



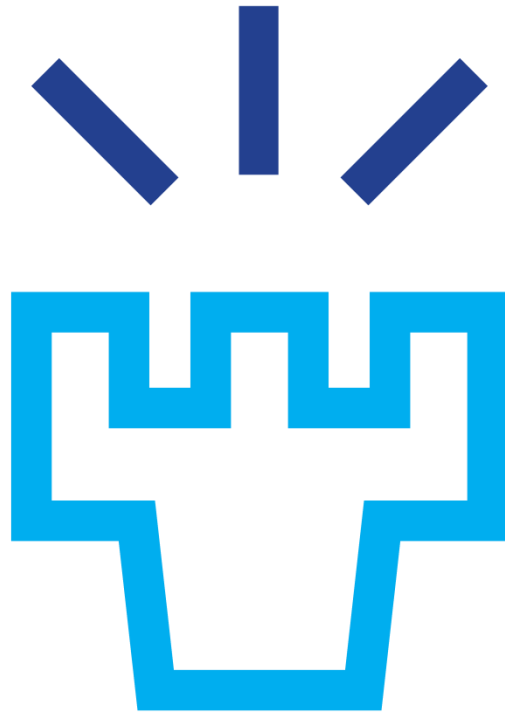
**UNIVERSITY
OF OULU**

**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



In cooperation with



TROMS County Council
TROMS fylkeskommune

**Interreg
Pohjoinen**

Euroopan aluekehitysrahasto



EUROOPAN UNIONI



LAPIN LIITTO



Science
with
Arctic
Attitude



UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





Innhold



- Innledende ord
- Additiv produksjon og AM metoder
- **Design med AM i tankene**
 - Designprosess generelt
 - Design med SLM-metoden
- **Bruk av AM industrien**
 - Utsikter
 - Kommersielle tjenesteleverandører
- **Konklusjon**

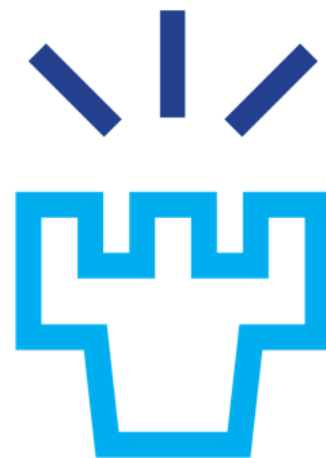


FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES



Kari Mäntyjärvi
Research Director



UNIVERSITY
OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

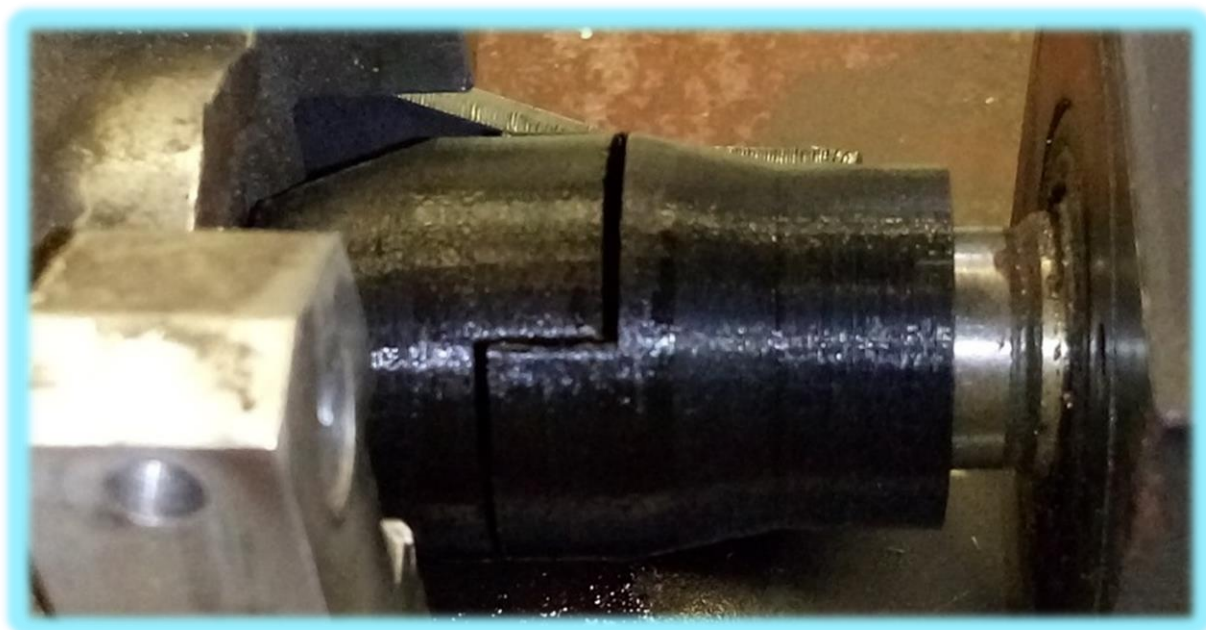


Tero Jokelainen
Project Researcher
AM Expert





Future Manufacturing Technologies (FMT) gruppen



Ressurser

- 18 ansatte, jobber i Nivala (ELME Studio), Oulu (Linnanmaa campus) og Raahe (Aiku)
- Allsidig tilgjengelighet på utstyr - fra laserbearbeiding til materialbearbeiding og forskning

Forskning

- Over 60 internasjonale akademiske publikasjoner mellom 2007-2017
- Offentlige finansierte internasjonale og nasjonale prosjekter og forskningsutvalg
- Drivet av behovet til de lokale selskapene, brukbarhet av resultatene over en periode på 0-5 år.

Forretningstjenester

- Nær 50 forskningsoppdrag fra selskaper årlig
- Forskningsaker, prototyper og råd

Avhandlinger

- 19 MSE og 35 ingeniører

Internasjonalt samarbeid

- Sverige, Egypt, Norge, Island, Irland, Skottland, Tyskland, Frankrike, Polen, Iran og India
- Samarbeid med internasjonale utstys- og teknologiutviklere

CASR
Centre for Advanced
Steels Research



FMT-forskning - Fokusområder



Lette og stive strukturer + anvendelse av laserteknologi

- Materialer, design og produksjon
- Honningstruktursteknologi, støping, sveiseforskning
- Bruk av ultra sterke materialer
- Bruk av simulering

Spesiell stål - fra stål til produkt

- Småskala Stål
- Støping og spesielle prosesser
- Effekter av tretthet
- Metallografi

Additiv produksjon og bruk av den til andre produksjonsmetoder

- Materialer, design og produksjon

Kostnadseffektiv produksjon

- Skreddersydd automatisering
- Produksjonsovervåking
- Digitalisering og industrielt internett



C3TS

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





C3TS

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

C3TS er finansiert av Interreg Nord-programmet og ledet av Luleå teknologiske universitet, der FMT opererer som tilknyttet partner. Det overordnede målet med prosjektet er å forbedre SMEs internasjonale konkurransevne ved å gjøre 3D-utskrift av metall kjent som en konkurransedyktig produksjonsmetode. Metall 3D-trykkteknologi gjør det mulig å ha mer innovative design, kutte ned produksjonskostnadene og gjøre en mindre innvirkning på miljøet med mindre brukt materiale og produksjonstrinn enn i tradisjonelle produksjonsteknikker.



Interreg
Pohjoinen
Euroopan aluekehitysrachasto



EUROOPAN UNIONI



LAPIN LIITTO



TROMS County Council
TROMS fylkeskommune



Science
with
Arctic
Attitude

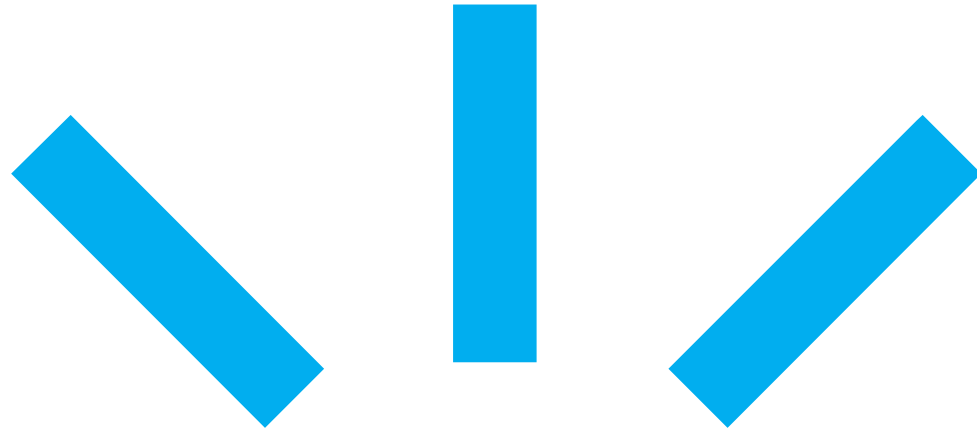


UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





Additiv produksjon (Additive Manufacturing – AM) og dets måter



additiv produksjon

3D Printing

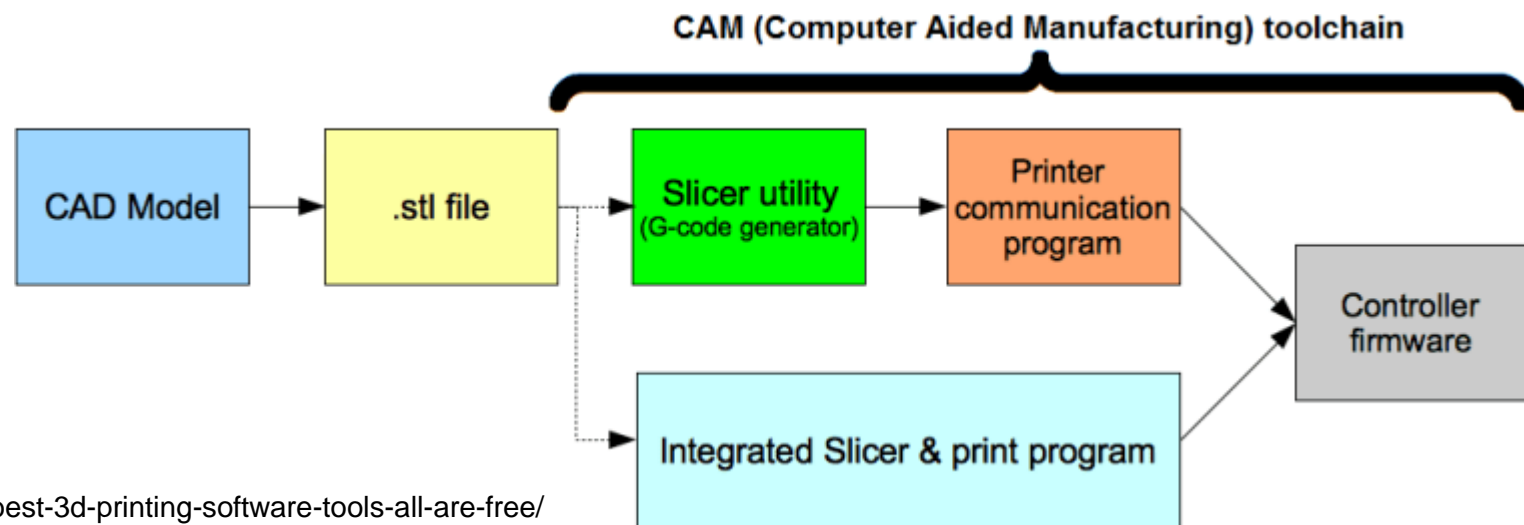


- **Additiv Produksjong**
- Produksjonsmetode for å legge til materiale
- 3D printing (3D-skriving)
- En gruppe produksjonsteknikker basert på å legge til materiale (i motsetning til fjernings- eller festeprosesser)
 - Stort sett hver teknikk der en komponent er produsert ved å legge til materiale
- Metoder (engelske termer):
 - Powder Bed Fusion
 - Material Extrusion
 - Vat Photopolymerization
 - Material Jetting
 - Binder Jetting
 - Directed Energy Deposition
 - Sheet Lamination



