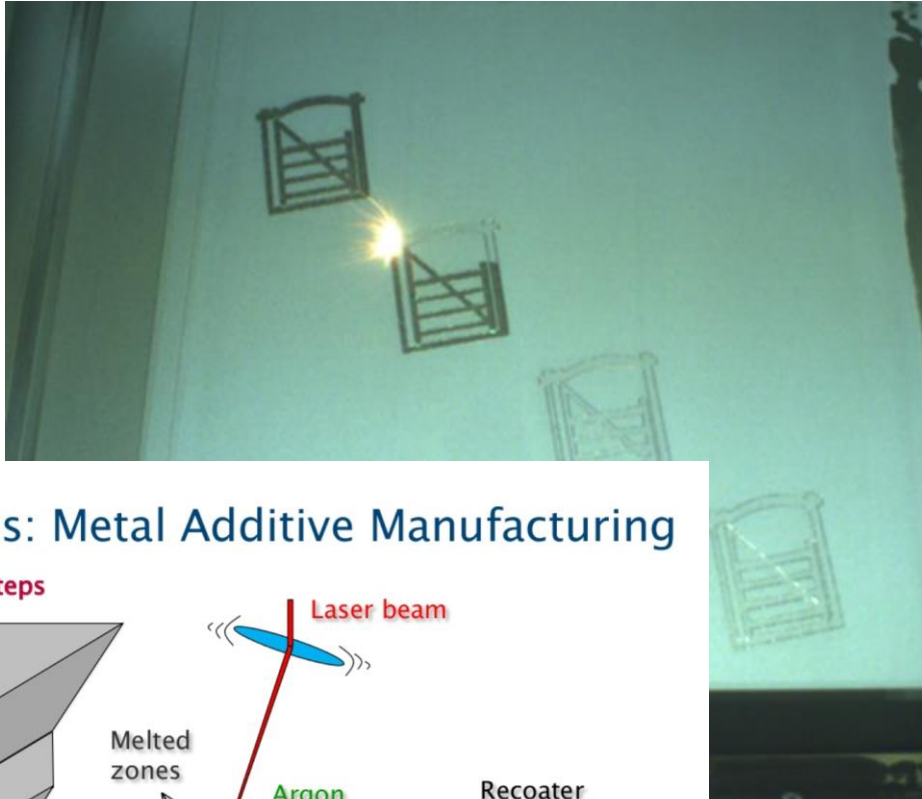


Selective Laser Melting

- Vanligaste metall3D-utskrivningsmetoden
- Direct Metal Laser Sintering – Nästan samma, förutom att metallen inte smälts utan ett bindmedel – kräver mindre lasereffekt
- Metallpulvret smälts lager-efter-lager med en laserstråle
- Strukturen byggs från plattformen
- Stödstrukturer krävs (samma material som utskriven komponent)
- Vanligaste materialen är 316L (syra- och rostresistent) och AISI10Mg (aluminium)
 - Titanium legeringar, verktygsstål, superlegeringar mm.
 - Vanliga kolstål ej lämpliga

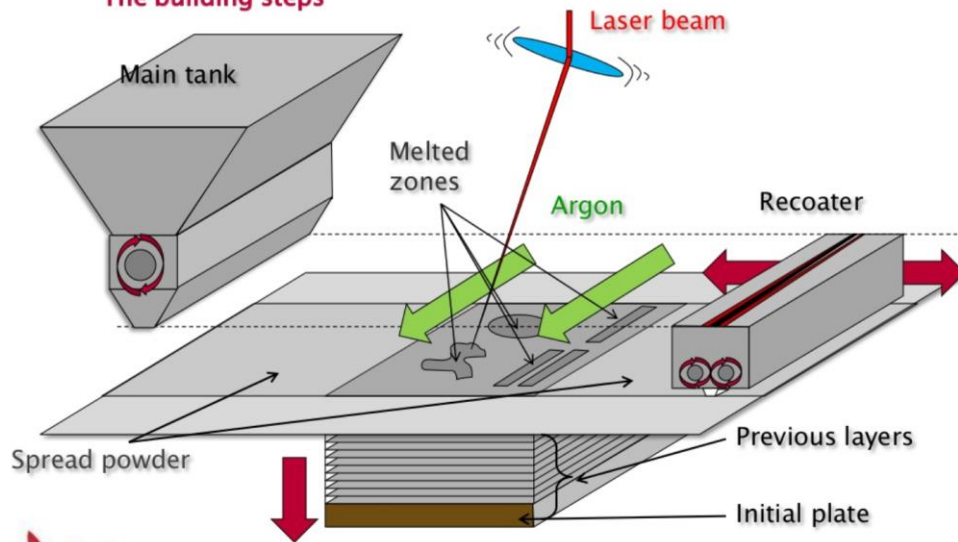


Source: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>



Generalities: Metal Additive Manufacturing

The building steps



© Sirris | www.sirris.be | info@sirris.be | 25/11/2013 13



<https://www.3dprintingmedia.network/slm-solutions-presents-upgraded-slm-280-2-0-3d-printer-tire-technology-exhibition/>



AlSi10Mg

SLM Solutions' Al-Alloy AlSi10Mg is an aluminum-based alloy that is widely used in the additive manufacturing industry for production of functional parts as well as prototypes. AlSi10Mg is often used in applications requiring good mechanical properties and low weight.

Chemical Composition (nominal), %

Element / Material	Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Others	Total Others
AlSi10Mg 20-63 µm	Bal.	9.00-11.00	0.20 - 0.45	0.05	0.55	0.45	0.10	0.15	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15

Mechanical Data ⁵	Formula Symbol and Unit	AlSi10Mg ^{2,3}
Tensile strength	R _m [MPa]	386 ± 42
Offset yield stress	R _{p0,2} [MPa]	268 ± 8
Break strain	A [%]	6 ± 1
Reduction of area	Z [%]	7 ± 1
E-Modul	E [GPa]	61 ± 9
Hardness by Vickers	[HV10]	122 ± 2
Surface roughness	R _a [µm]	8 ± 1
Surface roughness	R _z [µm]	63 ± 10

Material Characteristics

- Very good corrosion resistance
- Good electrical conductivity
- High dynamic toughness
- Excellent thermal conductivity

Typical Application Areas

- Aerospace
- Automotive
- Engineering
- Heat exchangers



316L

SLM Solutions' Stainless Steel 316L is an austenitic high chromium steel with excellent processability on SLM Solutions' additive manufacturing machines. 316L is often used in applications requiring good mechanical properties and excellent corrosion resistance, especially in chloride environments.

Chemical Composition (nominal), %

Element / Material	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	N	P	S	O
316L (1.4404) 10-45 µm	Bal.	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00	1.00	2.00	0.030	0.10	0.045	0.030	0.10

Mechanical Data ⁵	Formula Symbol and Unit	1.4404 / 316L ^{2,3}
Tensile strength	R_m [MPa]	633 ± 28
Offset yield stress	$R_{p0,2}$ [MPa]	519 ± 25
Break strain	A [%]	31 ± 6
Reduction of area	Z [%]	49 ± 11
E-Modul	E [GPa]	184 ± 20
Hardness by Vickers	[HV10]	209 ± 2
Surface roughness	R_a [µm]	10 ± 2
Surface roughness	R_z [µm]	50 ± 12

Material Characteristics

- Very good corrosion resistance
- High strength under elevated temperatures
- High ductility

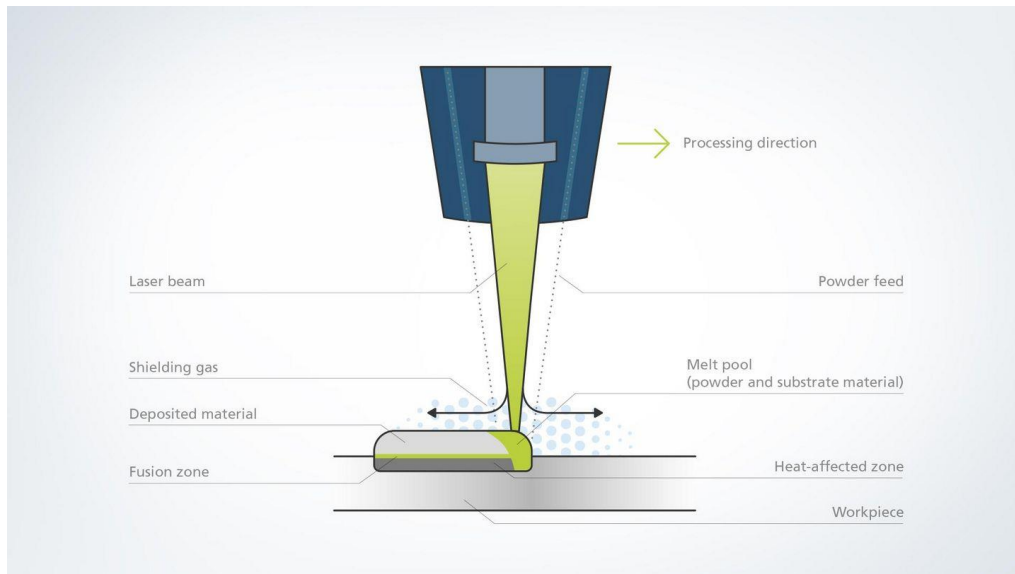
Typical Application Areas

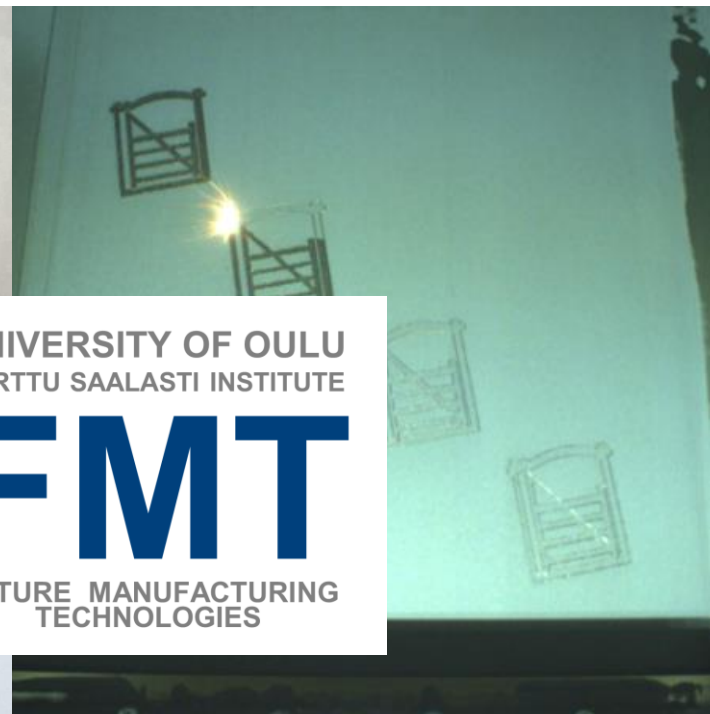
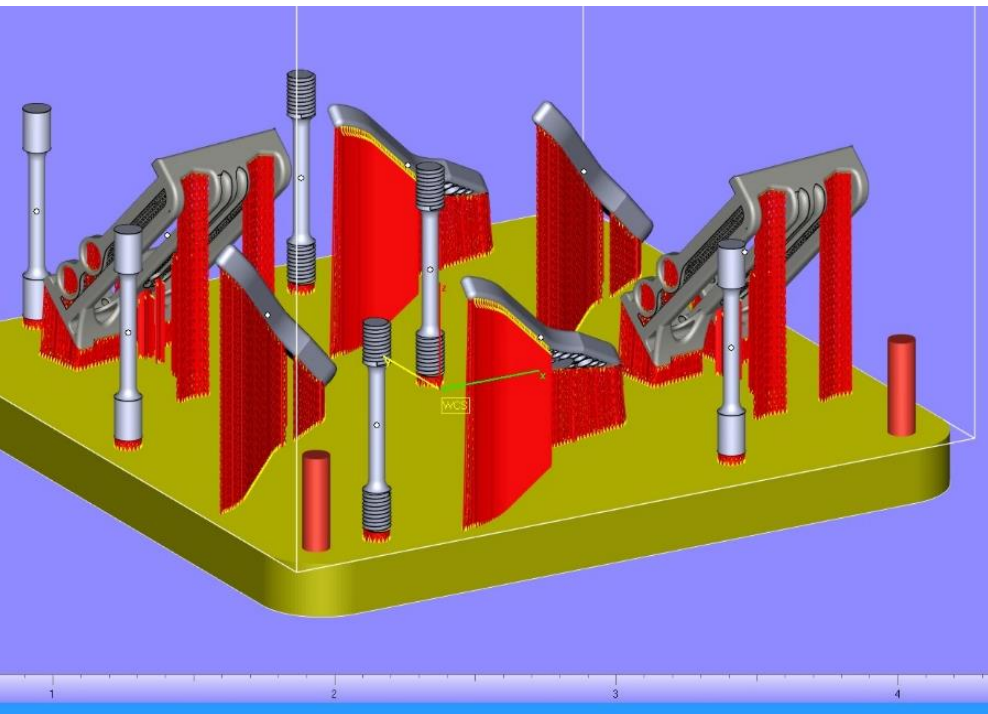
- Aerospace /Automotive
- Surgical Instruments
- Food Industry
- Maritime



Direct Laser Deposition (även Direct Energy Deposition eller Direct Metal deposition)

- Pulver eller tråd svetsas fast på en yta
- Även om maskinerna arbetar genom att tillverka lager, har de ofta flera axlar
- Addera detaljer på befintliga strukturer
- Inte (ännu) lika hög detaljnivå som SLM, men är snabbare
- Tekniken baseras på ytpåsvetsning





UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE
FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





- Extrusion
 - Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modelling
- Powder Bed
 - Selective Laser Sintering
- Jetting
 - Binder jetting
 - Material jetting
- Photopolymerization