Fra 3D-modell til utskrivnen produkt

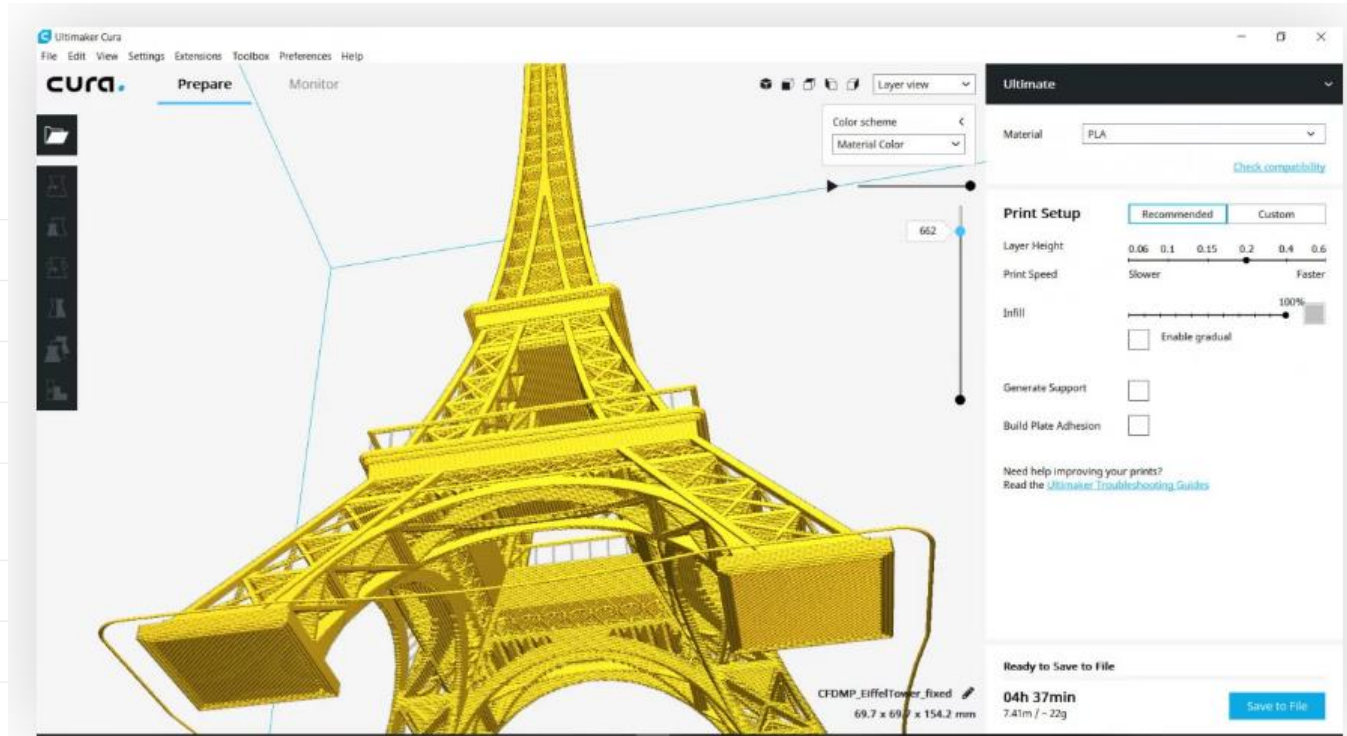
- **Ta hensyn til metode når produktet er designes**
 - Behov for støttestrukturer, orientering for konstruksjon, minimering av etterbehandling, anisotropi av materialet
- **Forberede det designet produktet for utskrift med forbehandlingsprogramvare**
 - Plassering av komponent på utskriftsplattform
 - Plassering av støttestrukturer
 - Velg og plasser utskriftsparametere
- **Definere programmet (automatisk)**
 - Del strukturen i lag
 - Form produksjonsbaner for lagene
- **Overføre til skriveren**
- **skrive ut**





Programmer 3D-skrivere Gratis utskriftsprogramvare

| | | | | |
|-------------------------------------|---|--------------|---|--------------------------------|
| 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)

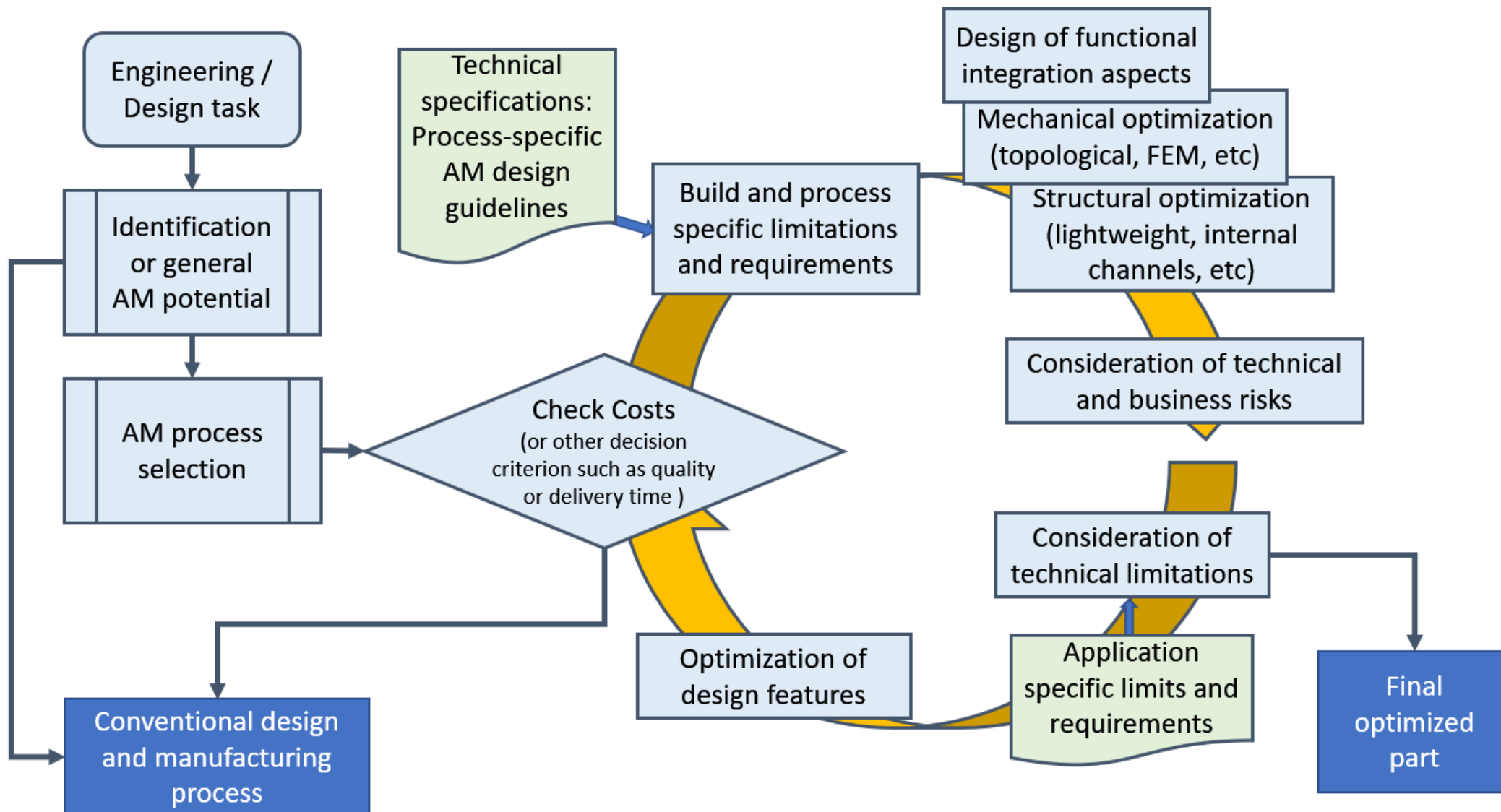
FEATURES

| | | | |
|----------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 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/>



Identifisering av AM-metodens potensial, valg og designprosess i henhold til ISO / ASTM 52910: 20





Ulike AM- prosesser

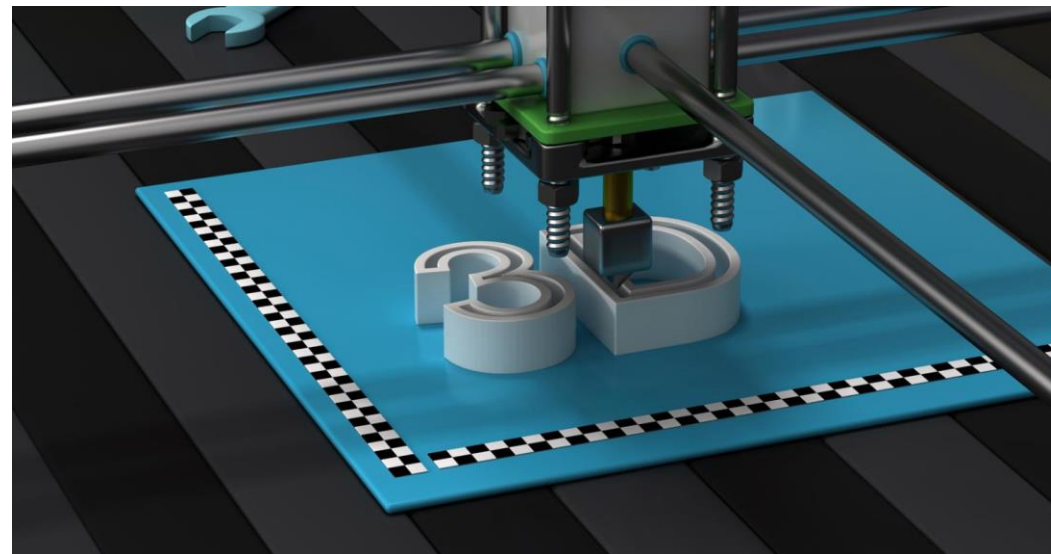


Picture: FMT



- Enfase \leftrightarrow Flerfase
- Materialer (metall, polymer, keramikk)
- Sammenføyningsmetoder for materialet (fuging vs monterings)
- Det første trinnet av stoffet

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



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



ISO/ASTM 52900:2015(E)

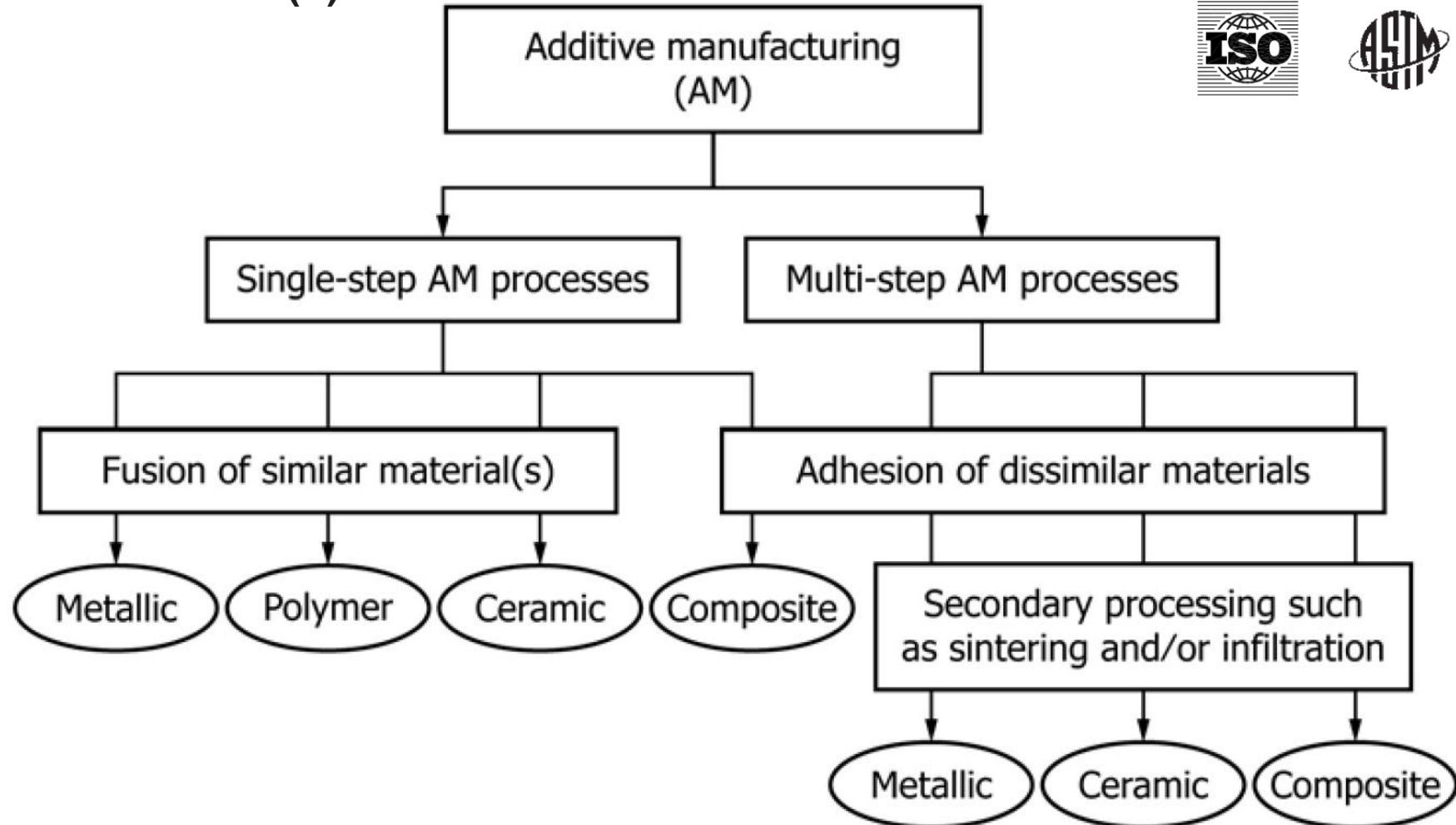
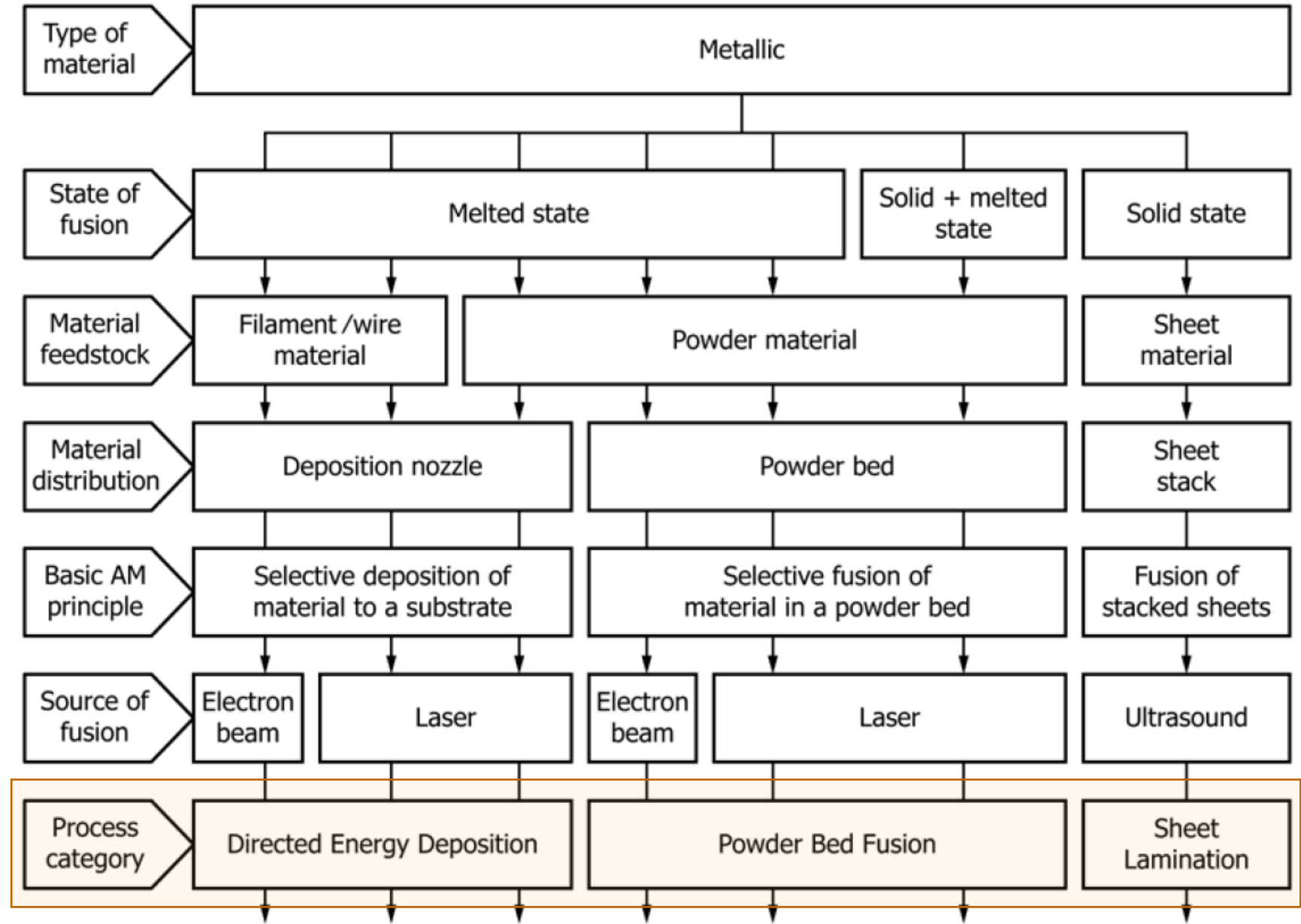


FIG. A1.1 Single-step and Multi-step AM process principles



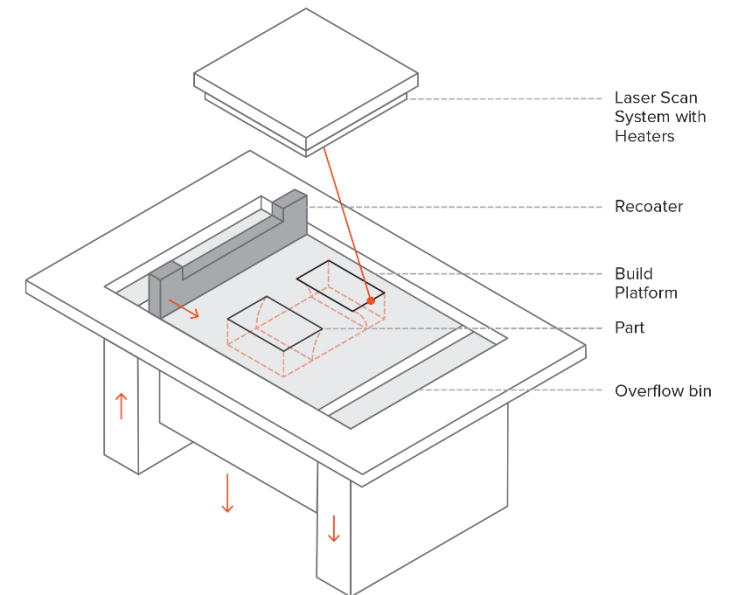
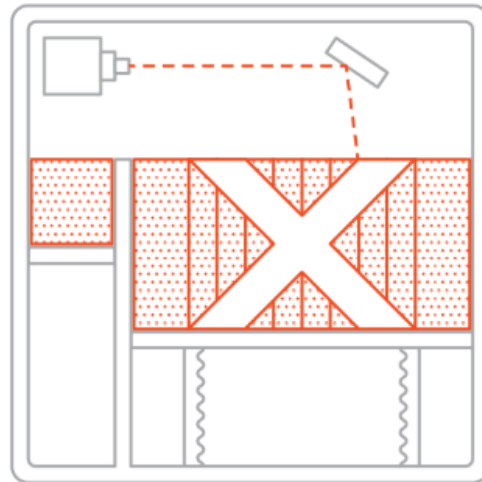
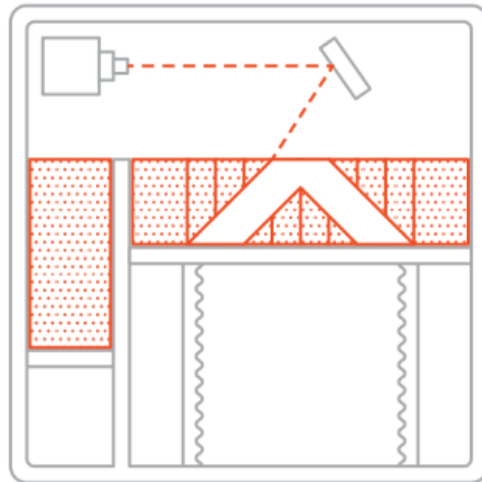
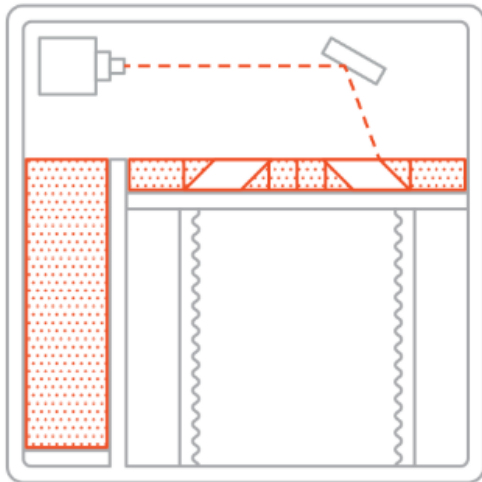
- Powder Bed Fusion
 - Laser Powder Bed Fusion
 - Selective Laser Melting
 - Selective Laser Sintering
 - (Selective) Electron-Beam Melting
- Direct Energy Deposition
 - Direct Laser Deposition
 - Electron-Beam Deposition



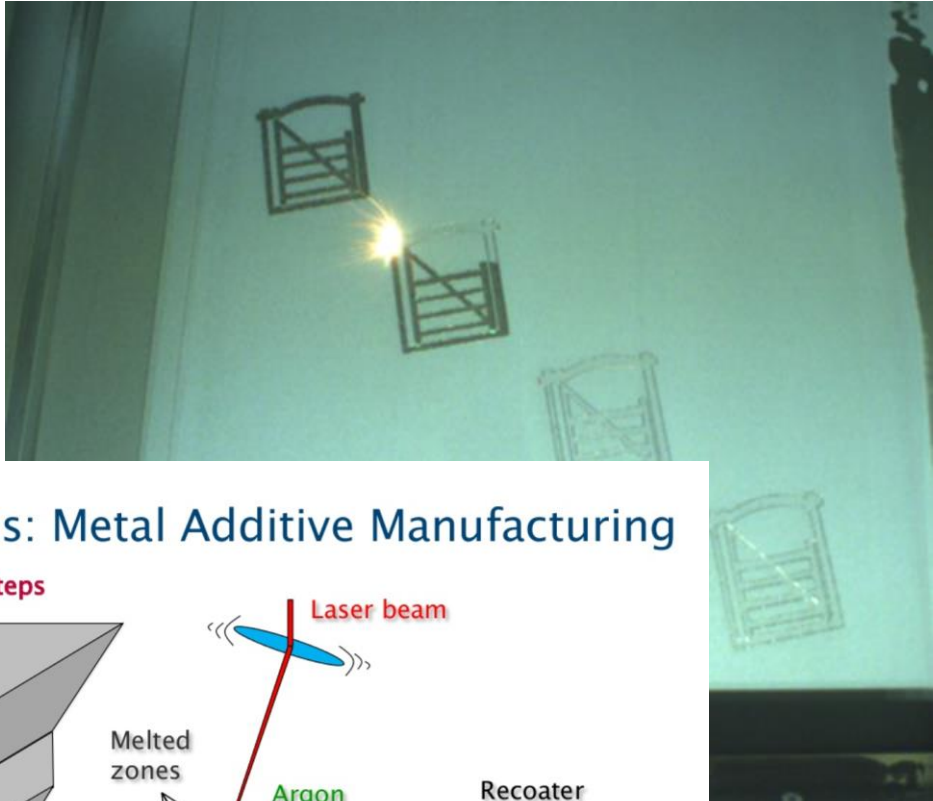


Selective Laser Melting

- Vanligste metal 3D-utskrift metode
- Direct Metal Laser Sintering – Nesten det samme, bortsett fra at metallet ikke er smeltet uten et bindemiddel - krever mindre lasereffekt
- Metallpulveret smeltes lag for lag med en laserstråle
- Strukturen er bygget på plattformen
- Støttestrukturer nødvendig (samme materiale som produkt)
- De vanligste materialene er 316L (syre- og rustbestandig) og AISI10Mg (aluminium)
 - Titanlegeringer, verktøystål, superlegeringer, etc.
 - Vanlig karbonstål fungerer ikke