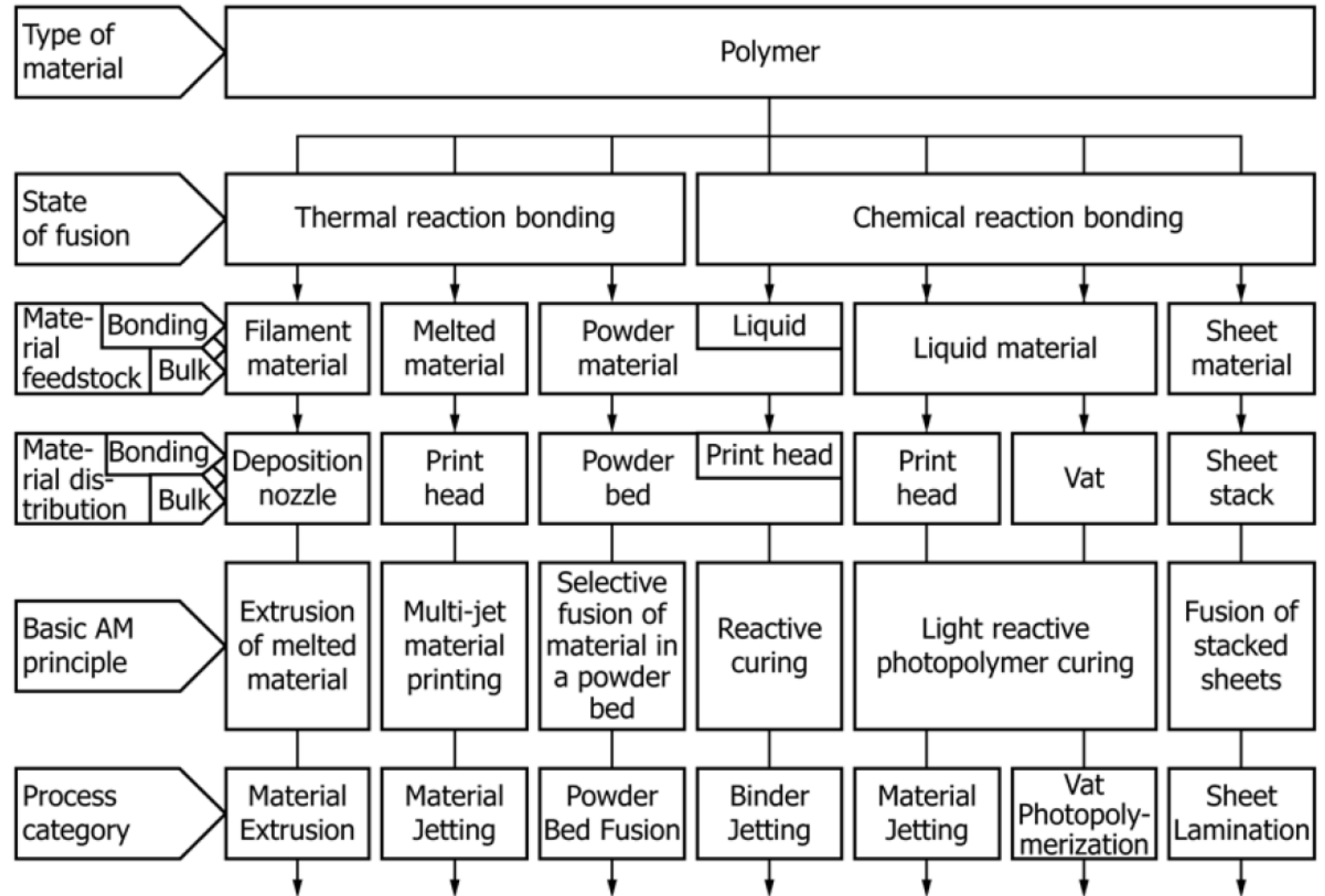
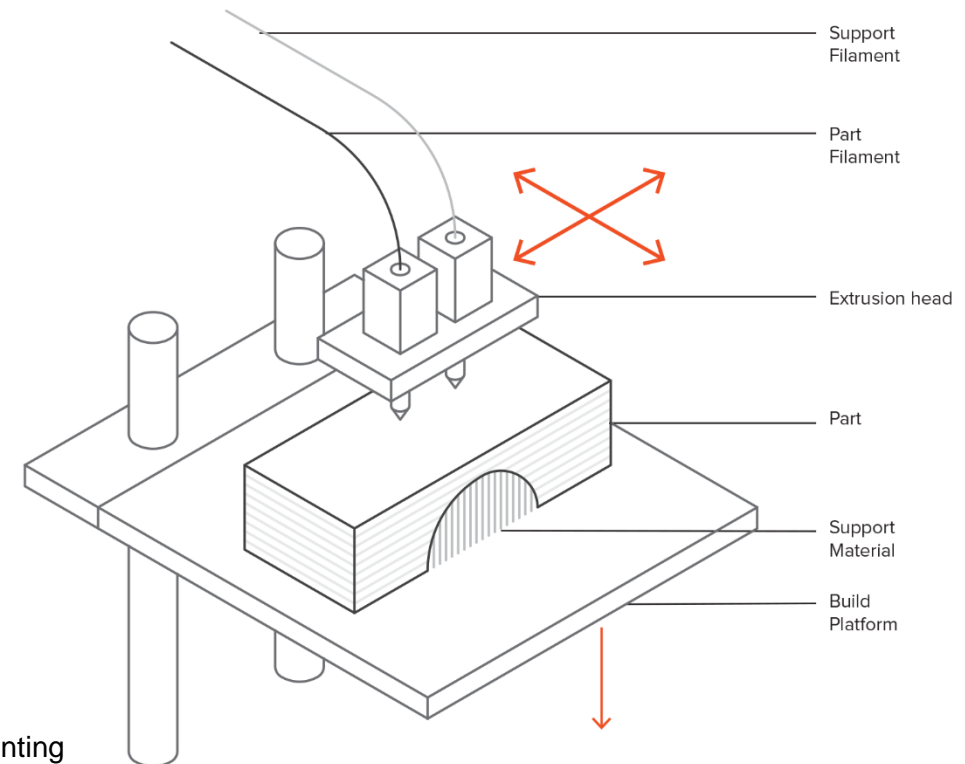
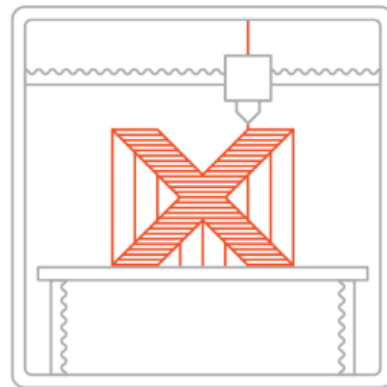
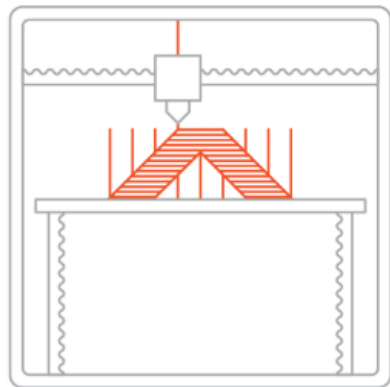
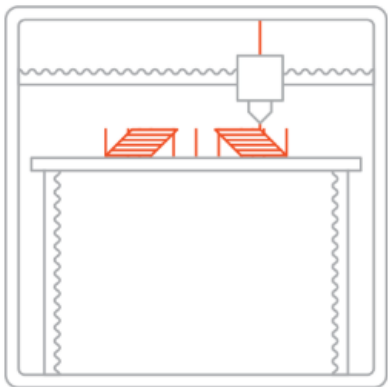


FIG. A1.3 Overview of single-step AM processing principles for polymer materials

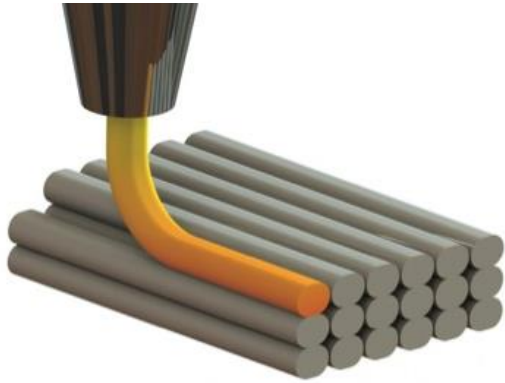


Fused Deposition Modelling

- En annan term för "Fused Filament Fabrication"
- Vanligaste 3D-printingmetoden (kända som bordsskrivare)
- En polymertråd trycks ut genom ett upphettat munstycke som smälts och placeras lokalt för att skapa önskad form
- Flertalet maskiner – från billiga för hemmabruk till dyra industriella
- Multimaterial-utskrifter
- Stödmaterial krävs ofta
- Olika material för olika behov
"From chocolate to PEEK...."
- Lagerbaserad struktur, grov ytfinhet



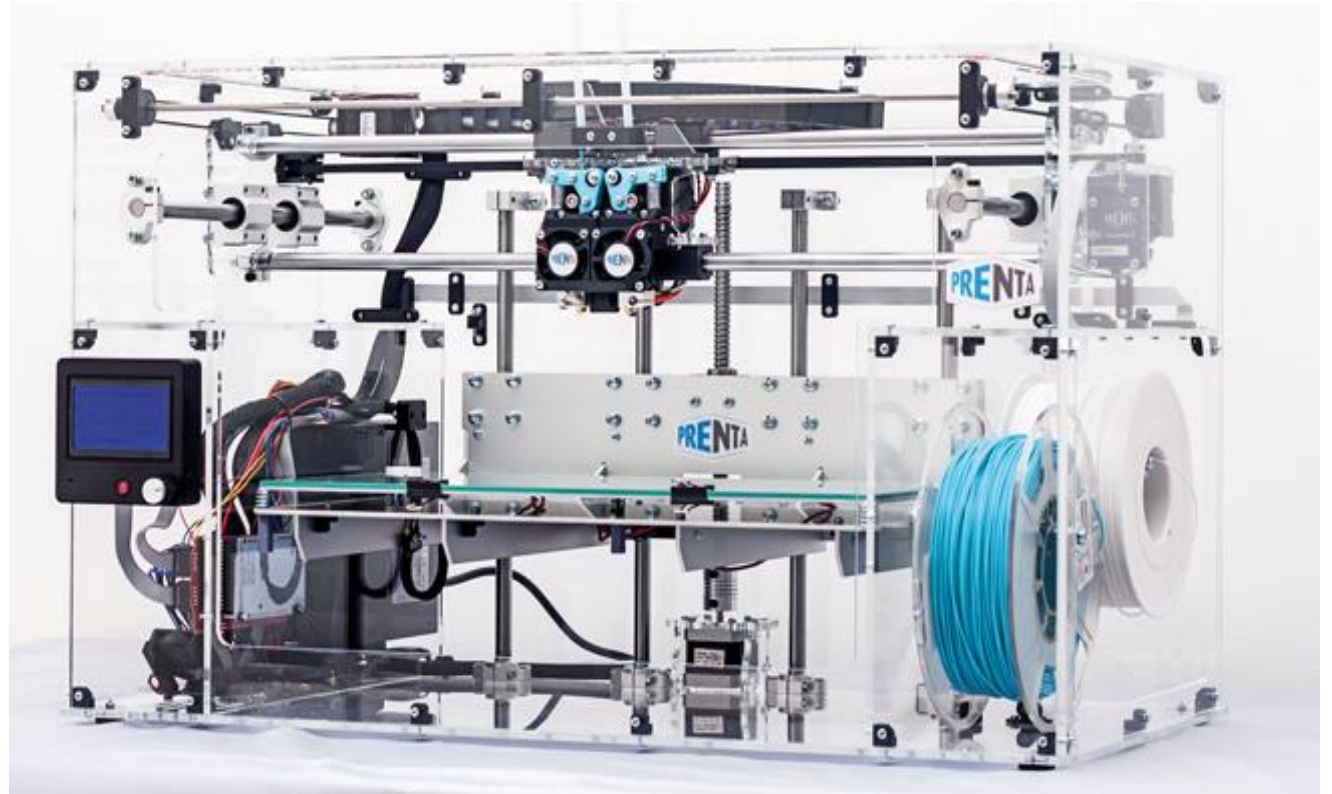
Source: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



<https://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>



28 <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



<https://shop.prenta.fi/laitteet-palvelut/3d-tulostimet/prenta-duo-xl>



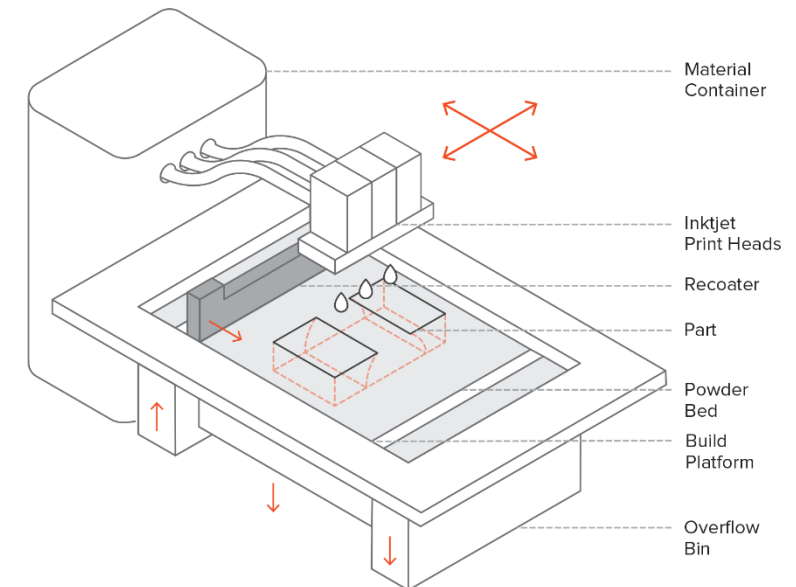
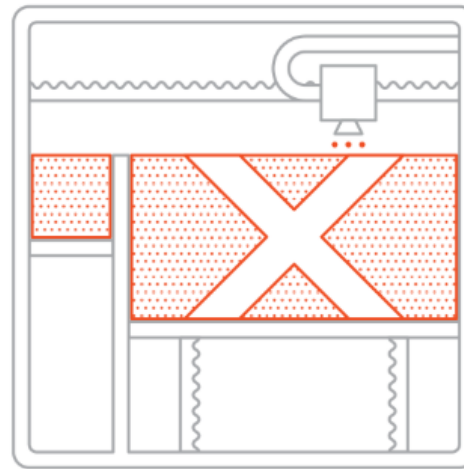
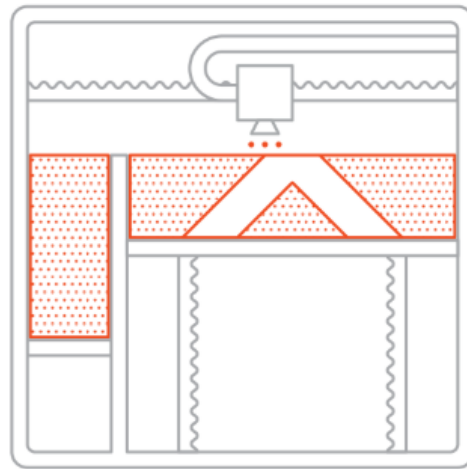
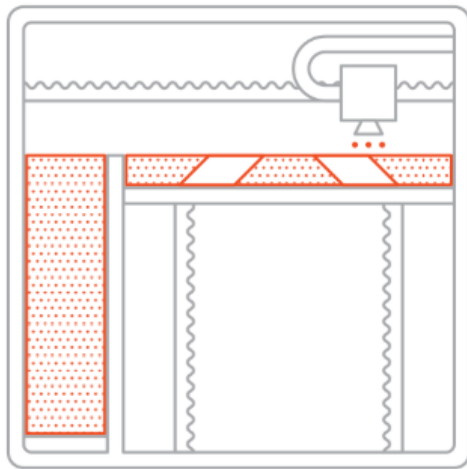
Binder jetting