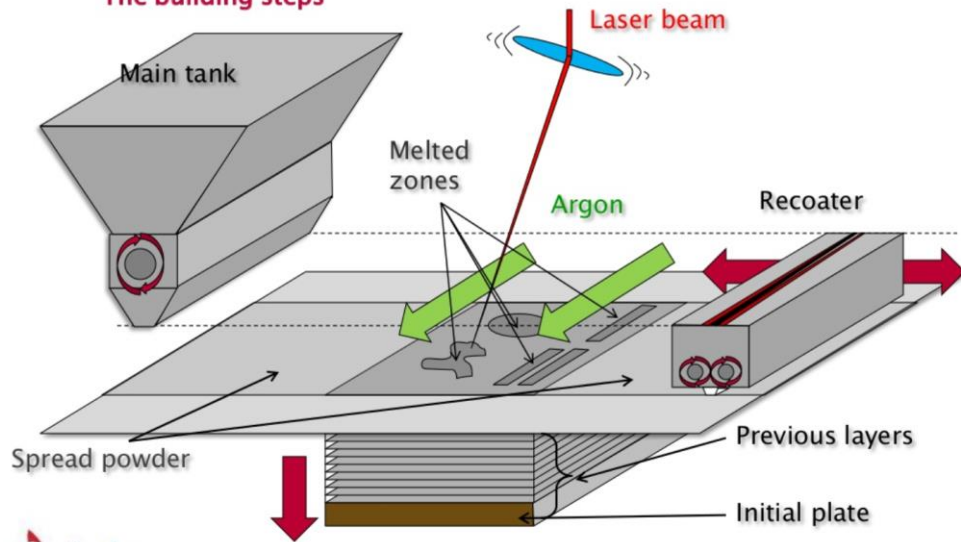


Source: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>



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

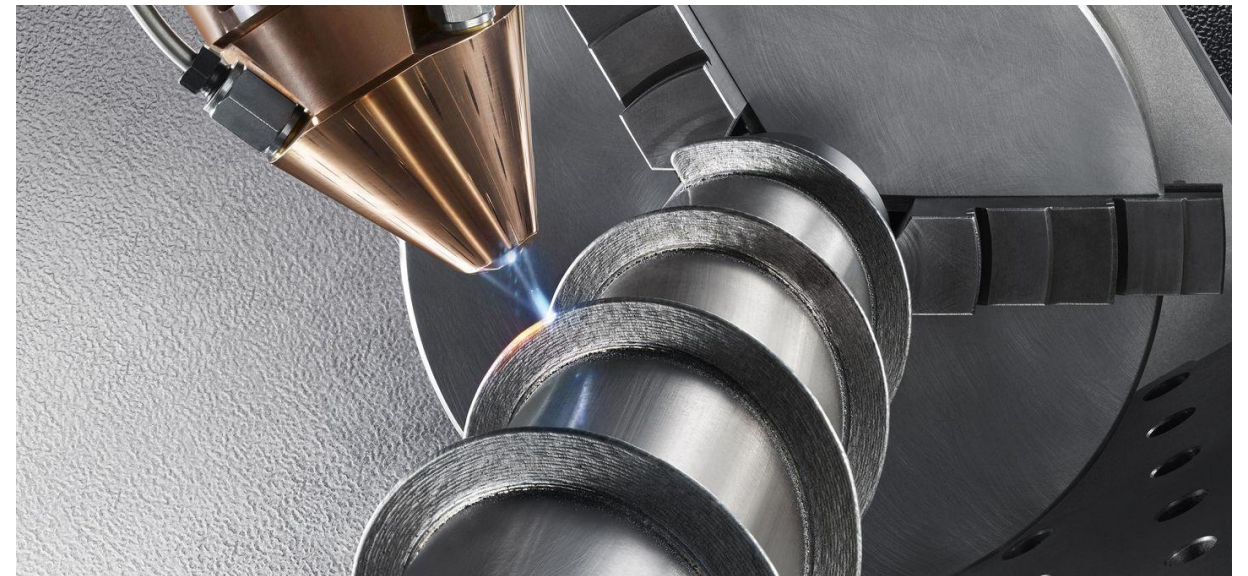
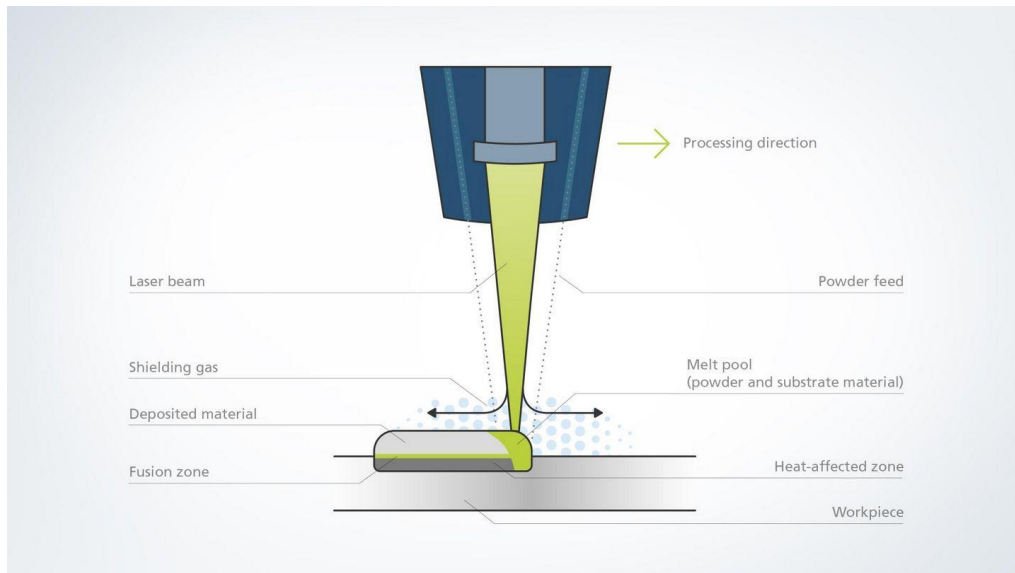
Typical Application Areas

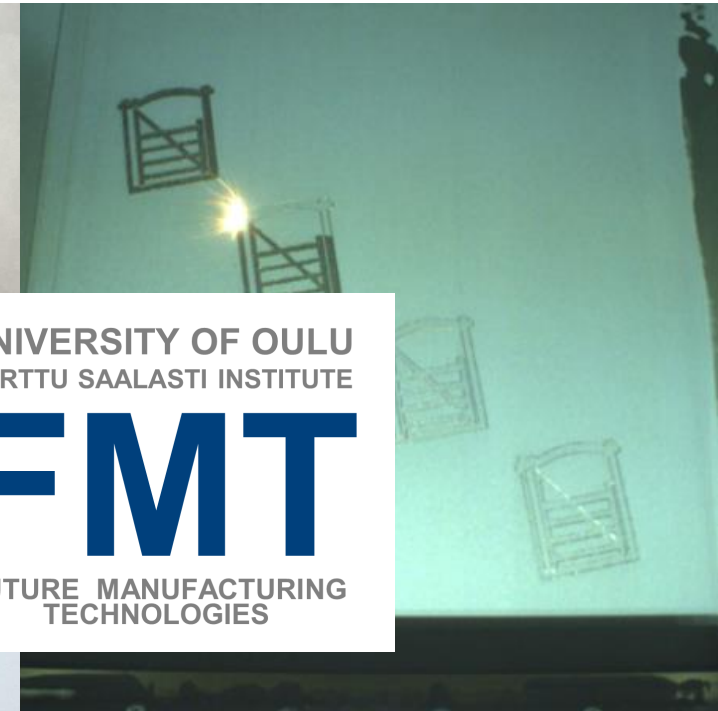
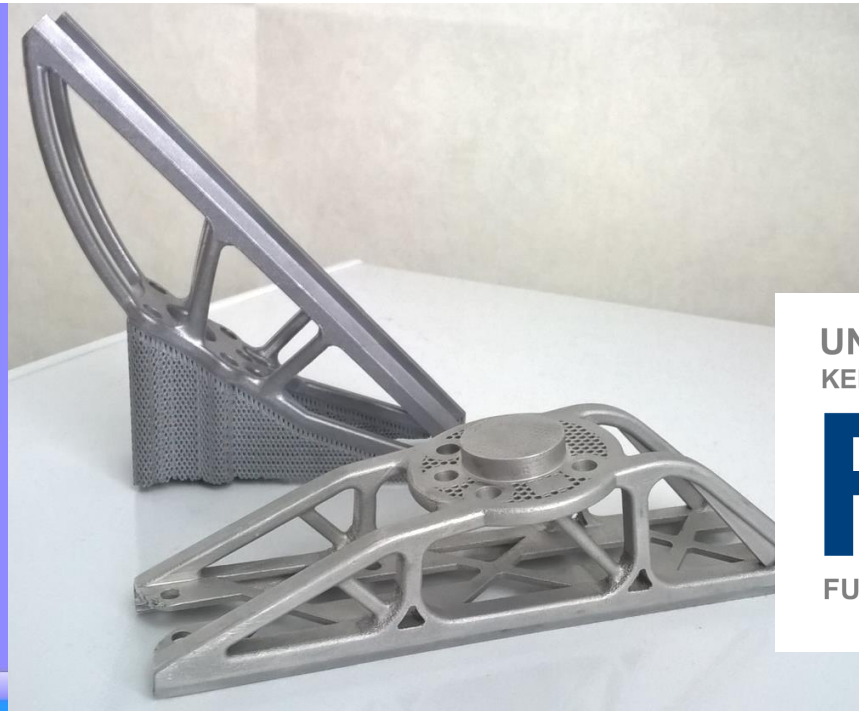
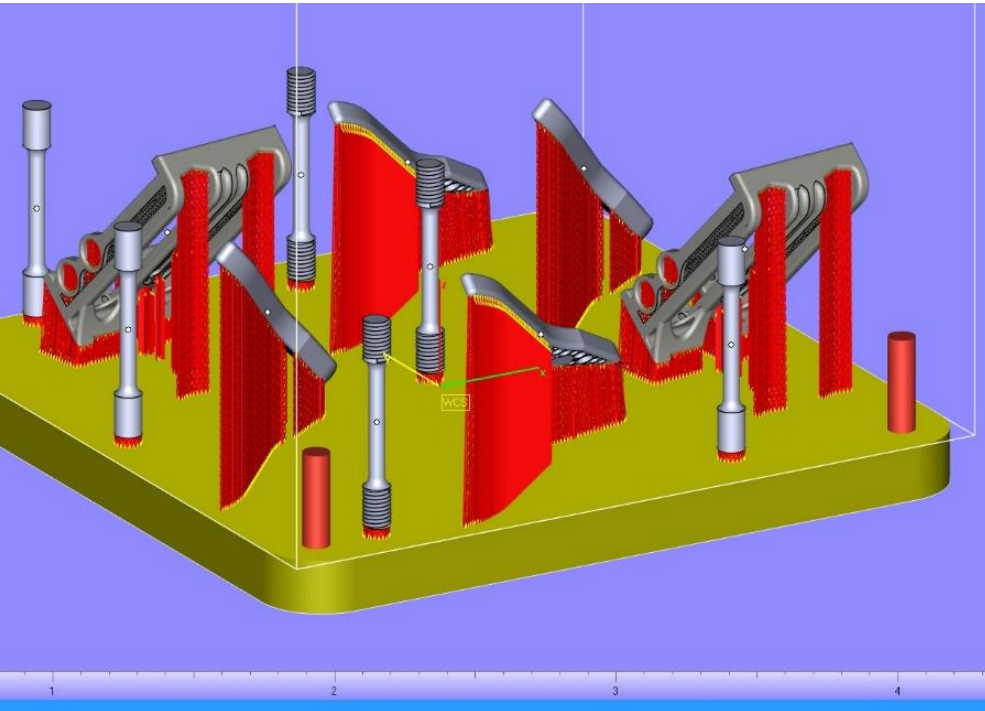
- Aerospace /Automotive
- Surgical Instruments
- Food Industry
- Maritime



Direct Laser Deposition ***(også Direct Energy Deposition eller Direct Metal deposition)***

- Pulver eller ledning sveises på en falte
- Selv om maskinene fungerer ved lagdeling av materialet, er de ofte fleraksede
- Legge til detaljer i eksisterende strukturer
- Ikke (ennå) så høyt detaljnivå som SLM, men raskere
- Teknikken er basert på overflatesveising