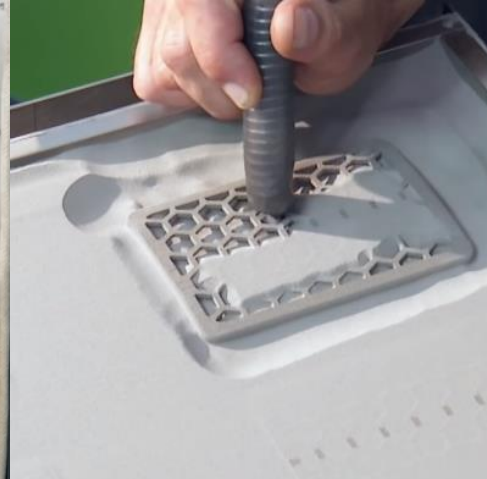
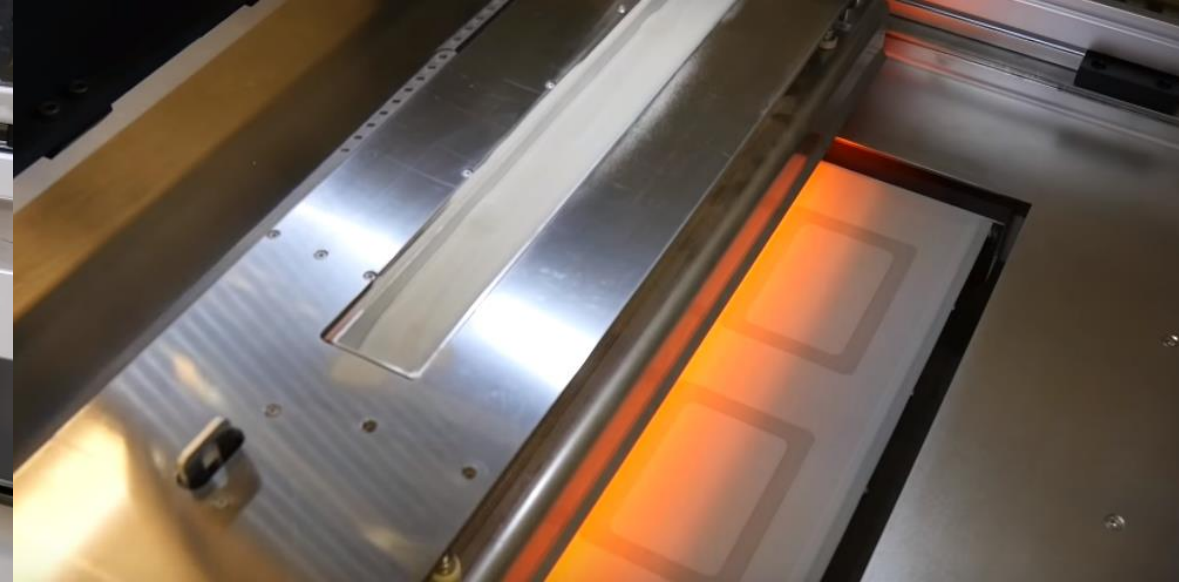
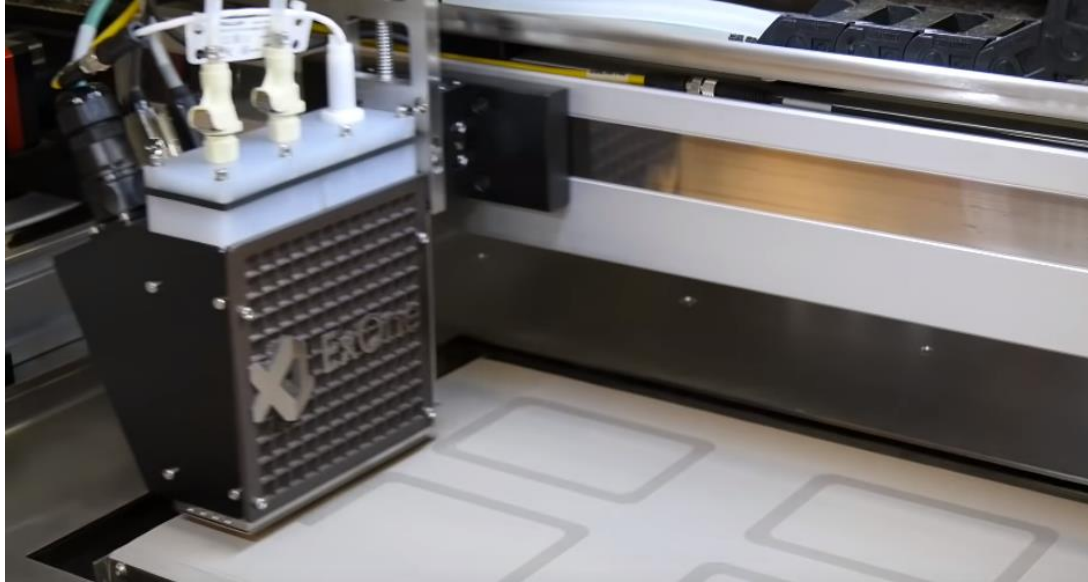
- 3D inkjet printer
- Pulverbädd och tillsats av bindmedel
- Pulver stödjer – inget behov av stödstrukturer
- Multifärg utskrift med plast
- Gjutformsutskrivning – stora skrivare!
- Metallprinting
 - Sintring i ugn

FIRPA:

”Process category in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials, to form the object. The liquid bonding agent remains on the surface of the final object. Although the binder reacts at room temperature, it must cure in the powder bed for a few hours before the parts can be removed.”

<http://www.firpa.fi/html/english.html>







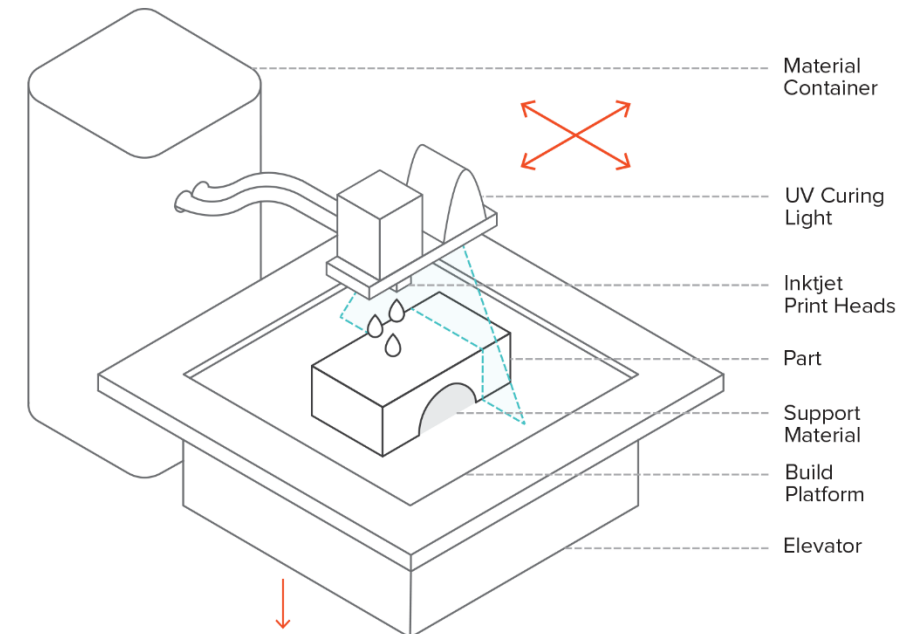
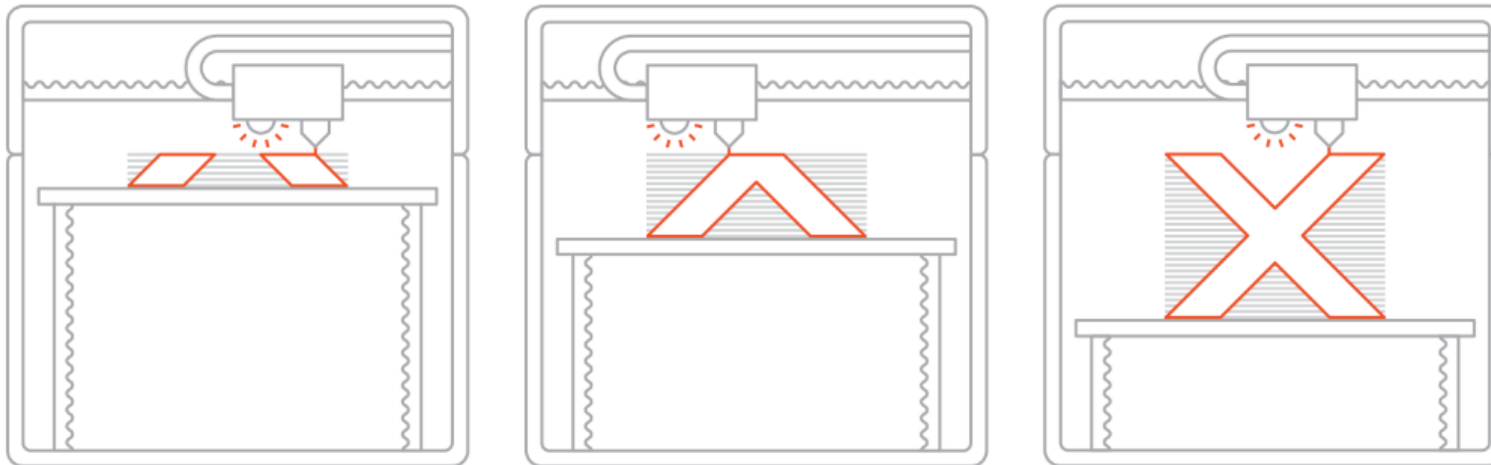
Material jetting

- Utskrift av UV härdade material
 - Vax och fotopolymerer
- Injicerande av materialdroppar
- Stor variation av material (ej metall)
- Multimaterialstrukturer möjliga
- Relativt god ytfinhet
- "Light sensitivity" och mekaniska egenskaper

FIRPA:

"Process category in which droplets of build material are selectively deposited onto the build surface, as one or more print heads move across the build area. Example materials include photopolymer and wax, often kept in material cartridges."

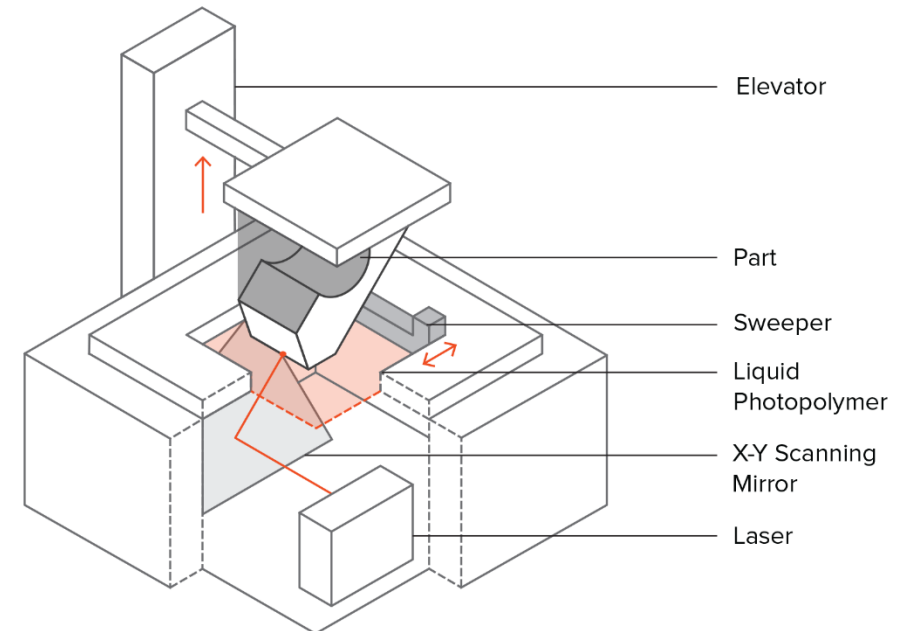
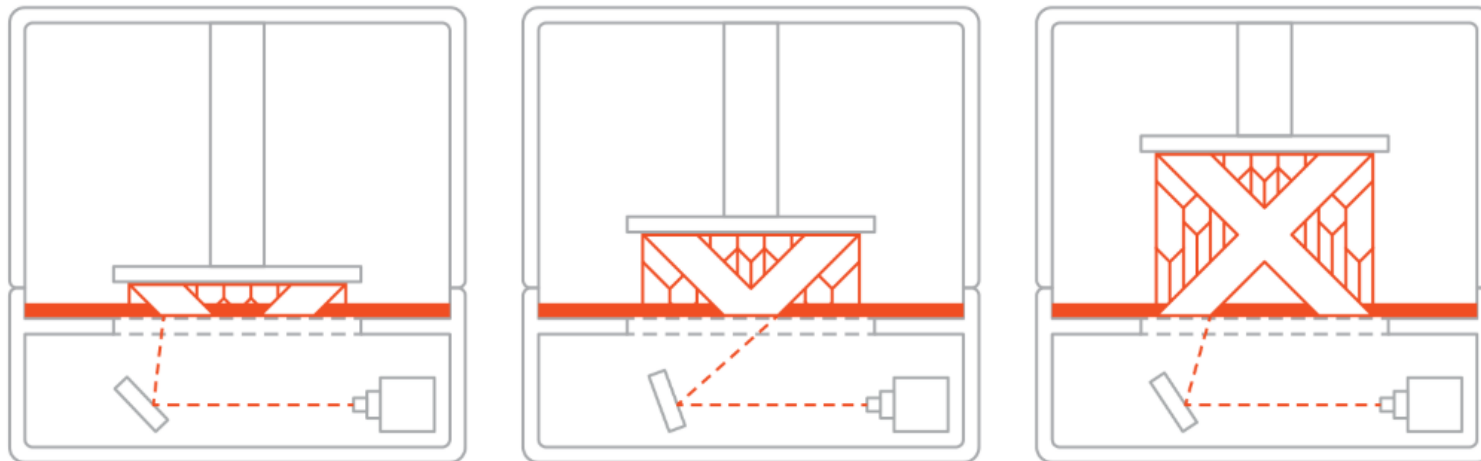
<http://www.firpa.fi/html/english.html>





Stereolithography

- Äldsta 3D-printingmetoderna
- UV härdad polymervätskeprinting
- God ytfinhet
- "Light sensitivity" och mekaniska egenskaper
- Stödstrukturer görs av samma material som komponenten



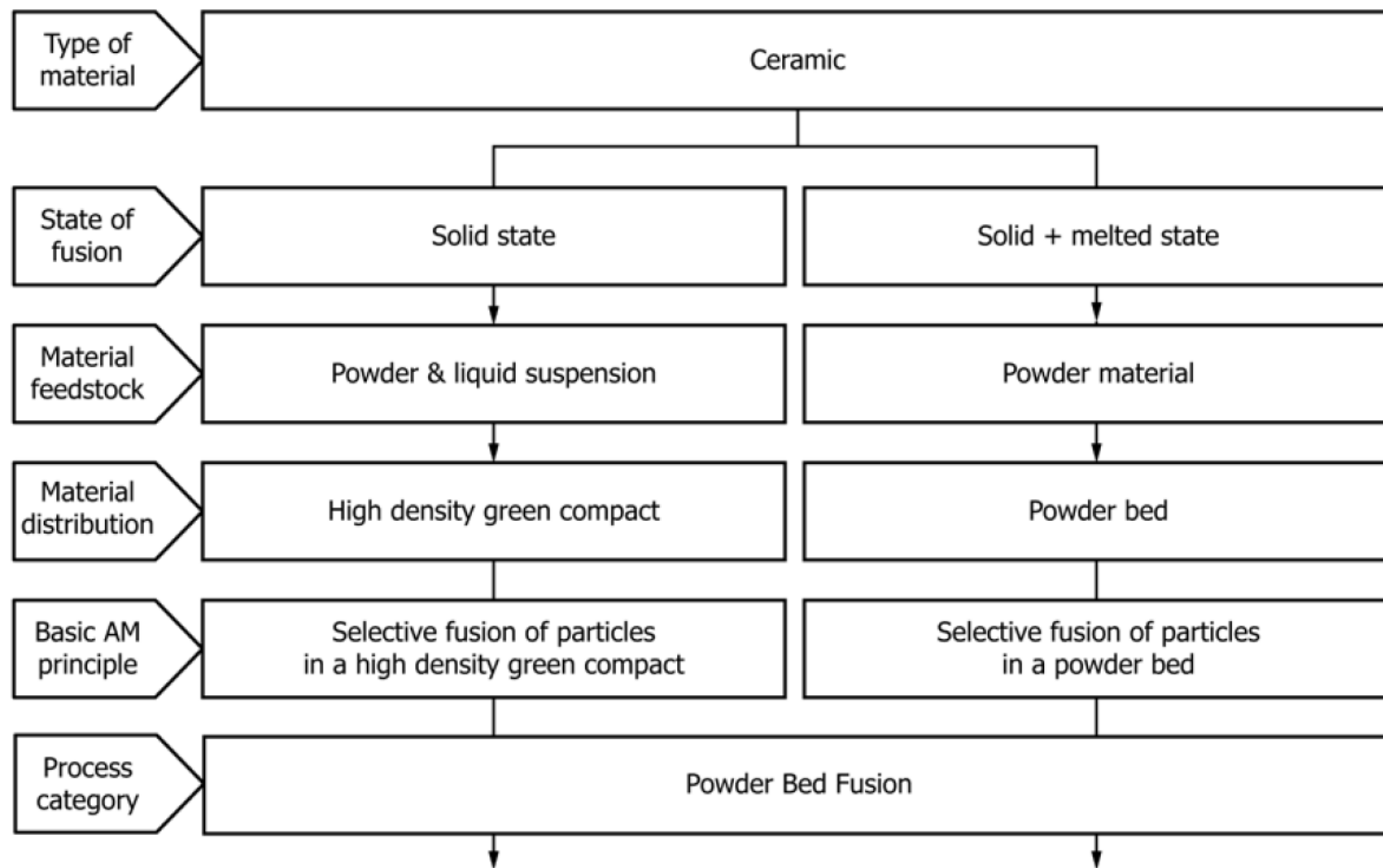


FIG. A1.4 Overview of single-step AM processing principles for ceramic materials





Grönkroppstekniker Multisteps-AMprocesser

- Metaller, keramer och kompositer
- Typiskt under första fasen, det utskrivna materialet binds av medie
- I följande steg förångas mediet, vanligtvis via värmebehandling
- Till sist sintras komponenten
- HIP – Hot Isostatic Pressing (400-2070 bar) och c. 2000 °C behandling används för att komprimera komponenten

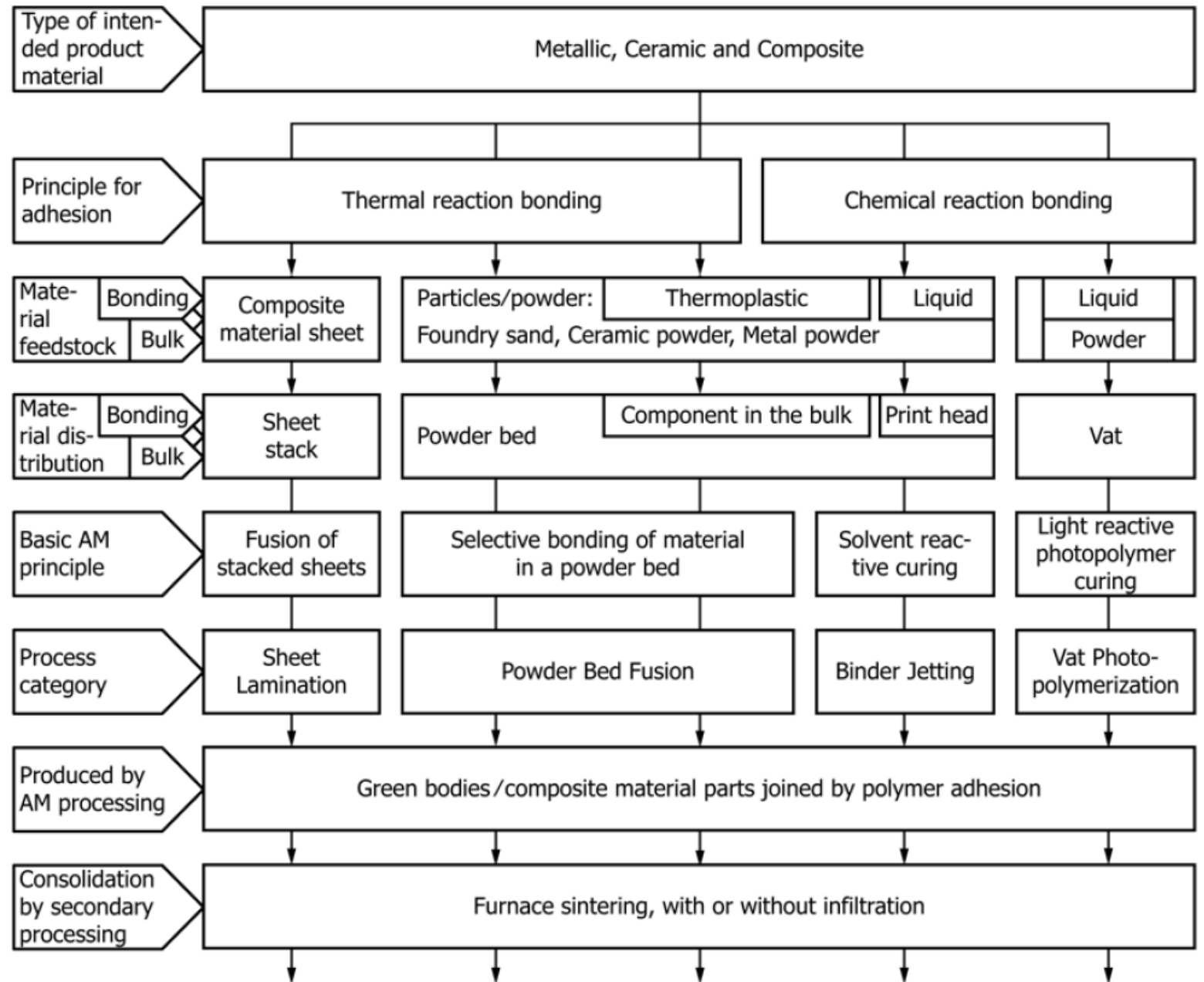


FIG. A1.5 Overview of multi-step AM processing principles for metallic, ceramic and composite materials





DISKUSSION

Powder Bed Fusion

Material Extrusion

Vat Photopolymerization

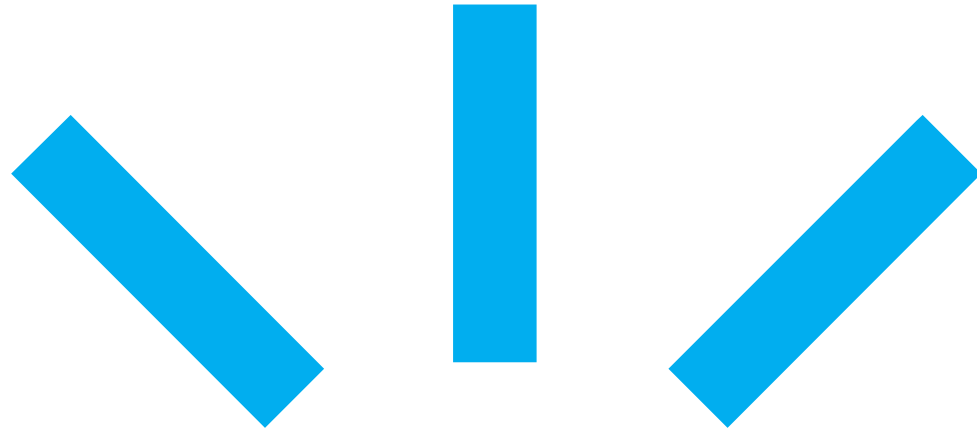
Material Jetting

Binder Jetting

Directed Energy Deposition

Sheet Lamination

- Behov av stödstrukturer
- Behov av efterbearbetning
- ANISOTROPI vid utskrivning
- Geometriska begränsningar
- Material- och mekaniska egenskaper för de tillverkade komponenterna



DFAM

Design For Additive Manufacturing

Desig med additiv tillverkning i åtanke



Innehåll

- **Exempel på utrustning och mjukvara**
- **Process**
- DFAM
- Design av komponenter
- Skapa stödstrukturer och utskriftsparametrar (Magics)
- Bestämma utskriftstider och pris
- Faktorer som påverkar ytfinhet
- Mekaniska egenskaper
- Användande av SLM 280HL printer
- Procedurer efter utskrift
- Efterbearbetning av komponenter
- **DFAM**
- Fallstudie: Topologioptimering
- Fallstudie: Fästa delarna vid en komponent
- **Ytterligare åtgärder**
- Olika printplattformar
- Byte av material
- Pulverkontrollstation



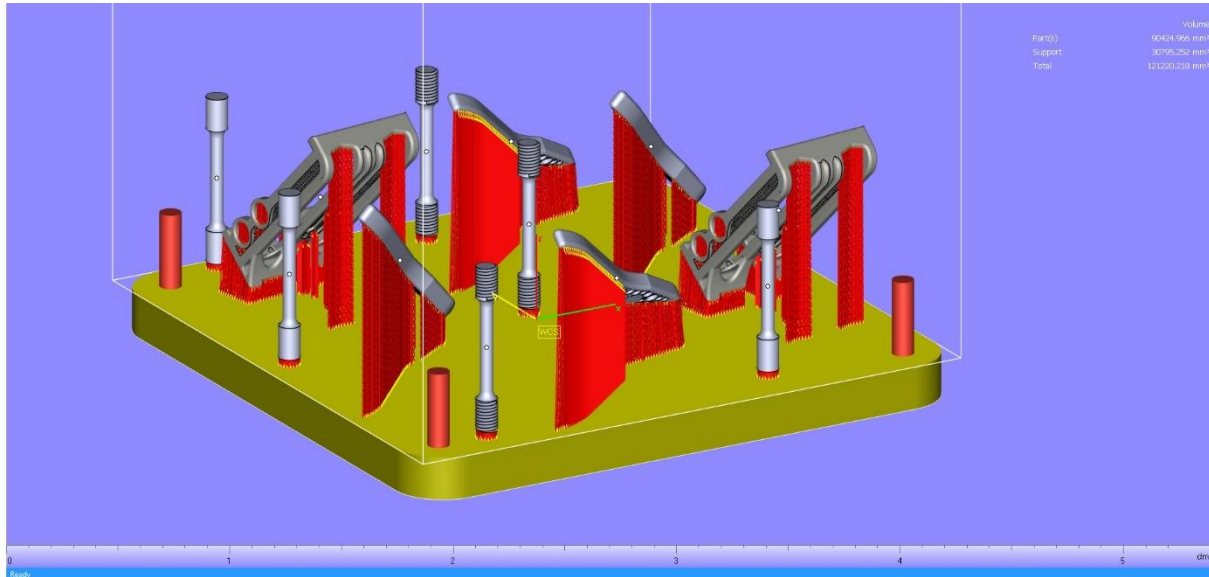
Maskinexempel



- **SLM Solutions 280 HL**
 - Fritt valbara parametrar och möjlighet att byta materialleverantör
 - Största printkapacitet 280x280x365 mm³, minsta 50x50x80 mm³
 - Lagertjocklek 20 – 75 µm
 - 1 x 700W fiber laser
 - Material: AlSi10Mg, AISI 316L, AISI 420, Inconel 718, CoCr and Ti6Al4V. Pulverkornstorlekar för stål typiskt 10-45 µm och aluminium/titan 20-65 µm
 - Gas: Argon eller kväve
 - Lagertjockleksövervakning: LCS (Layer Control System)
 - Ytterligare utrustning: MPM (Melt Pool Monitoring), LPM (Laser Power Monitoring) and HTH (High Temperature Heater)
- **Sievingstation PSM 100**
 - Två olika håltjocklekar : 75 µm (stål) and 100 µm (aluminium och titan)
- **Efterbearbetningsutrustning**
 - Glaskuleblästring, bandsåg, ugn för värmebehandling, handverktyg mm



Machinery and softwares in use



- **3D-design och FE-analys**
 - Modellering av del
 - Topologioptimering
 - FE-analys
 - Spara fil i .STL format
- **3D arbetsplan**
 - Placera delar på plattform ("nesting")
 - Skapande av stödstrukturer för delarna (visat i rött på bild)
 - Justering av maskinparametrar
 - Lasereffekt och fart, lagertjocklek
 - Spara plattform och parametrar till maskinkompatibelt format (.SLM format)
 - Arbetsplaneringsmjukvara för 3D-printing
 - Autodesk Netfab
 - Materialise Magics
 - Etc.
- **Simulation av utskrift**
 - För att bestämma banor för laserstråle i de olika lagren
 - För att se hur parametrar fungerar i olika delar av den utskrivna komponenten
- **Förberedelser för utskrift**
 - Placera plattform för utskrift
 - Justera temperatur för plattformen
 - Minimumtid mellan lager (kyltider)
 - Justera gasflöde
 - Förberedelser för första lager
 - Maskinmjukvara med hjälp av MCS



Process - DFAM

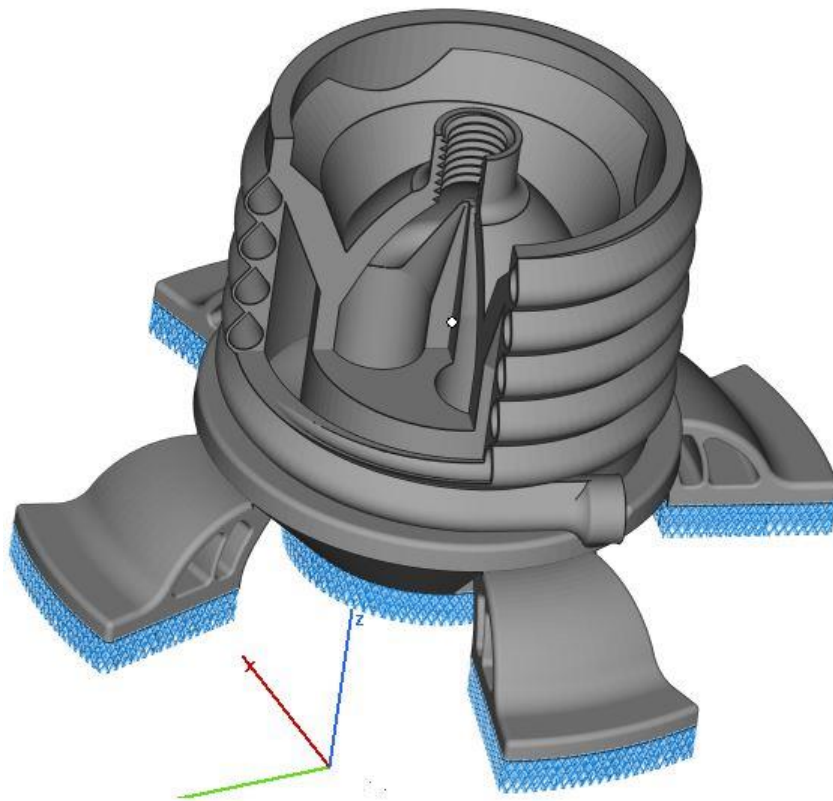


- DFMA = Design for additive manufacturing
- Design av komponenter med tillverkningsmetod I åtanke är väldigt viktigt!
- Geometrisk frihet – Bryta gamla vanor och traditionella modeller!
- Tillverkbarhet, tillförlitlighet och kostnadsoptimering

- **I designprocessen:**
 - Geometrisk FEM-baserad optimering – styrkor och viktoptimering (fallstudie)
 - Minska antalet delar genom att kombinera dom – reducera kostnader vid tillverkning, speciellt för montering (fallstudie)
 - Variation i struktur – ex honeycomb-, nät- och porösa strukturer möjligt
 - Massanpassning – varje del kan vara olika
 - Multi-materialutskrivning (inte ännu tillgängligt i metall 3D-printing) – olika egenskaper/material i samma tillverkade komponent
 - Beaktande utskriftsposition och stödstrukturer redan i designfasen → minimerar efterbearbetning



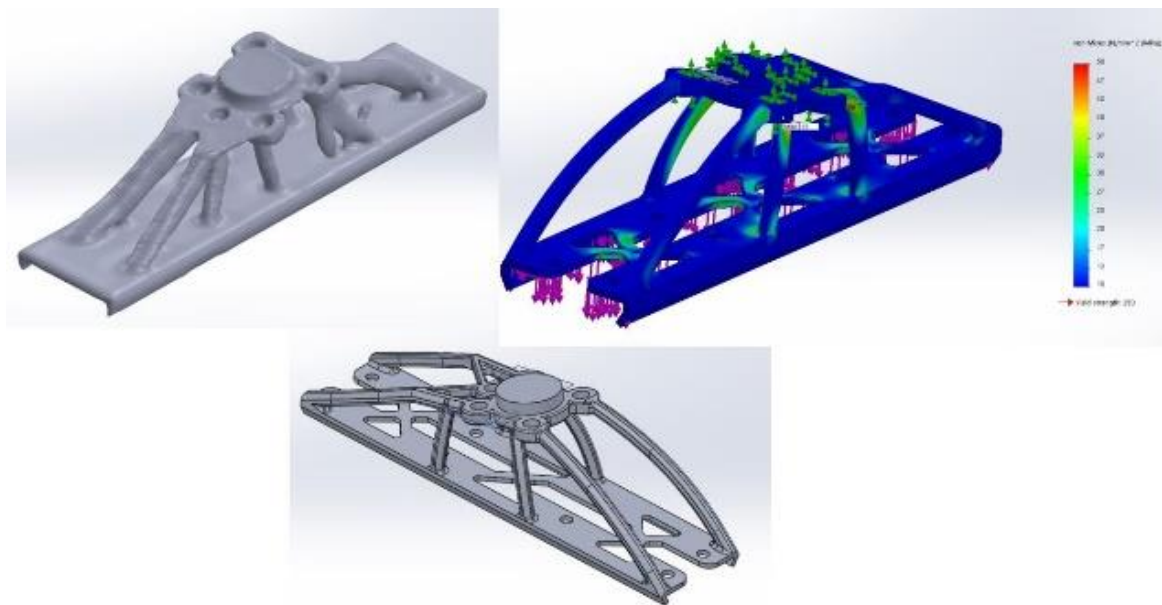
Process – Design av komponenter



- Om en komponent kan kostnadseffektivt bli tillverkad med traditionella metoder kanske den inte är lämplig att bli utskriven med SLM metoden
- Lämpliga 3D-utskrivbara delar är ofta:
 - De som kan nyttja vad metoden erbjuder
 - Strukturellt svåra eller omöjliga att tillverka med andra metoder
 - När flera delar kan skrivas ut ihop som en enda komponent
 - Prototyper, små serier och unika delar
 - Unika och anpassade delar