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

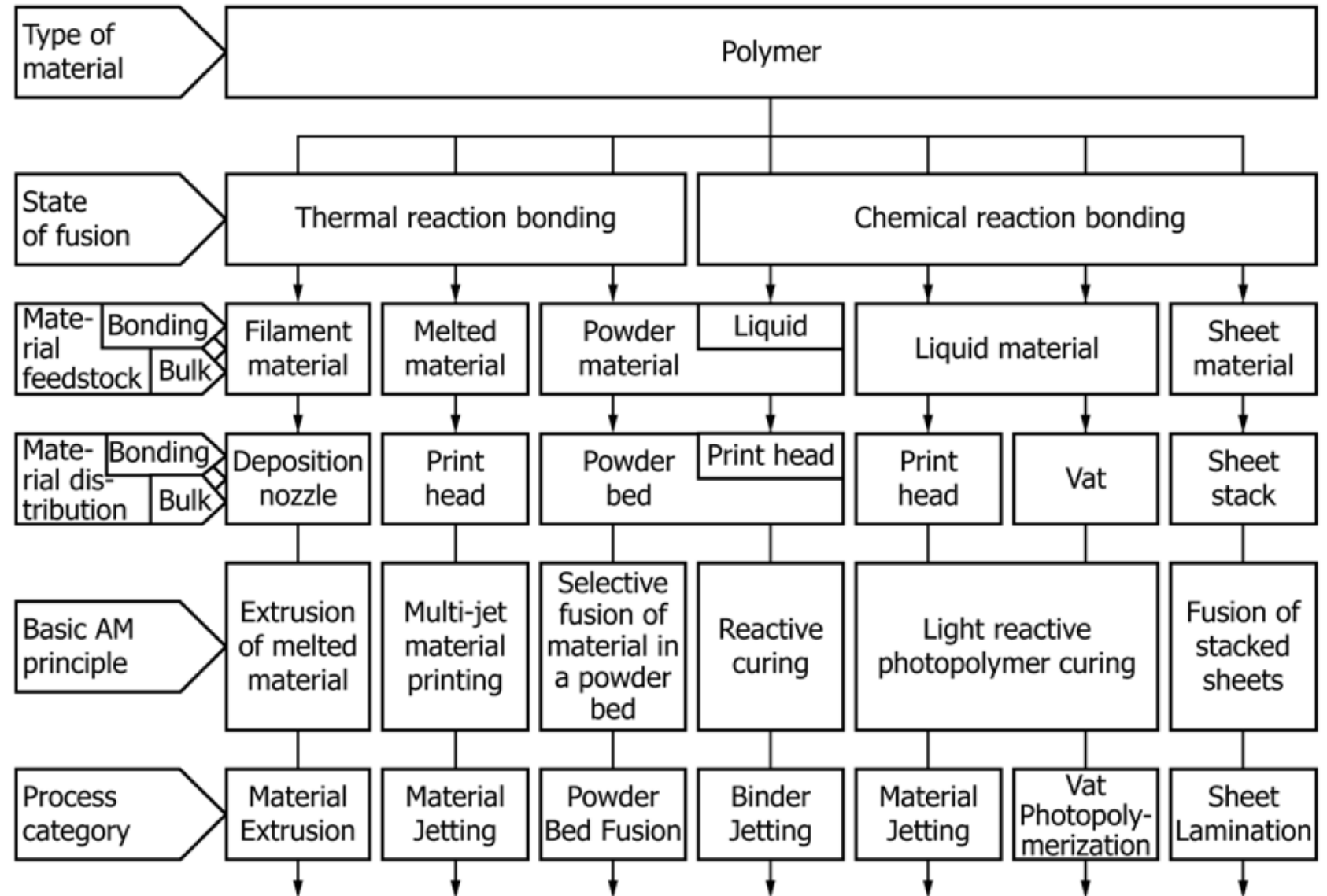


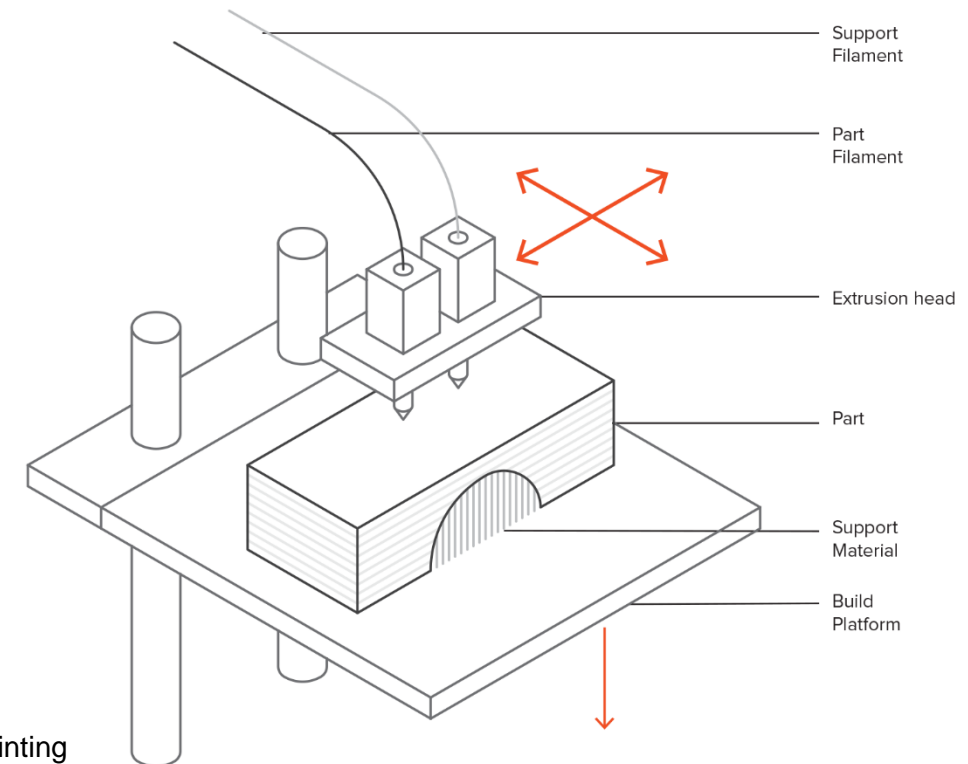
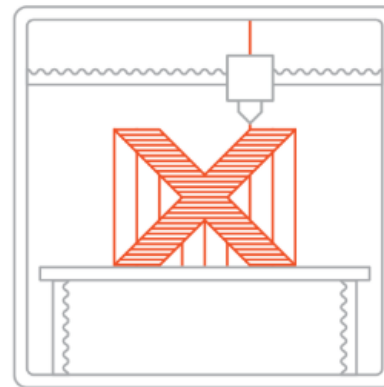
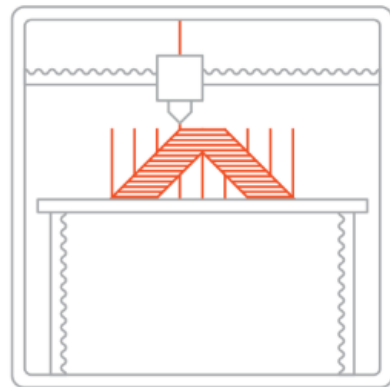
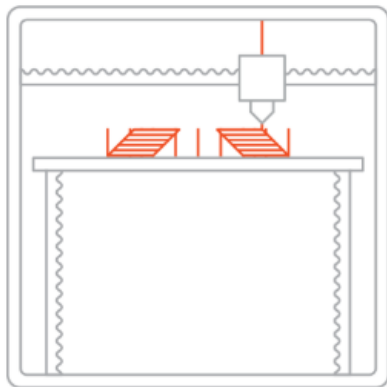
FIG. A1.3 Overview of single-step AM processing principles for polymer materials



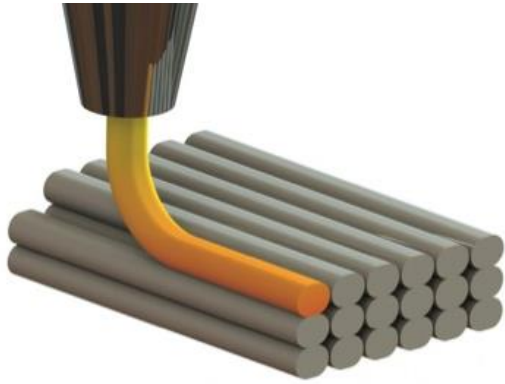


Fused Deposition Modelling

- En annen betegnelse for "Fused Filament Fabrication"
- Vanligste 3D-utskriftsmetode (kjent som en stasjonær skriver)
- En polymetråd trykkes gjennom en oppvarmet dyse som smeltes og plasseres lokalt for å skape den ønskede formen
- Mangfold av maskiner fra billig hjem enheter til industrielle skrivere
- Multimateriell utskrivning
- Det kreves ofte støttemateriell
- Ulike materialer for forskjellige behov
"Fra sjokolade til PEEK...."
- Lagerbasert struktur, ikke veldig nøyaktig



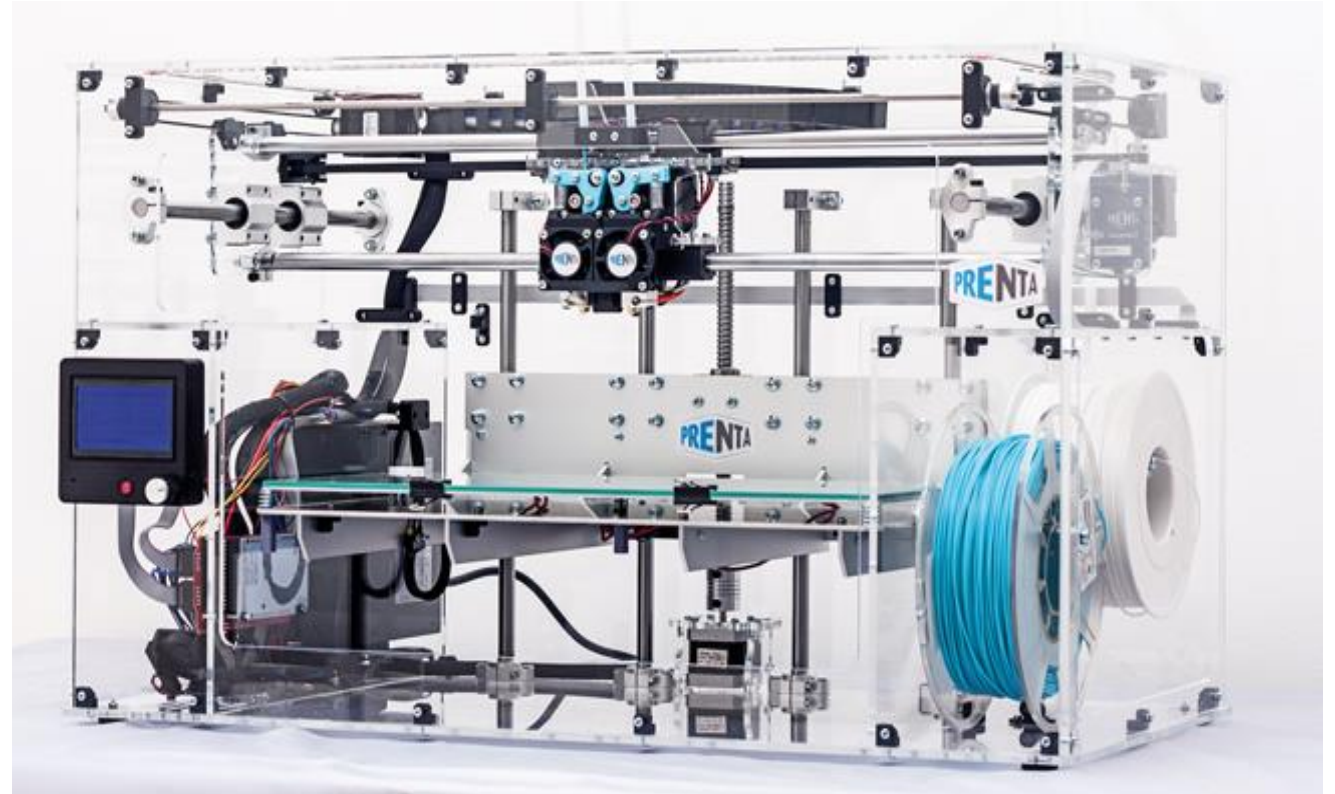
Source: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>



<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>



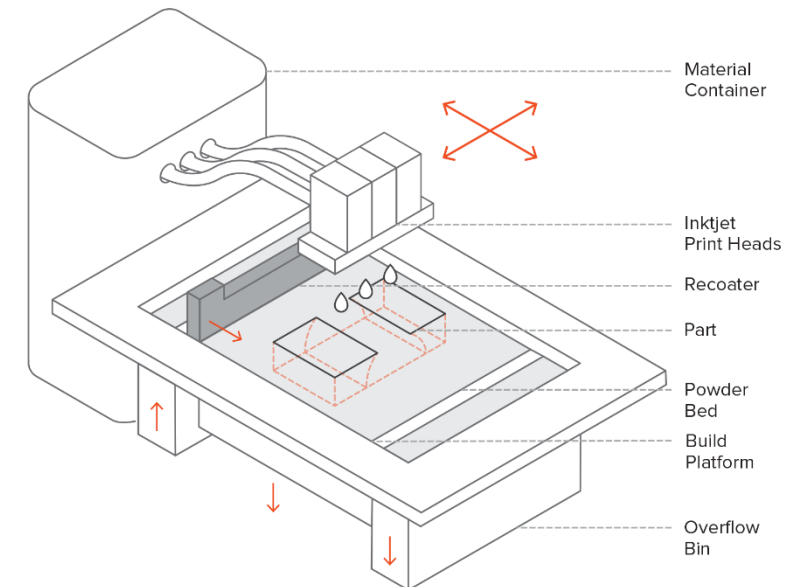
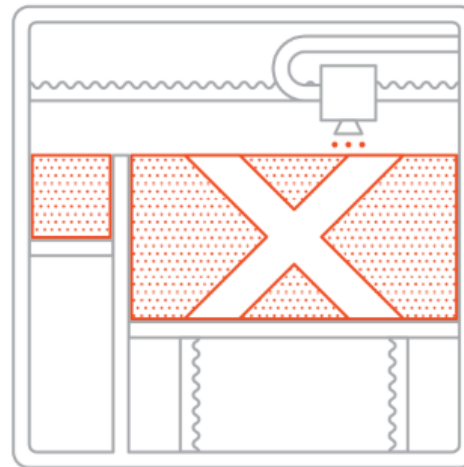
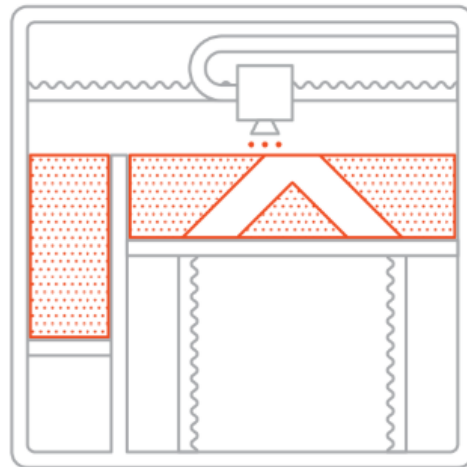
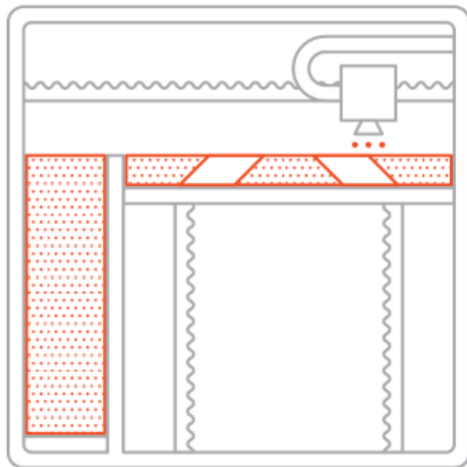
Binder jetting