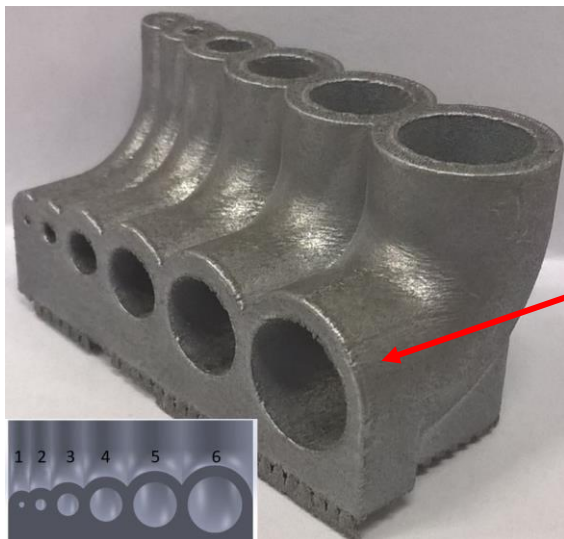
Process – Design av komponenter



- Utöver tekniska krav är det viktigt att tänka igenom tillverkningsmetoden och behov av efterbearbetning
- Det är viktigt att överväga utskriftsriktning och dess effekter på komponenten i designfasen
- Topologioptimering är ett bra verktyg för att optimera styrka och vikt för komponenten på bilden
- **Designguider:**
 - Standarder:
 - ISO / ASTM52910 – 17: Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing
 - VDI 3405 Part 3: Additive manufacturing processes, rapid manufacturing – Design rules for part production using laser sintering and laser beam melting
 - Fria Guider:
 - Fraunhofer Institute: DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING Guidelines and Case Studies for Metal Applications (http://canadamakes.ca/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-15_Industry-Canada_Design4AM_141283.pdf)
 - Reinshaw: Design for metal AM - a beginner's guide (<http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>)
 - Design Guidelines by Materialize (<http://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/design-guidelines>)
 - Erin Komi (VTT): Design for Additive Manufacturing (<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03159-16.pdf>)



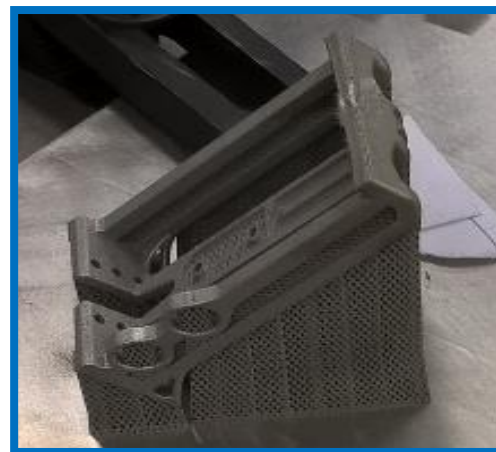
Process – Designa komponenter



Supports:
AlSi10Mg

Begränsningar

- Minsta vinkel utan stödstrukturer:
 - För stål är det 40-45 grader, beroende på geometri
 - Långa och smala stavar kan skrivas utan stöd även vid 45 graders vinkel
 - Aluminium kan skrivas ut även vid en 30-graders vinkel
 - Ytfinhet minskas markant (gradation-effekt)
- Cirkulära horisontella hål
 - Stål mindre än 5 mm
 - Aluminium även upp till 10 mm
 - Geometri av cirkulära hål blir till en mer oval form
 - Hål i bild 1 mm – 10 mm
- Materialbegränsningar
 - Värmekonduktivitet skiljer sig mellan aluminium och stål
 - Skillnad i stödstrukturer



Supports: 316L



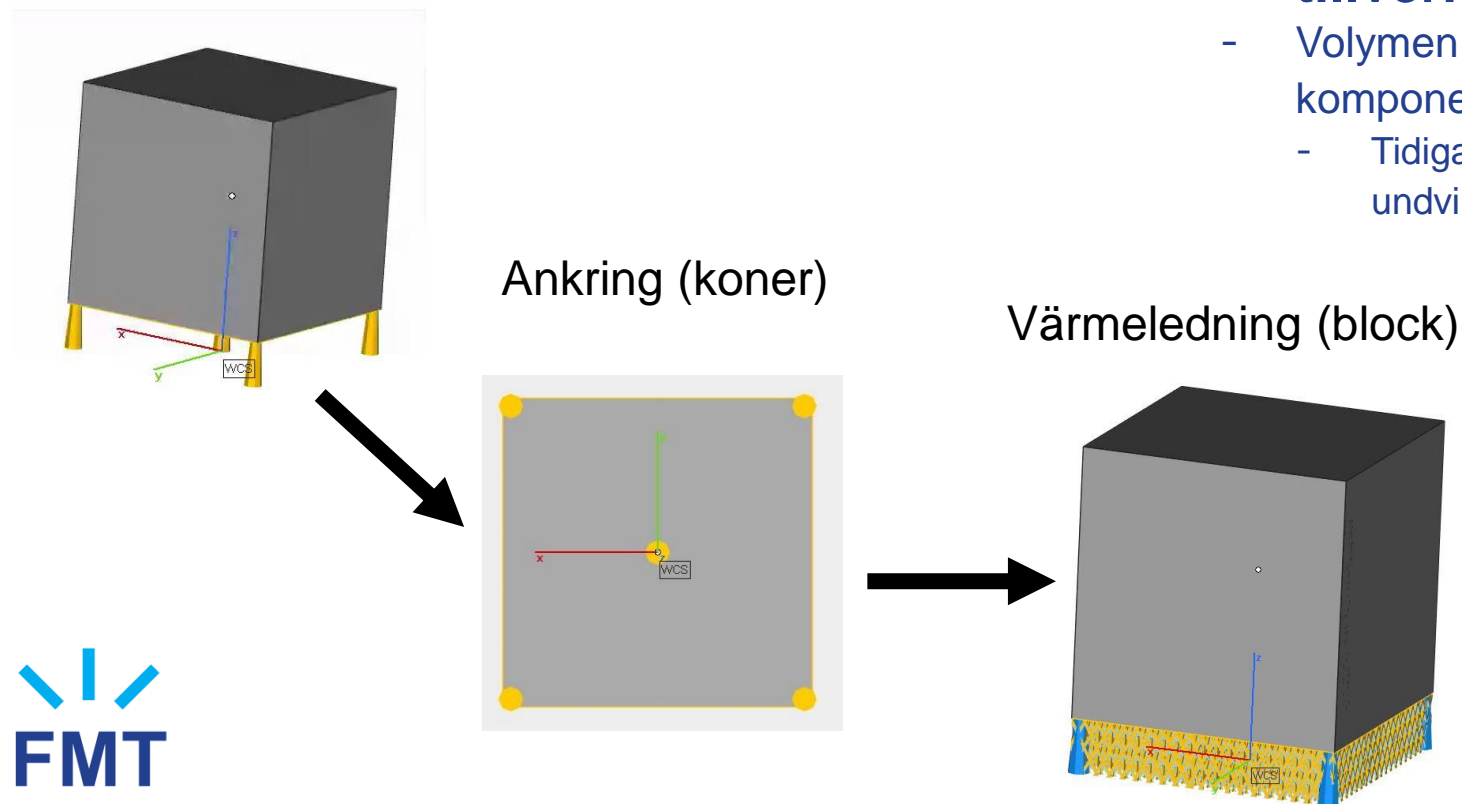
Process – Design av komponenter

– Stödets syfte

- Att leda värme från komponent till byggplattform så effektivt som möjligt
- ”Ankrar” komponenten vid plattformen för att motverka deformation pga värme

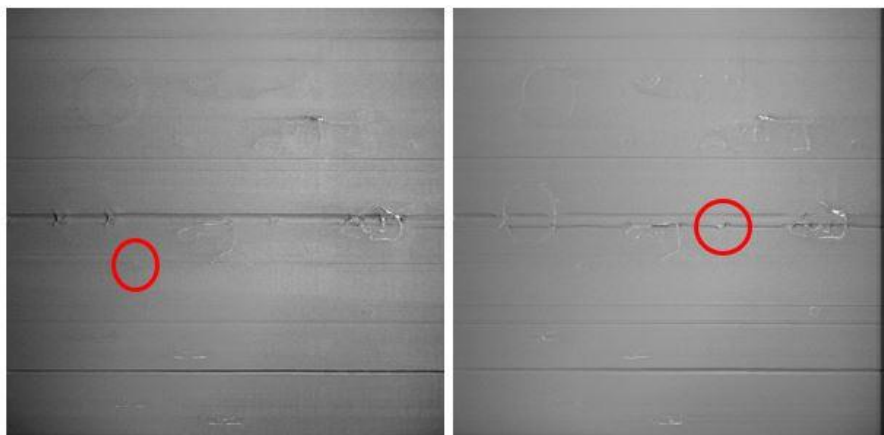
– En komponent är lämplig för additiv tillverkning när

- Volymen hos stödstrukturerna är mindre än själva komponenten
- Tidigare lager stödjer följande lager → Stödstrukturer kan undvikas

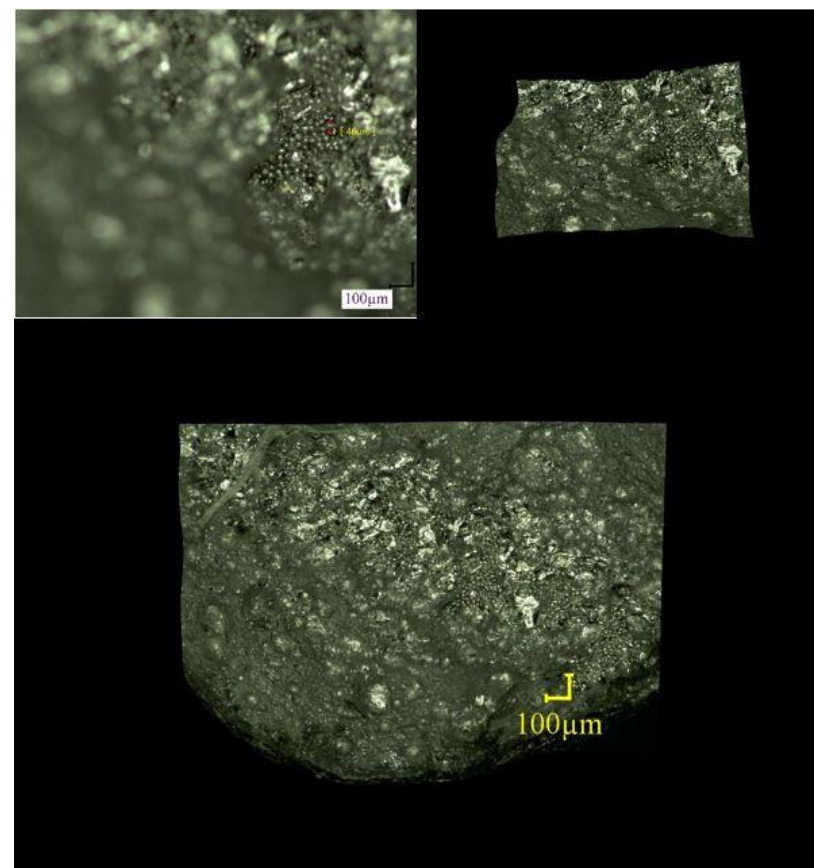




Process – Design av komponenter



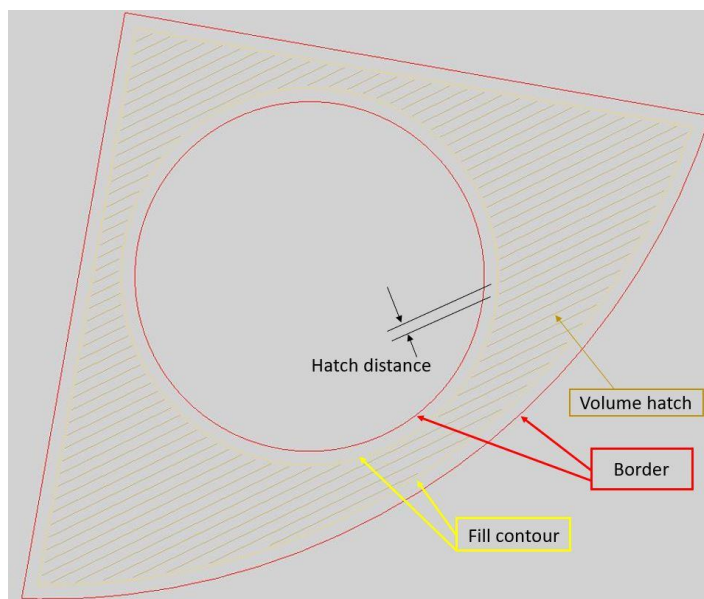
- **Bilder visar pulverspridarbladet kollidera med komponenten (vikt av lämplig design)**
- Dålig geometri och otillräckligt stöd → porös mikrostruktur och osmälta pulverpartiklar!
- Dåliga mekaniska egenskaper





Process – Skapande av stöd och utskriftsparametrar

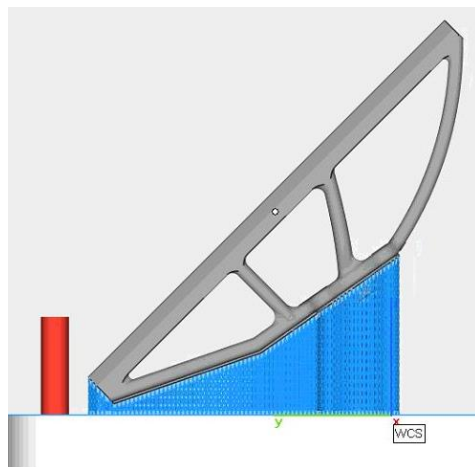
- Överföra delar till 3D-printing pre-processing mjukvara i STL format
 - Placera delarna på plattformen
 - Bestämna orientering av delar
 - Design av stöd
 - Val för stöd ex punkt, linje, e.g. point, line, kil etc
 - Olika material har olika behov av stödstrukturer
 - Val av laserparametrar för olika delar (bild) ex:
 - Lasereffekt
 - Laserhastighet
 - Laserrastreringsinställningar
 - Val av lagertjocklek
 - Skapande av konfigurationsfil (.SLM)



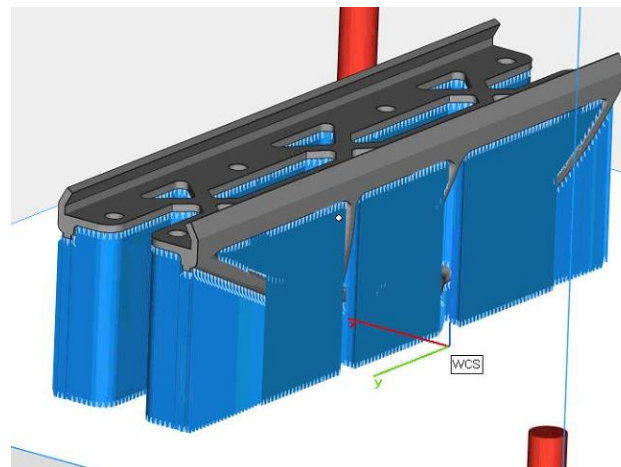


Process – Bestämma printingtid och kostnad

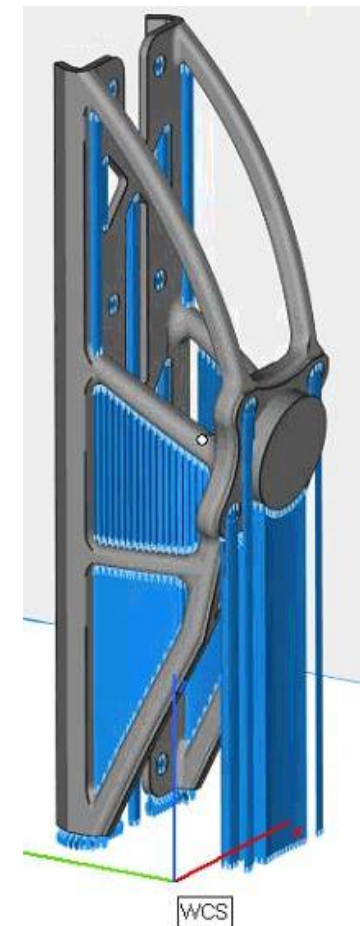
Tid att lägga pulverlager +
lasertid + kyltid mellan lager =
1 layer printing time



45 deg (30 μm , AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 10875 [mm³]
Printing time: 12 h 30 min
Post-processing: easy



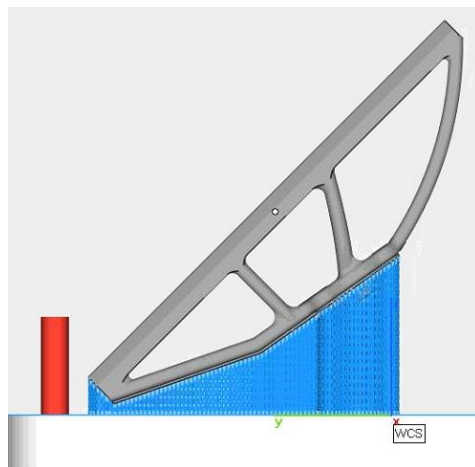
0 deg (30 μm , AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 66165 [mm³]
Printing time: 8 h
Post-processing: hard



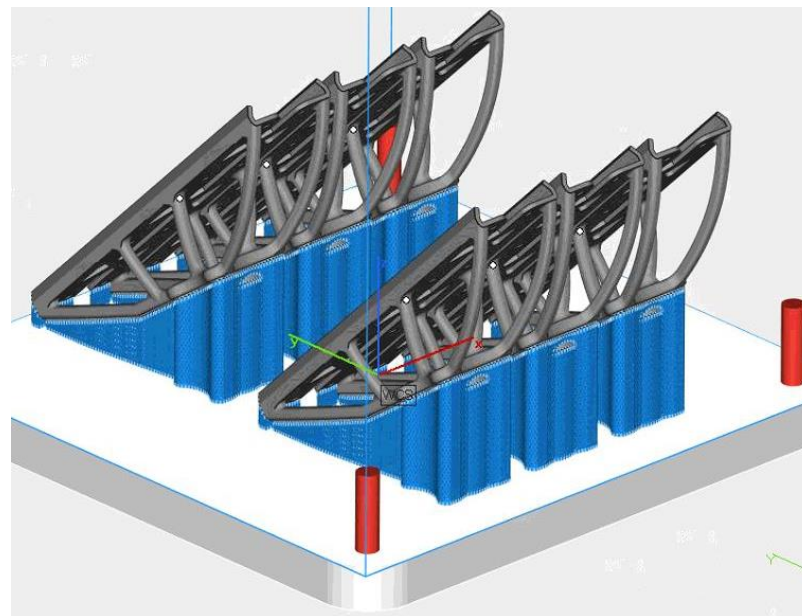
90 deg (30 μm , AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 9749 [mm³]
Printing time: 15 h 30 min
Post-processing: medium



Process – Bestämma printingtid och kostnad



45 deg (30 μ m, AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 10875 [mm³]
Printing time: 12 h 30 min
Printing cost/part: 1000 € + post-processing



6 kpl 45 deg (30 μ m, AlSi10Mg):
Part volume 223218 [mm³]
Support volume 65250 [mm³]
Printing time: 29 h 30 min
Printing cost/part: 393 € + post-processing



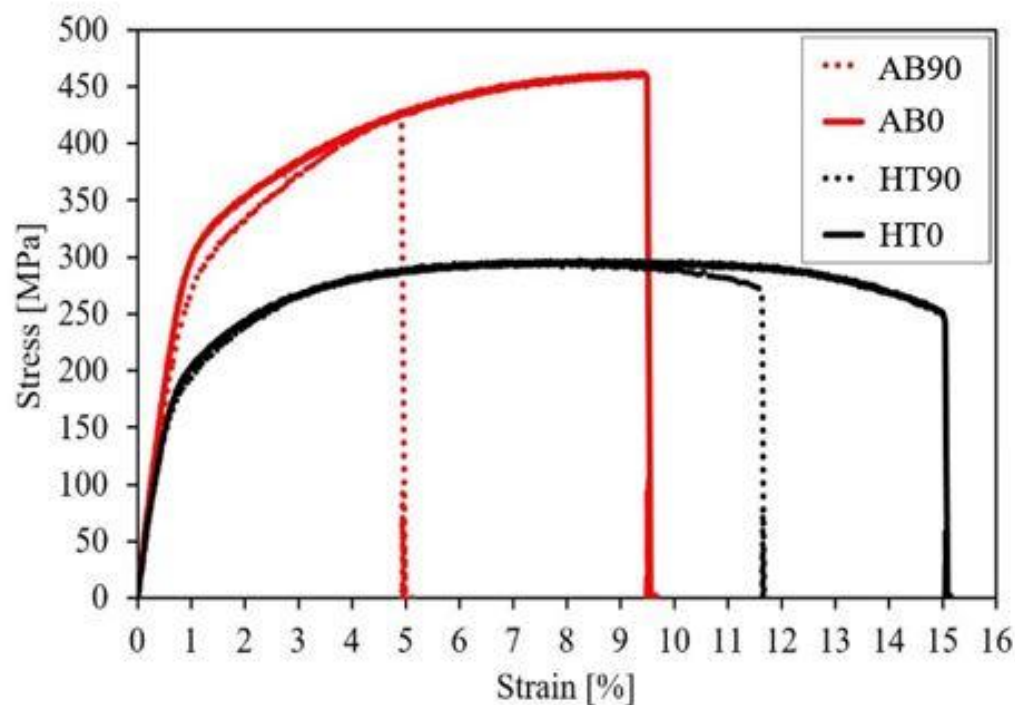
Process – Faktorer för ytkvalitet

- Lagertjocklek
- Geometri för komponent
 - Topp- och undersideytor och vinklar mot det horisontella planet
 - Partikelstorlek för metallpulvret som används
 - Ofta:
 - Stål 10-45 μm
 - Reaktiva material aluminium och titan 20-63 μm
 - Laserparametrar för dessa ytor





Process – Mekaniska egenskaper



Dragprover i två riktningar med AlSi10Mg som testmaterial. Både med och utan värmebehandling

– Påverkande faktorer

- Komponentgeometri
- Rätt val av material
- Anisotropi av material
 - Komponentriktning är av betydelse
- Laserparametrar speciellt på insidan (volum- hatch och hatchavstånd)
- Moisture percentage of the powder < 5 % → Prevents porousness
- Layer thickness

Parameter set	Yield strength [MPa]	Ultimate Strength [MPa]	Uniform Elongation %	Total Elongation %
Set 1	491 ± 2	645 ± 4	16.4 ± 0.1	30.1 ± 0.5
Set 2	504 ± 1	660 ± 2	17.6 ± 0.5	31.8 ± 0.2
Set 3	538 ± 10	701 ± 2	19.1 ± 0.3	33.4 ± 0.4
Reference set	290 ± 3	612 ± 2	47.9 ± 0.2	61.7 ± 0.4

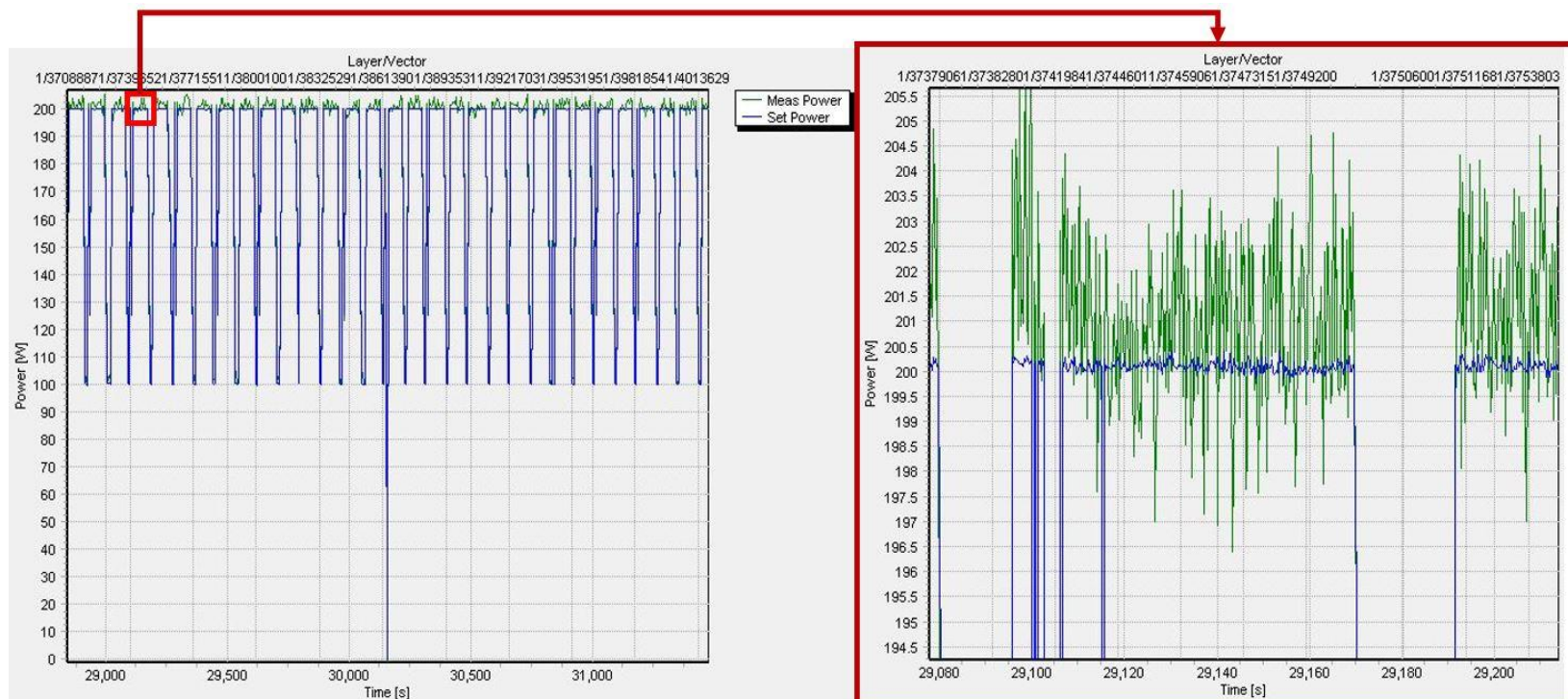
Dragprover med 316L-material med tre olika parametrar, värmebehandlade:

- Set 1 $E_d = 101 \text{ J/mm}^3$
- Set 2 $E_d = 79 \text{ J/mm}^3$
- Set 3 $E_d = 61 \text{ J/mm}^3$



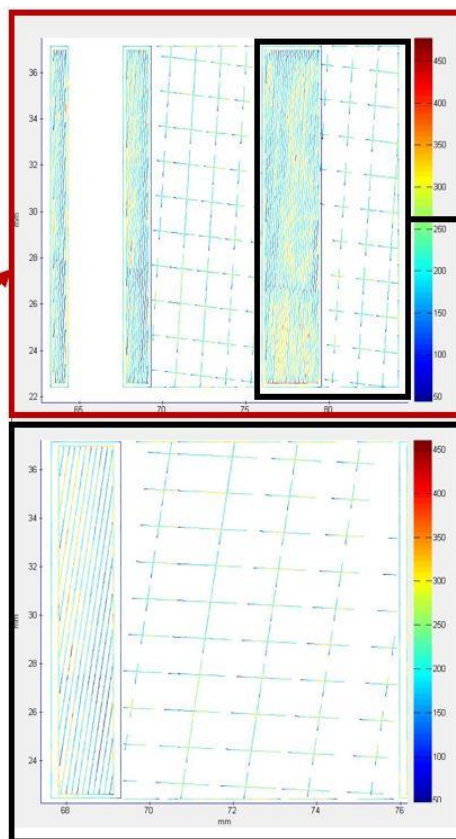
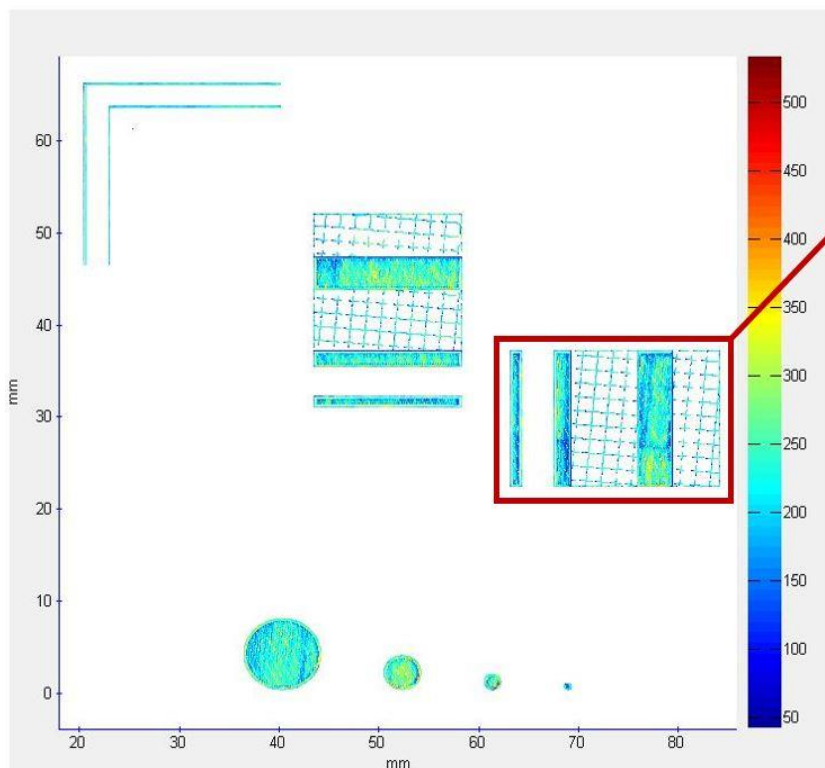
Process – Mekaniska egenskaper

- Övervakningsverktyg - LPM (Laser power monitoring) och MPM (Melt Pool Monitoring)
- Maskintillverkare har börjat utveckla olika mjukvaror för att observera/visualisera kvalitet i utskrift
- LPM används för att övervaka lasereffekt i realtid
 - Märker när nomilenna output och riktiga effekten skiljer sig signifikant
- Gasanalysator



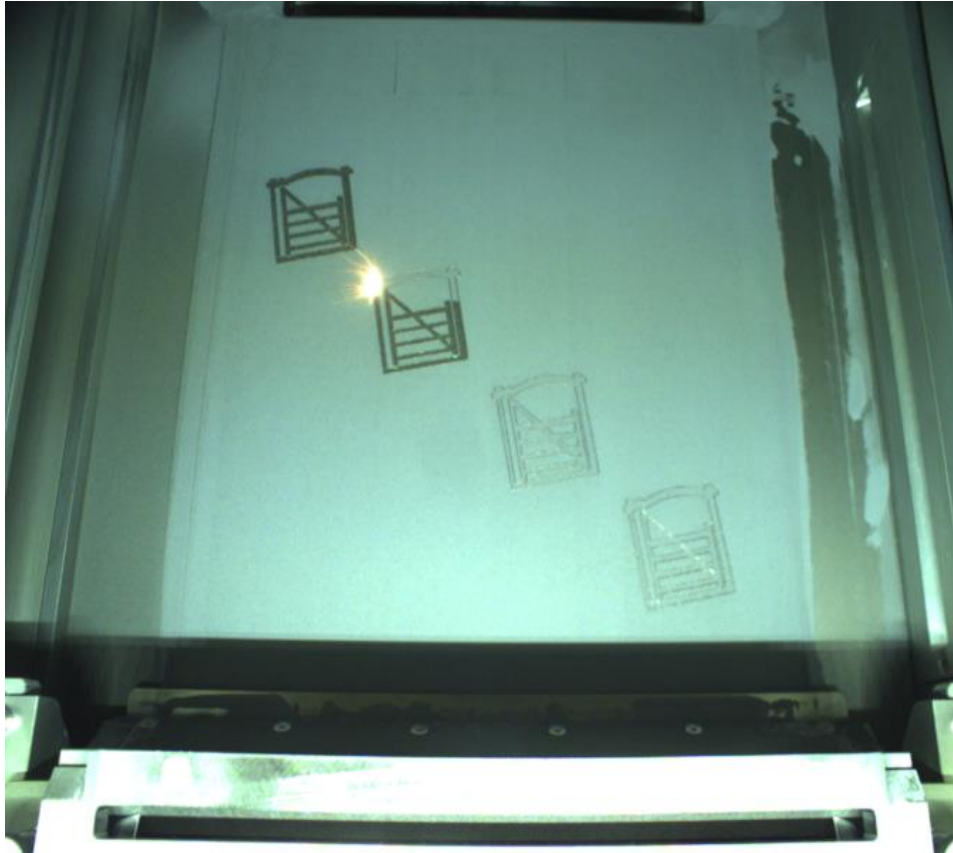


Process – Mekaniska egenskaper



- Övervakningsverktyg LPM (Laser power monitoring) och MPM (Melt Pool Monitoring)
- MPM används för att övervaka den producerade smältpölen skapad av laserstrålen i realtid (temperaturbaserad)
 - Noterar avvikelser i smältpölen (ex porer)
 - Om en av komponenterna (eller dess del) inte skrivits ut rätt kan MPM användas för att bedöma området så att komponenten kan omdesignas
 - Målet är att nå en bra temperaturhistorik för smältpölen