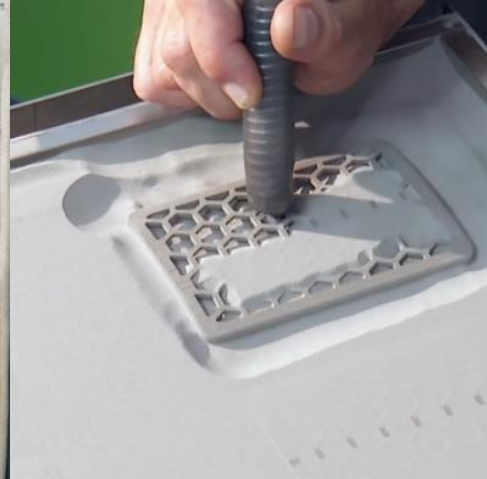
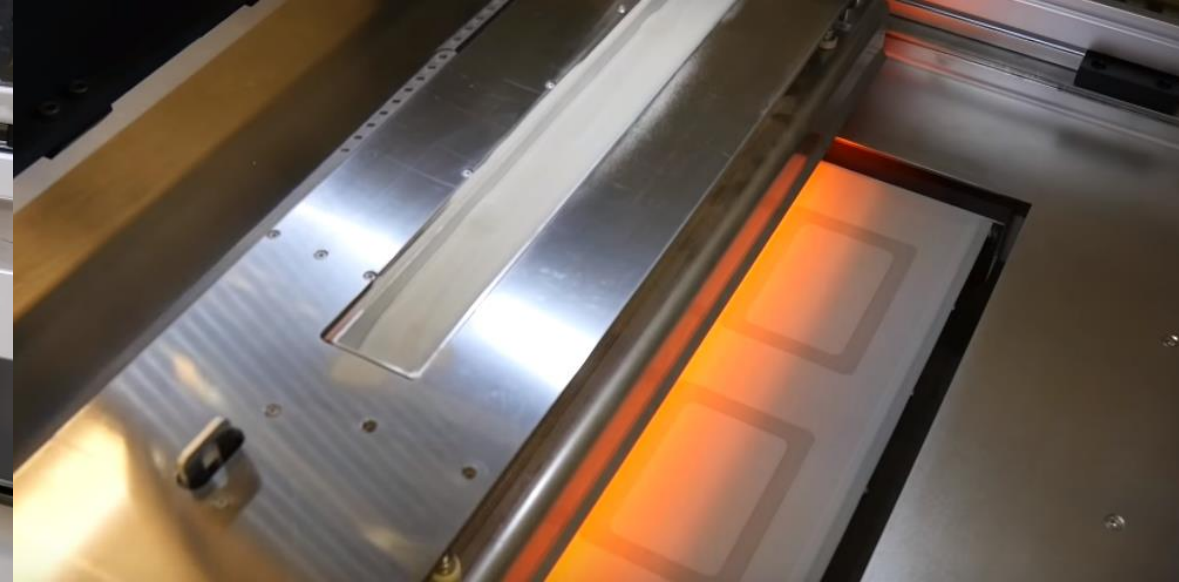
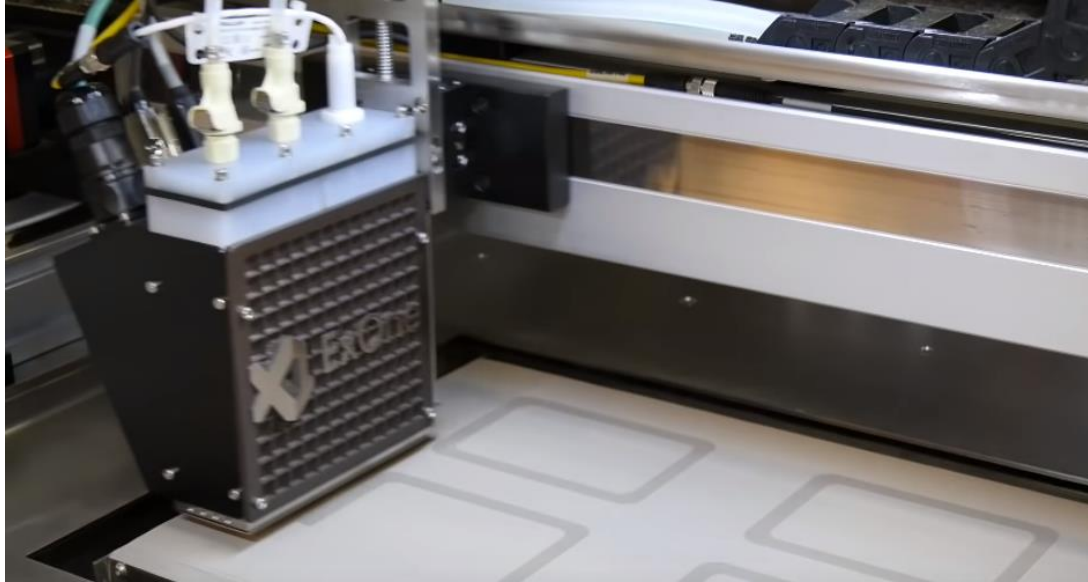
- 3D inkjet printer
- Pulverbed og injeksjon av bindemiddel
- Pulverstøtter - ikke behov for støttestrukturer
- Flerfarget utskrivning med plast
- Støpeform-utskrivning– store skrivere!
- Metall-Utskriving
 - Sintering i ovnen

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>







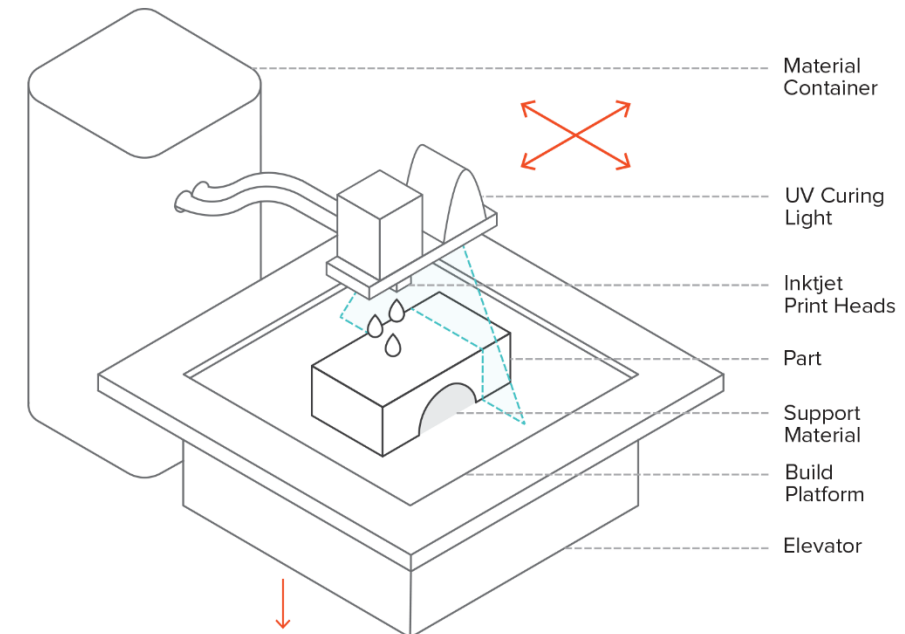
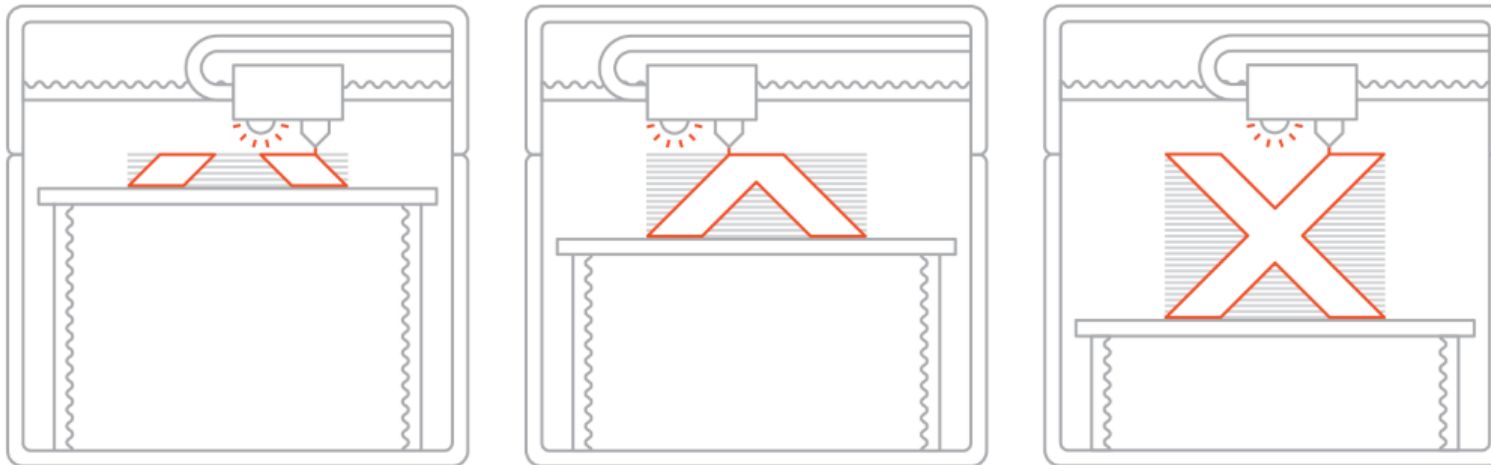
Material jetting

- Utskrift av UV-herdede materialer
 - Voks og fotopolymerer
- Injeksjon av materialedråper
- Stort utvalg av materialer (ikke-metall)
- Multimaterielle strukturer er mulig
- Relativt god overflatebehandling
- "Light sensitivity" og mekaniske 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>



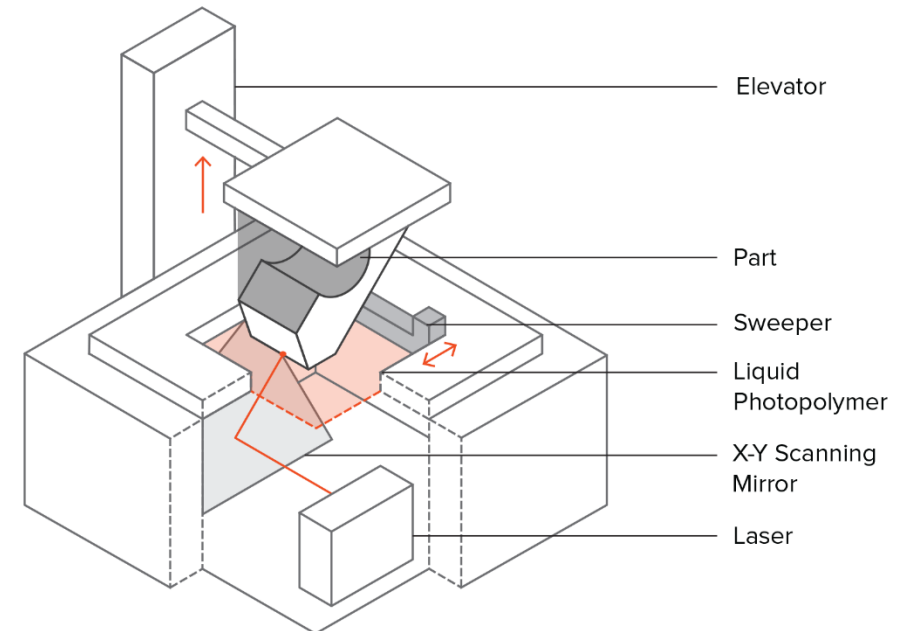
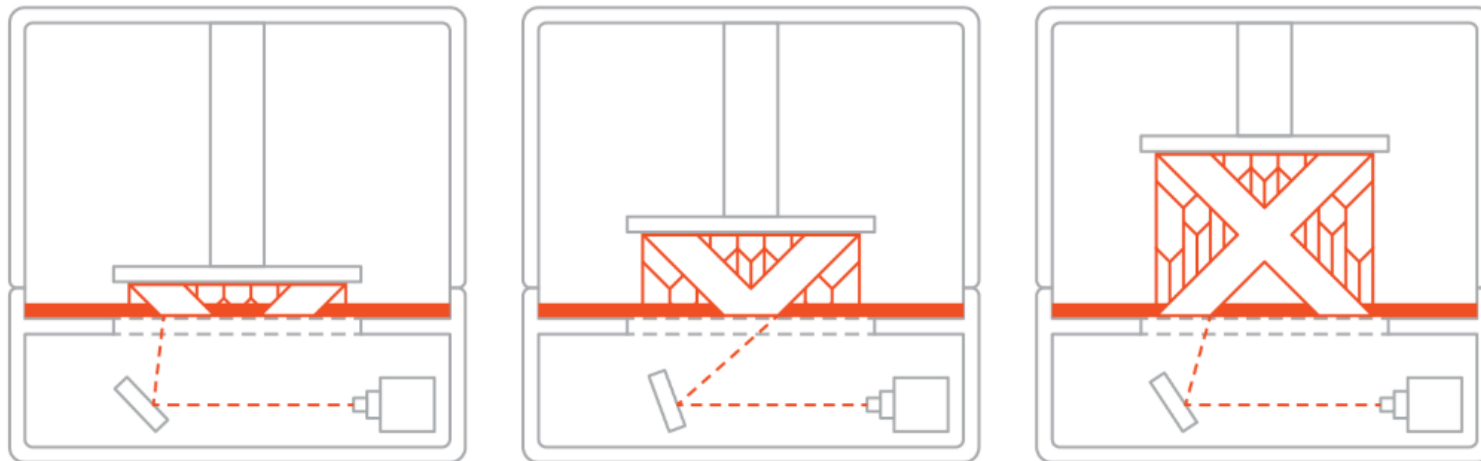
Source: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>