Process – Användande av SLM 280HL printer



- Exporting av konfigurationsfil till maskinens MCS (.SLM)
- Möjliga maskinparameterändringar
 - Kylningstid mellan lager
 - Matningsmaterial
 - Gasflöde (argon, kväve)
 - Ställa in plattformstemperatur
- **Startinställningar**
 - Plattform och kalibrering av pulverfördelarblad - startnivå
 - Rengöring av laserns skyddsglas
 - Riktigt tunt första lager av metallpulver
 - Fylla byggkammare med skyddsgas → anoxic state
- **MPM start**
- **LPM start**
- **Start av printing**
- **Under byggande behövs det särskilt observeras :**
 - Pulver läggs jämnt och skyddsgas strömmar som det ska



Process – Procedures after printing



– När utskrift är färdig

- Ta hand om pulvret i maskinen
 - Plattformen lyfts upp manuellt så att pulvret kan flyttas med borste till uppsamlingsbehållare
 - Detta upprepas tills plattan är tillbaka vid startposition
- Återanvändbart pulver skiktas och återförs till maskinen (bild)
- Ta ut byggplattform från maskinen
- Rengöring av laserns skyddsglas och kammare
- Ta bort delar från byggplattformen
 - Delar värmebehandlas ofta (avlastning av spänningar, annealing), när de fortfarande är kvar på plattformen
- Ta delar till efterbearbetning
- Rengöring (och ev slipning) av plattformen → montering av plattform tillbaka i skrivare



Process – Efterbearbetning av komponenterna



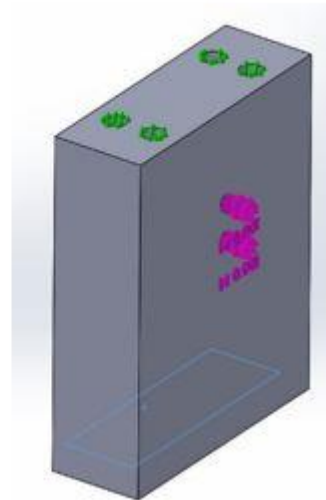
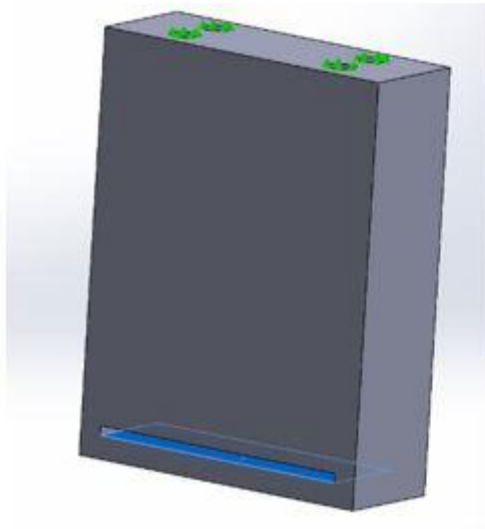
- Oftast är komponenterna inte färdiga för bruk direkt efter utskrift, efterbearbetning behövs
 - Rengöring av komponent (komponent + stödstruktur) från kvarvarande pulver
 - Värmebehandling
 - Avlägsna komponenten från plattformen och ta bort stödstrukturer
- **Efterbearbetning och metoder är exempelvis:**
 - Mekaniskt ta bort delar från plattform, ex via sågar eller EDM
 - Industriella rengöringsmetoder (ex ultrasonisk rengöring)
- **Fräsning**
- **Slipning**
- **Värmebehandlingar**
- **Kemisk behandling, ex etsning**
- **Blästring**
- **Ytbeläggning**



DFAM – Topologioptimerings fallstudie - robot hand

Steg 1:

- Skapa en massmodell
 - Storleksbegränsningar
 - Mätningar av massmodellen
 - Förutsättningar
 - Fastspänningspunkter
 - Spänningar/krafter





DFAM – Topologioptimerings fallstudie - robot hand



Steg 2:

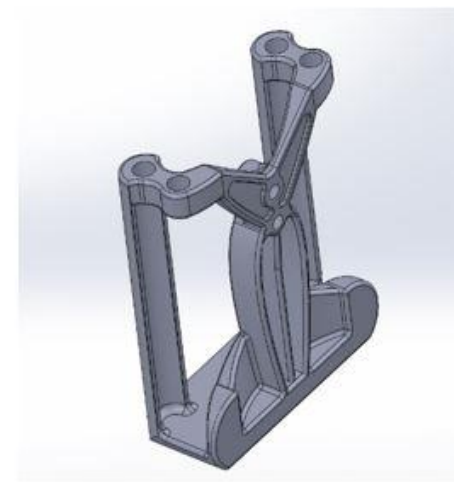
- Första FEM-beräkningsresultat
 - Optimering gällande styrka och vikt
 - I detta fall var målet att reducera 75% av vikten
 - Avklarat preliminära mål, visat i figur
 - Var spänningar uppstår
 - Egenskaper för komponenten
- Tar inte i beaktande tillverkningsmetod → omdesign



DFAM – Topologioptimerings fallstudie - robot hand

Steg 3:

- Omdesign
 - Drar nytta av resultat från första FEM optimeringen
 - Beaktar även begränsningar av tillverkningsmetod
 - Val av bästa orienteringsriktning (70 grader från horisontala planet), som designen baseras på

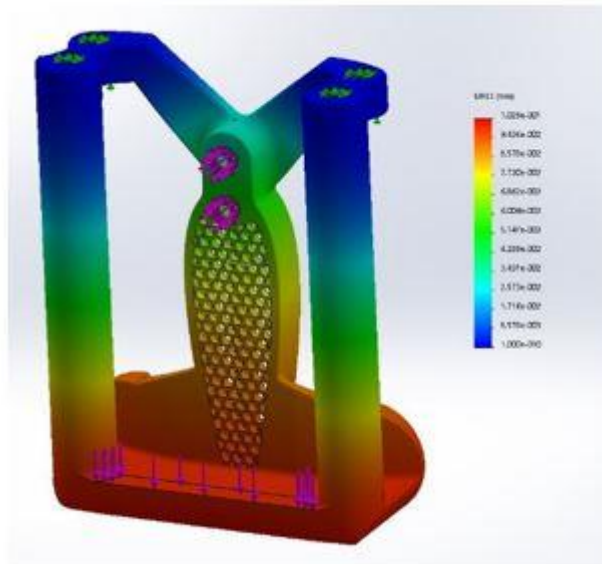
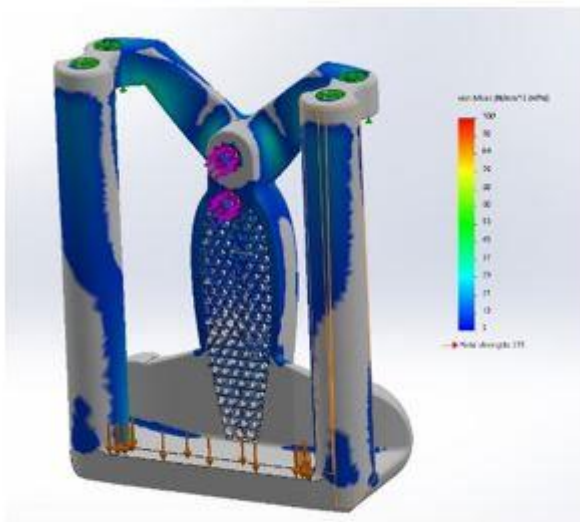




DFAM – Topologioptimerings fallstudie - robot hand

Steg 4:

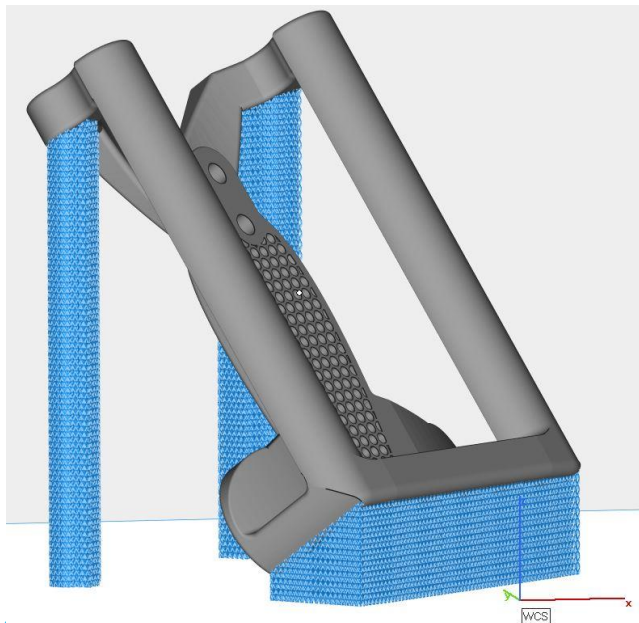
- Göra om kraftberäkning
 - Säkerställer styrka hos komponenten...
 - ...och finner att den ska hålla!
- Fortsätta med design av stödstrukturer
- Här är viktresultat från detta fall:



Model	weight [kg]	Measuring tool
Mass model	0.416	Solidworks
Topology optimized	0.077	Solidworks
3D printed part	0.072	Kern FFN scale



DFAM – Topologioptimerings fallstudie - robot hand

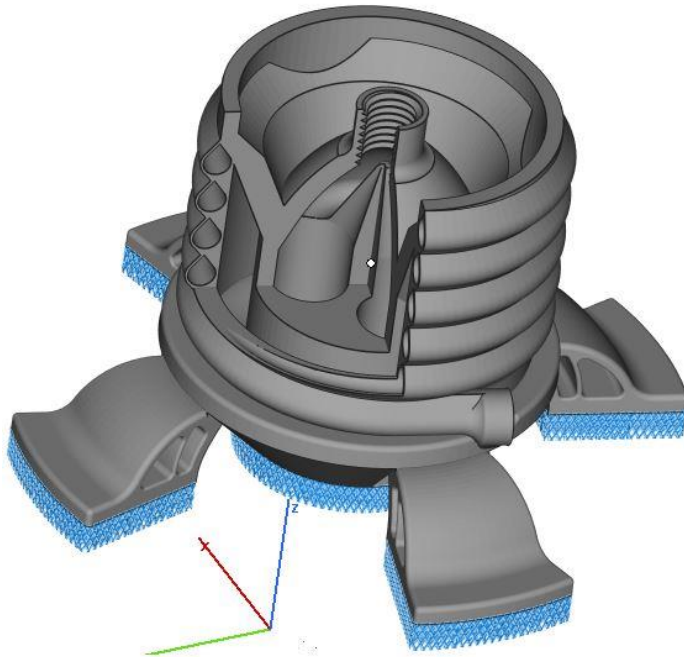


Steg 5:

- Skapa stödstrukturer och bestämma processparametrar:
 - Orientering har ombestämts för komponenten under designfasen
 - Val baserat på geometri
 - I detta fall var block-typ av stöd eftersom ytorna är stora och stödet kommer kan lätt
 - Val av lagertjocklek och laserparametrar
- I detta fall skrevs fyra detaljer ut:
 - Utskrivningstid 16 h 30 min
 - Pris/component 330 € + efterbearbetning 25 min
 - Fräsning och glaskuleblästring



DFAM – Montering av component i sin helhet - fallstudie



- Materialmixer med munstyckestruktur
 - Tre kanaler går ihop från botten och strömmar ut genom munstycket
- Omges av kylkanaler
- Valt material är AlSi10Mg för des värmeledningsegenskaper
- Åtta delar ihopslagna till en
- Designad så att tidigare lager ger stöd åt följande → inget behov av stödstruktur
 - Stöd vid botten för att kunna ta bort från plattformen
 - Kan även skrivas direkt på plattformen och tas bort med EDM
- Fyra delar skrevs ut
- Utskriftstid 29 h → Kostnad för en komponent blev 580 € + fräsning



Ytterligare åtgärder – olika byggplattformar

- **Det finns tre olika storlekar på plattformar för 3D-printern**
- High Temperature Heater (HTH) plattform
 - rund med diameter 90 mm och utskriftshöjd 100 mm
 - Maximal temperatur 550 °C
 - För temperaturer över 200 °C krävs en keramisk skrapa. Spridning av pulvret görs endast i en riktning.
 - Höga temperaturer används för titan och stål
- Minskad plattformsstorlek
 - Utskriftsvolym 50x50x80 mm³
 - Ingen värmning
 - Minskade plattformen används för aluminium, titan och stål
- Generell plattform
 - Utskriftsvolym 280x280x365 mm³
 - Maximal uppvärmningstemperatur 200 °C



Ytterligare åtgärder - Byte av material

Vid byte av material från stål till stål och stål till aluminium är det stor skillnad på den arbetsinsats som krävs

- Rengöring mellan reaktiva (aluminium och titan) kräver inte lika mycket arbete som när det byts från stål till reaktiva. Byte mellan stålsorter kräver inte extra rengöring emellan.
- Exempelvis vid byte från stål till aluminium kräver byte av filter samt rengöring av följande:
 - Rör från materialrester
 - Utskriftskammaren
 - Skrapan som sprider ut pulvret
 - Huvudkammaren
 - Pulverbehållarna
 - Sieven



Ytterligare åtgärder - Pulver- sievingstation PSM 100

Separat sievingstation PSM 100

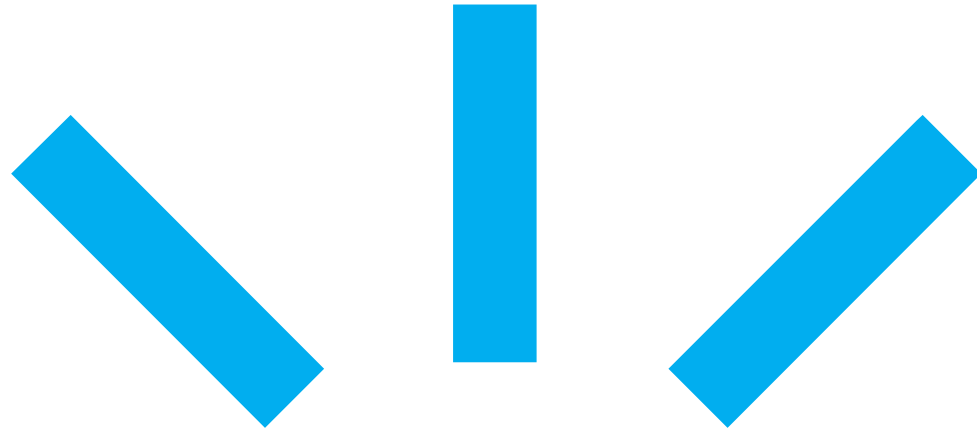
- Har två olika sievinghåldiametrar: 75 μm (stål) och 100 μm (aluminium och titan).
- Pulvret sievas för att separera dåliga pulverkorn från pulvret
- Sieving av allt kvarvarande pulver för att få bort ihopsvetsade korn från pulvret





Återkoppling

- SLM metoden i praktiken
- Design för SLM metoden
- Efterbearbetning och minimering av den
- Det finns många material tillgängliga –
men är de användbara?



Att använda AM



Vad kostar det?

Maskiner

Material

Filter

Gas

Operatörkostnader

Efterbearbetning

– **Maskiner**

- Plastskrivare 300...100 000€
- SLM printer 300 ... 2000 k€

– **Filament**

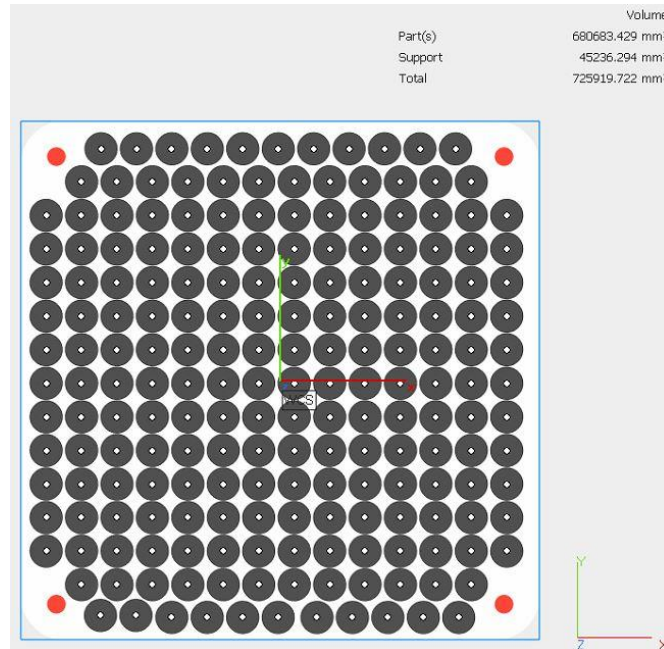
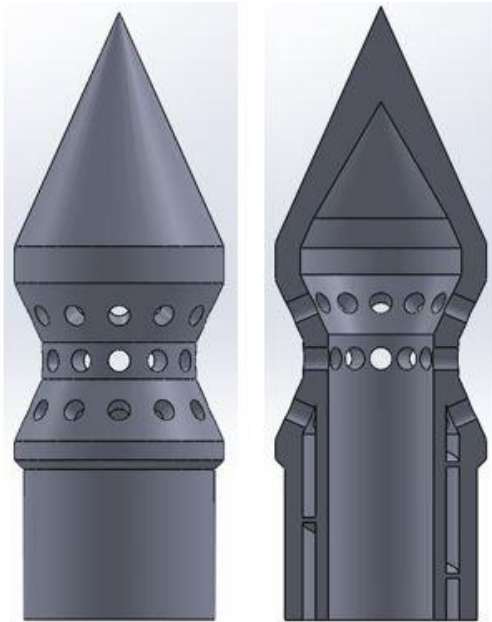
- PLA c. 20 €/Kg, Antimicrobial 50 €/kg
- ABS c. 25 €/kg
- Nylon c. 80 €/kg

– **Metallpulver**

- 316L c. 42 €/kg
- ALSi10Mg c. 75 €/kg
- Ti6Al-4V c. 310 €/kg
- 18Ni300 c. 80 €/kg



Vad kostar det?



- 200 stycken brandbekämpningsmunstycken (SLM280HL med en 700W laser)
- 725919 mm³ sammanlagd volym (komponenter + stödstrukturer)
 - Stödstrukturer 45236 mm³ (ca 6 % av den totala volymen)
- Utskriftstid 133 h
- Utskriftskostnader
 - Kostnad för körning med maskin 133 h * 100 €/h = 13300 €
 - Materialkostnader 573.5 €
 - Efterbearbetningskostnader
- Kostnader från den utskrivna komponenten 13873.5 € / 200 = 69.4 €/komponent
- Efterbearbetningskostnad bedömdes vara ca 30 €/komponent (värmebehandling, separera från byggplattformen, borttagande av stödstrukturer och gängning och montering av O-ring (tätning))
- Sammanlagd kostnad per component 99.4 €
- Hur kan kostnaden sänkas ytterligare?
 - Nyttja volymen i kammaren så gott det går!!



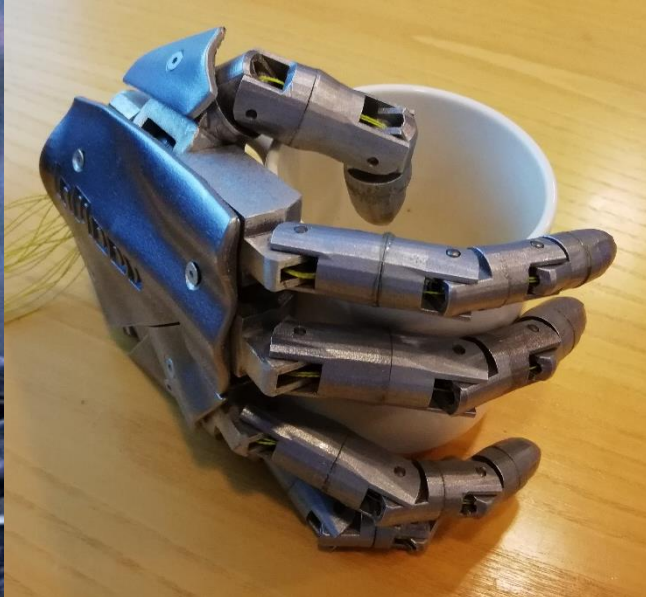
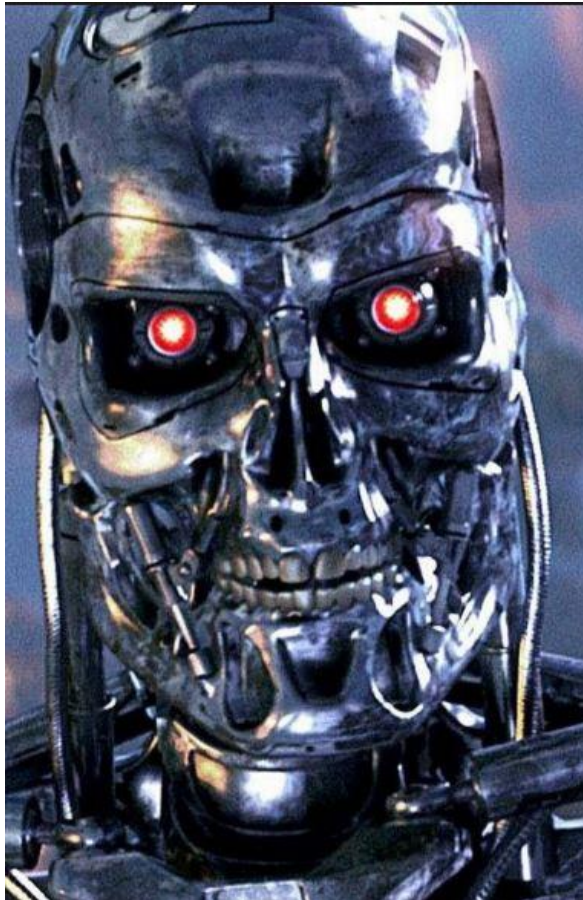
Eran för metall 3D-skrivare?

- SLM solutions
- EOS
- Concept Laser
- 3D systems
- Renishaw
- Trumpf
- Mazak (hybrid; metal 3D-printing/CNC)
- DMG Mori
- Arcam
- HP (metal 3D printer on the way)
- Desktop Metal
- Markforged

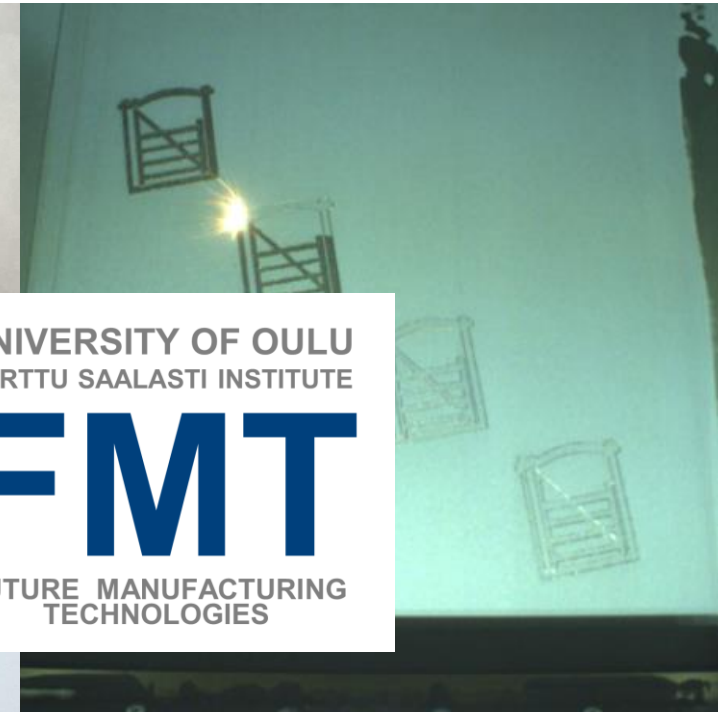
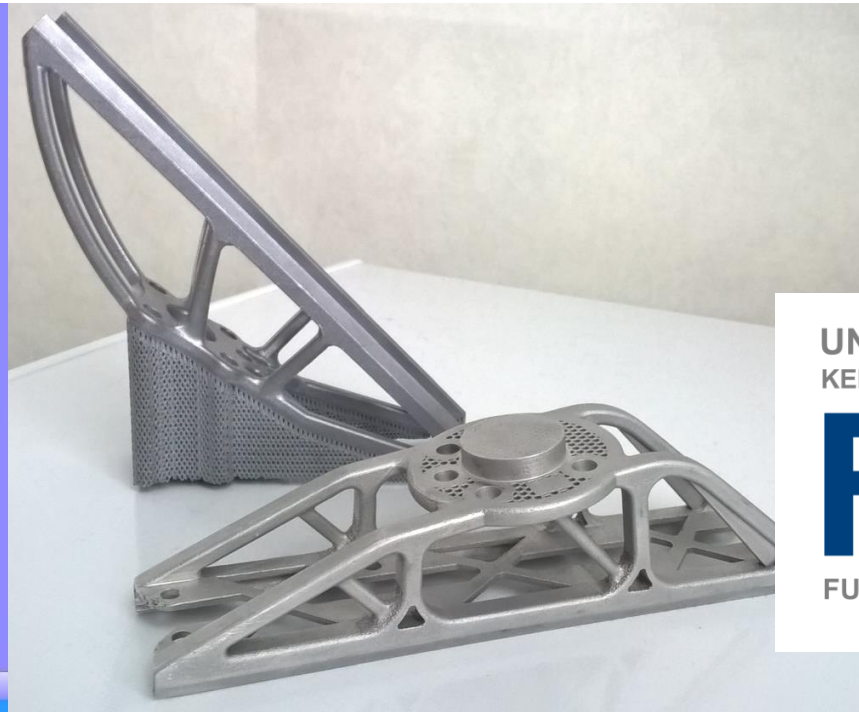
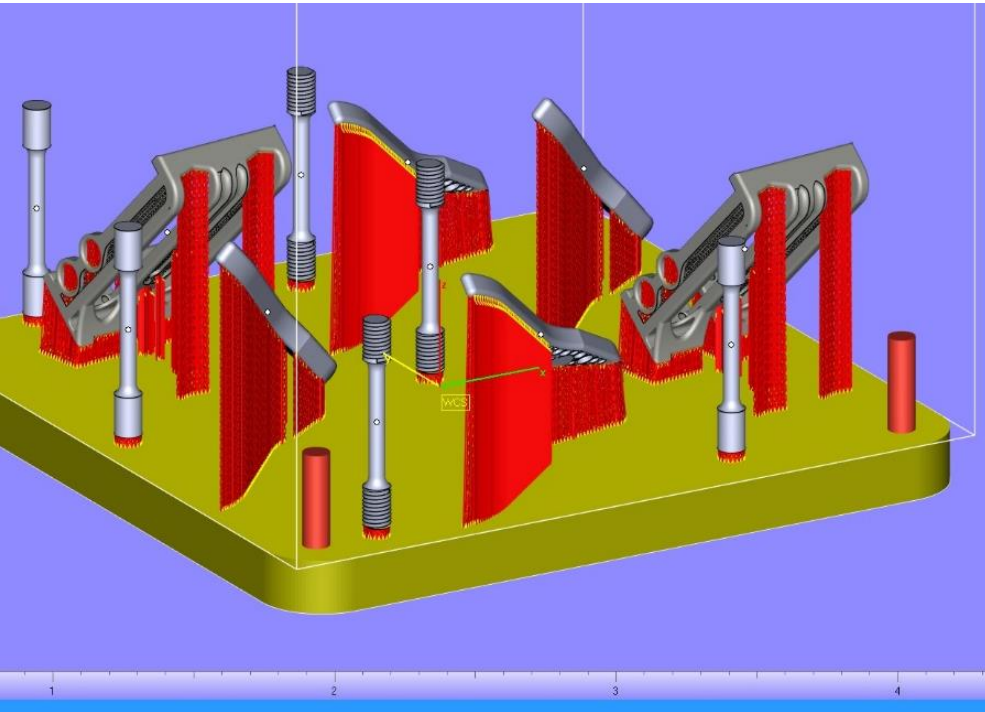
- Idag
 - Antalet lasrar i skrivarna ökar
 - Utskriftskammarnstorleken har ökat
 - Ökad produktivitet av maskinerna
 - Automation för maskinerna ökar
 - Automatisk återvinning av pulver
 - Automatisk rengöring och byte av kammare
 - Möjlighet till CNC-bearbetning under utskrift
- Optimerande av utskriftsparametrar ökar och förbättras
 - Förbättrad utskriftskvalitet
- Övervakningssystem för utskriftsprocessen
- Snabbare maskiner på marknaden
 - Möjlighet att skapa komponenter snabbare (om mekaniska egenskaperna inte är huvudkriterie)



Framtiden för metall 3D- printing?

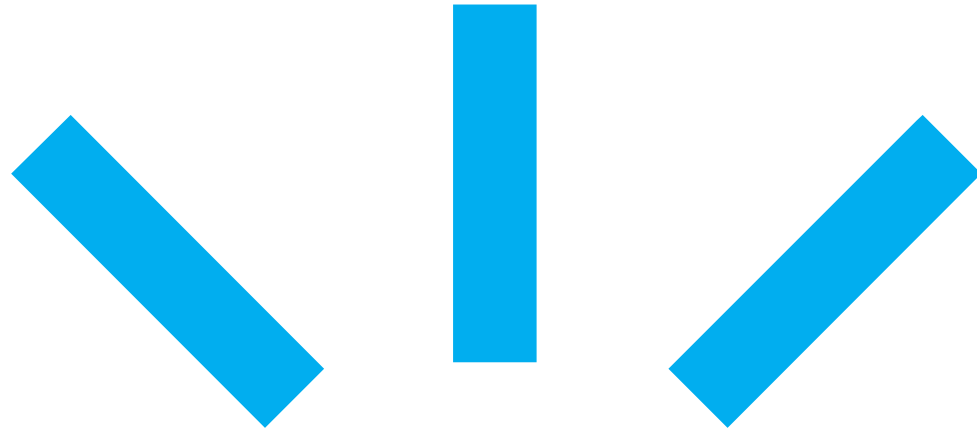


- Framtiden
 - Ökad automation av maskinerna
 - Eliminering av stödstrukturer
 - Ökad storlek på utskriften
 - Multi-material för metaller också?
 - Ökad kvalitetssäkring
 - Maskinen kan oberoende förbättra kvalitét under utskrift
 - SLM, DLD, Jetting processer



UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE
FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





Sammanfattning och diskussion



- 3D-printing tekniker
- DFAM – Design
- SLM printing i praktiken
- Industriell användning och framtiden
- Diskussion och kommentarer



Tack för din uppmärksamhet!



Contact Information:
Research Director Kari Mäntyjärvi
040 084 3050
kari.mantjarvi@oulu.fi



FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES



**UNIVERSITY
OF OULU**

**KERTTU SAALASTI
INSTITUTE**

***Science
With
Arctic
Attitude!***

FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES

**Contact Information:
Research Director
Kari Mäntyjärvi
040 084 3050
kari.mantjarvi@oulu.fi**