University of Oulu – Kerttu Saalasti Institute – Future Manufacturing Technologies
Oulun yliopisto – Kerttu Saalasti instituutti – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT)



Stereolithography

- Eldste av 3D-printingmetodene
- UV-herdet polymervæskeprinting
- God overflatebehandling
- "Light sensitivity" og mekaniske egenskaper
- Støttestrukturer er laget av samme materiale som komponenten





UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE
FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





- Powder bed
- The green compact

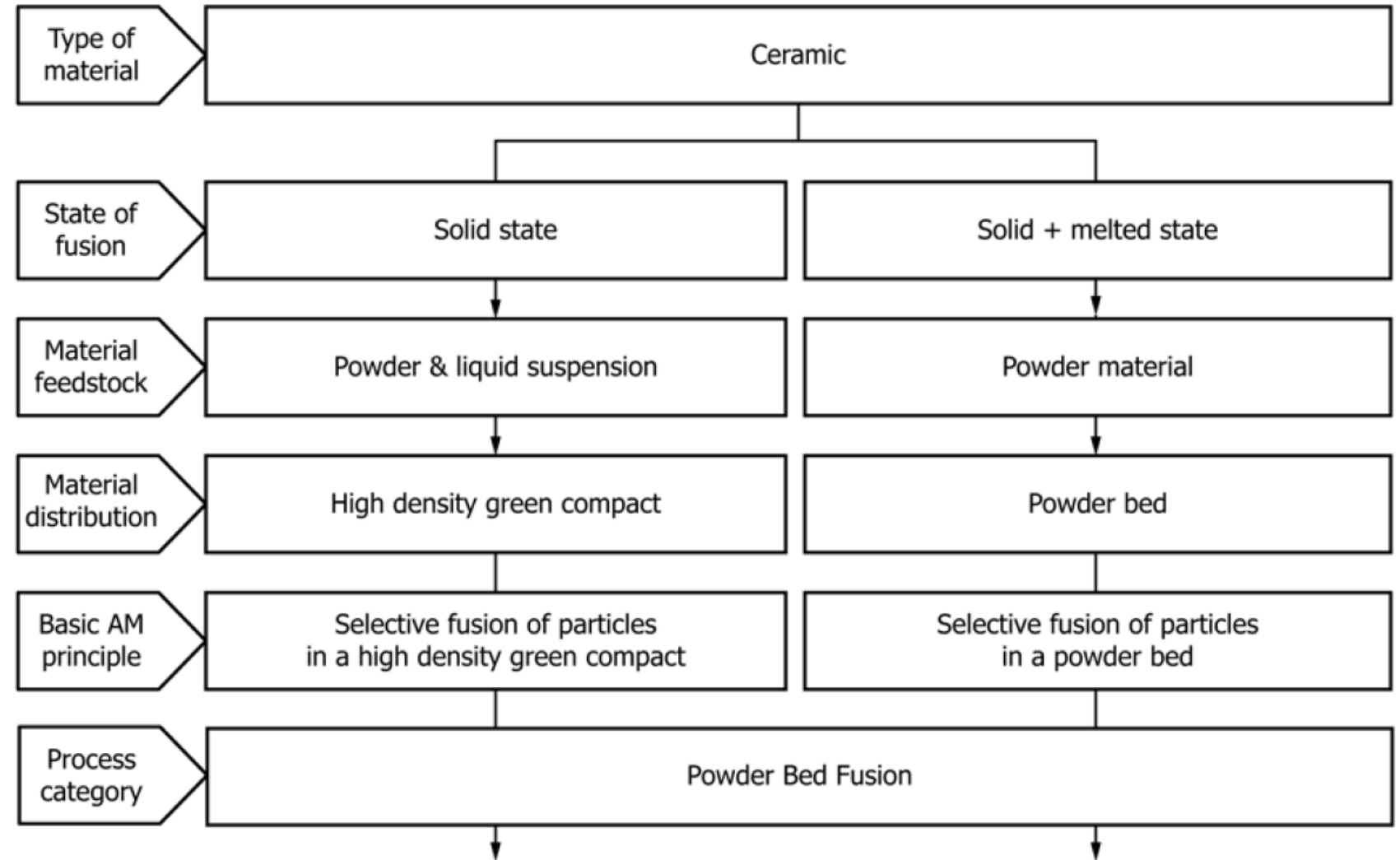


FIG. A1.4 Overview of single-step AM processing principles for ceramic materials





Multi-trinn AM-behandling

- Metaller, keramikk og kompositter
- I den første fasen er det utskrift materialet vanligvis bundet av mediet
- I de følgende trinn fordampes mediet, vanligvis via varmebehandling
- Til slutt blir komponenten sintret
- HIP - varm isostatisk pressing (400-2070 bar) og c. 2000 oC-behandling brukes til å komprimere komponenten

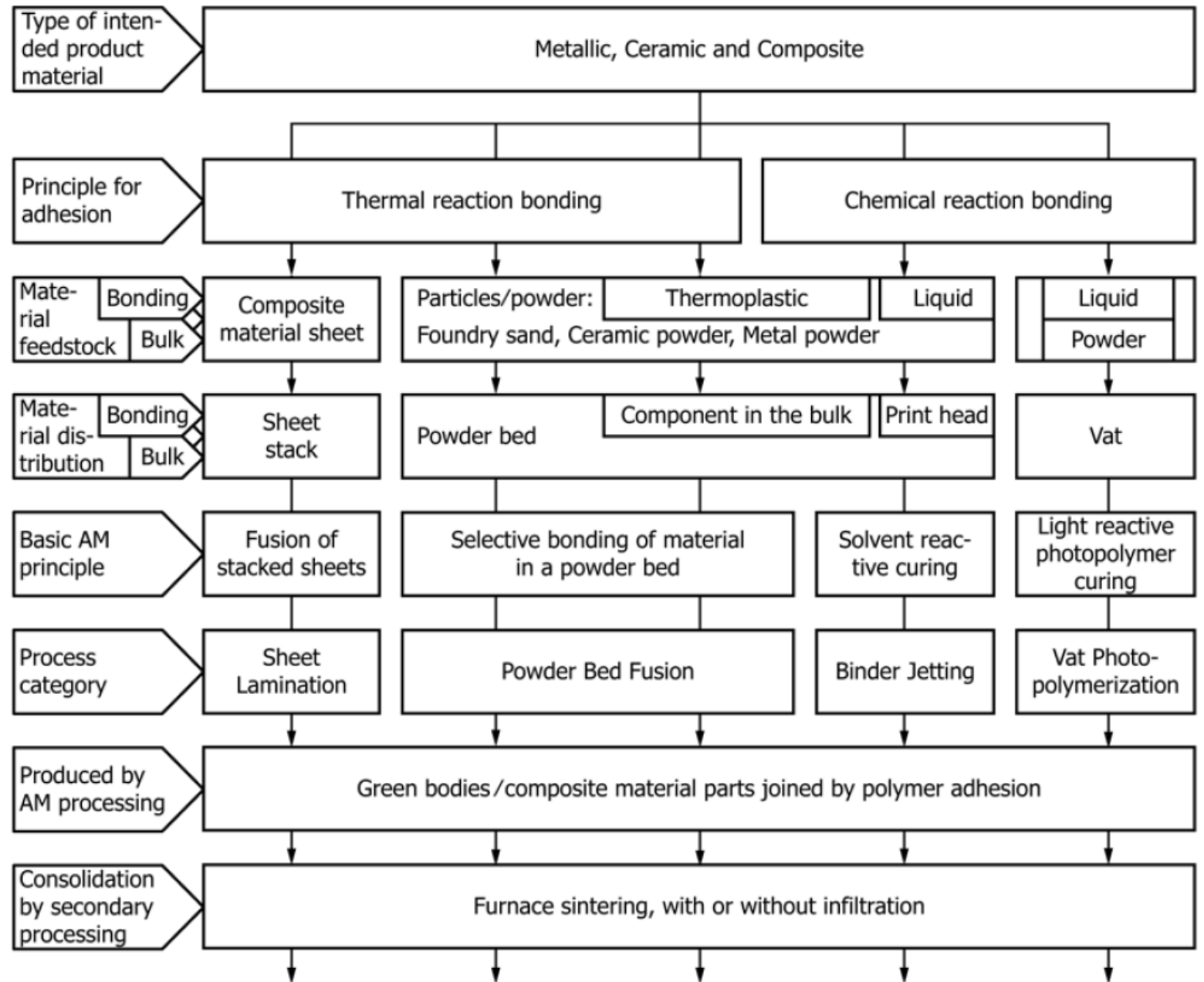


FIG. A1.5 Overview of multi-step AM processing principles for metallic, ceramic and composite materials





DISKUSJON

Powder Bed Fusion

Material Extrusion

Vat Photopolymerization

Material Jetting

Binder Jetting

Directed Energy Deposition

Sheet Lamination

- **Behov for støttestrukturer**
- **Behov for etterbehandling**
- **ANISOTROPY under utskrivning**
- **Geometriske begrensninger**
- **Materielle og mekaniske egenskaper til produserte komponenter**

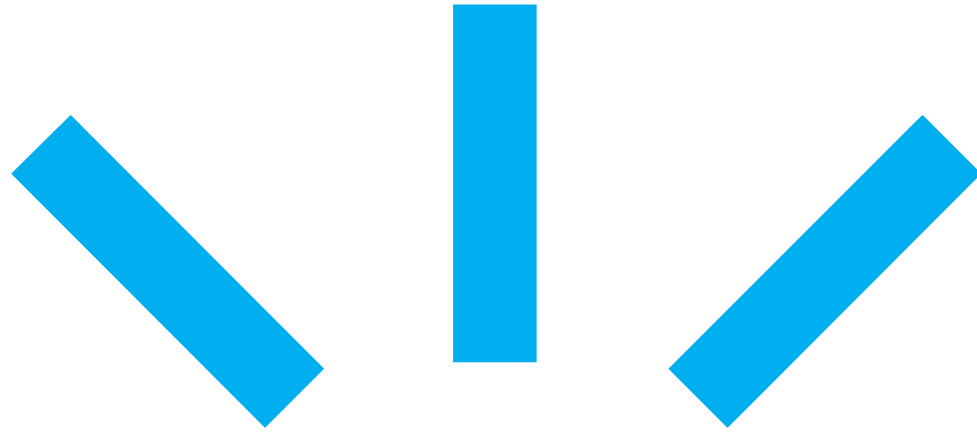


UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





DFAM

Designing with additive manufacturing
Desig med additiv produksjon i tankene



Table of contents

- **Eksempel på utstyr og programvare**
- **Prosess**
- DFAM
- Design av komponenter
- Lag støttestrukturer og skriv ut parametere (Magics)
- Bestem utskriftstider og pris
- Faktorer som påvirker overflatebehandlingen
- Mekaniske egenskaper
- Bruk av SLM 280HL-skriver
- Prosedyrer etter utskrift
- Etterbehandling av komponenter
- **DFAM**
- Casestudie: Topologioptimalisering
- Casestudie: Fest delene til en komponent
- **Ytterligere tiltak**
- Ulike utskriftsplattformer
- Endring av materialer
- Pulverkontrollstasjon



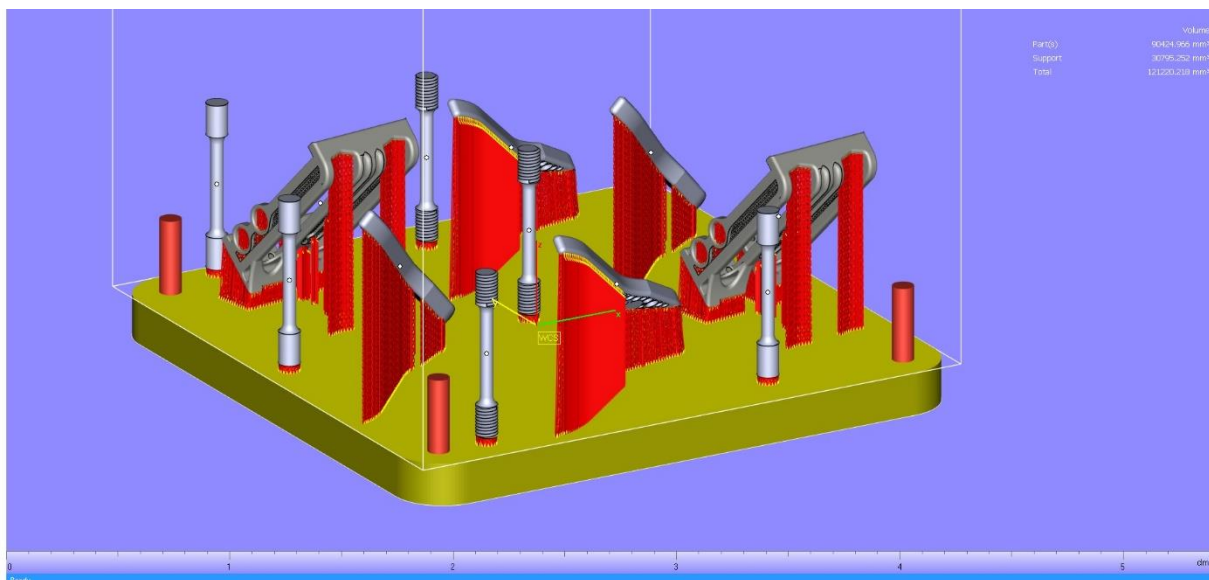
Maskineksempel



- **SLM Solutions 280 HL**
 - Fritt justerbare parametere og mulighet for å endre materialleverandøren
 - Maksimal utskriftskapasitet 280x280x365 mm³, minimum 50x50x80 mm³
 - Lagertykkelse 20 - 75 um
 - 1 x 700W fiberlaser
 - Materialer: AlSi10Mg, AISI 316L, AISI 420, Inconel 718, CoCr og Ti6Al4V. Pulver kornstørrelser for stål typisk 10-45 um og aluminium / titan 20-65 um
 - Gass: Argon eller nitrogen
 - Lagtykkelseovervåking: LCS (Layer Control System)
 - Tilleggsutstyr: MPM (Melt Pool Monitoring), LPM (Laser Power Monitoring) og HTH (High Temperature Heater)
- **Sieving station PSM 100**
 - To forskjellige hulstykkelser: 75 um (stål) og 100 um (aluminium og titan)
- **etterbehandling utstyr**
 - Glaskuleblåsing, båndsag, stekeovn for varmebehandling, håndverktøy m.m...



Maskiner og programvare i bruk



- **3D-design og FE-analyse**
 - Modellering av del
 - Topologi optimalisering
 - FE-analyse
 - Lagre fil i .STL-format
- **3D arbeidsplan**
 - Plassering av delene på plattformen ("nesting")
 - Oppretting av støttestrukturer for delene (vist i rødt på bildet)
 - Justering av maskinparametere
 - Laserkraft og hastighet, lagtykkelse
 - Lagre plattformen og parametrene il maskinkompatibelt format (.SLM-format)
 - Arbeidsplanleggingsprogramvare for 3D-utskrift
 - Autodesk Netfab
 - Materialise Magics
 - Etc.
- **Simulering av utskrift**
 - Å bestemme laserstrålebaner i de forskjellige lagene
 - For å se hvordan parametere fungerer i forskjellige deler av den utskrifte komponenten
- **Forberedelser for utskrift**
 - Plasser plattform for utskrift
 - Juster plattformens temperatur
 - Minimum tid mellom lag (avkjølingstid)
 - Justerer gasstrømmen
 - Forberedelser til det første laget
 - Maskinvare som bruker MCS



Process - DFAM

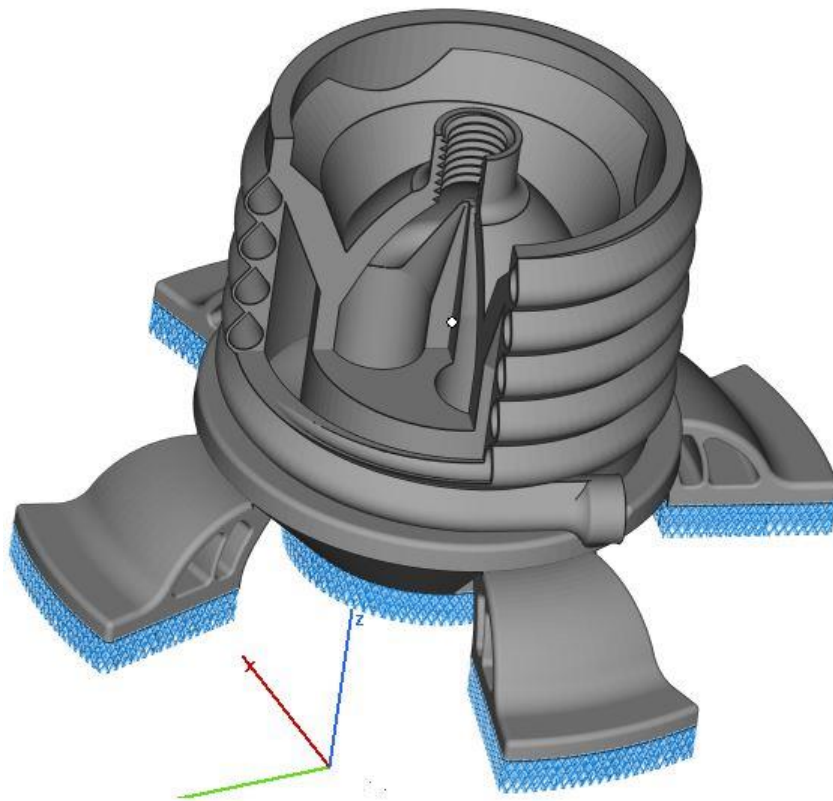


- DFMA = Design for additive manufacturing
- Design av komponenter med produksjonsmetode I tankene er veldig viktig!
- Geometrisk frihet - Bryt gamle vaner og tradisjonelle modeller!
- Produksjonsevne, pålitelighet og kostnadsoptimalisering

- **I designprosessen:**
 - Geometrisk FEM-basert optimalisering - styrker og vekt optimalisering (casestudie)
 - Reduser antall deler ved å kombinere dem - reduser produksjonskostnadene, spesielt for montering (casestudie)
 - Variasjon i struktur – f.eks. utnyttelse av honningkake, nett og porestruktur
 - Mass tilpasning - hver del kan være forskjellig
 - Multi-material utskrivning (ennå ikke tilgjengelig i metall 3D printing) – forskjellige egenskaper / materialer i samme produserte komponent
 - Hensyn til utskriftsposisjon og støtter allerede i designfasen → minimerer etterbehandling



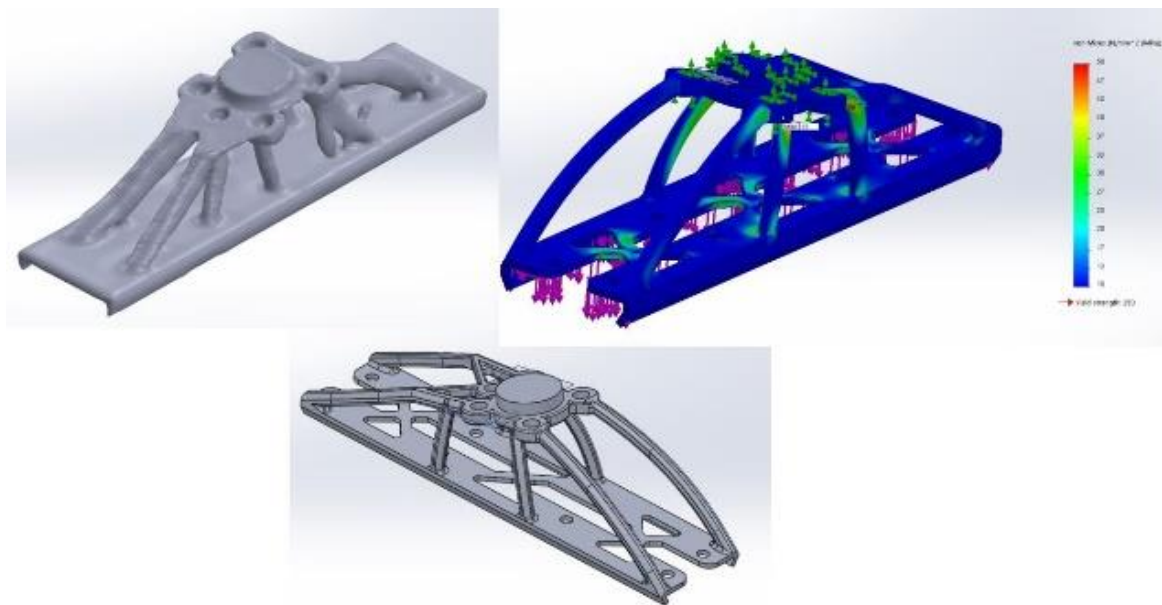
Prosess - Design av komponenter



- Hvis en komponent kan produseres kostnadseffektivt ved bruk av tradisjonelle metoder, kan det ikke være aktuelt å skrive ut med SLM-metoden
- **Egnede 3D-utskrivbare deler er ofte:**
 - Kunne utnytte mest mulig av teknikkens evner
 - Strukturelt vanskeligere eller umulig å produsere med andre metoder
 - Når flere deler kan skrives ut sammen som en enkel komponent
 - Prototyper, små serier og unike deler
 - Unike og tilpassede deler



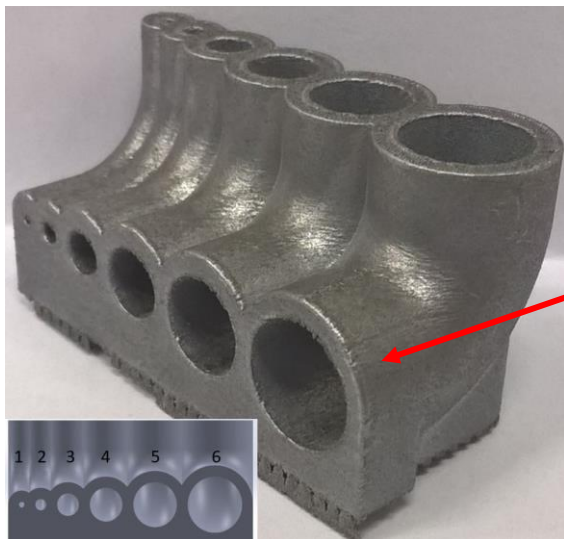
Prosess - Design av komponenter



- I tillegg til tekniske krav, er det viktig å tenke gjennom produksjonsmetoden og behovet for etterbehandling
- Det er viktig å ta hensyn til utskriftsretningen og dens effekter på komponenten i designfasen
- Topologioptimalisering er et godt verktøy for å optimalisere styrken og vekten til komponenten i bildet
- Designguider:
 - Standards:
 - 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
 - Free Guidelines:
 - 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)
 - Renishaw: 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.materialize.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>)



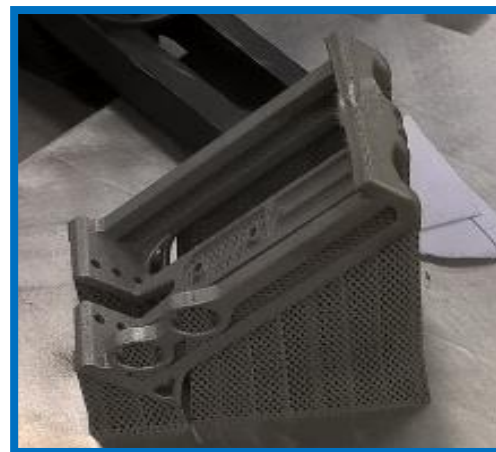
Prosess - Design av komponenter



Supports:
AlSi10Mg

Begrensninger

- Minimum vinkel uten støttestrukturer:
 - For stål er det 40-45 grader, avhengig av geometri
 - Lange og smale stenger kan skrives uten støtte selv i 45 graders vinkel
 - Aluminium kan skrives ut selv i en 30-graders vinkel
 - Overflatekvalitet er betydelig redusert (gradasjonseffekt)
- Sirkulært horisontalt hull
 - Stål mindre enn 5 mm
 - Aluminium opp til 10 mm
 - Sirkulært hullgeometri blir en mer oval form
 - Hull på bilde 1 mm - 10 mm
- Materielle begrensninger
 - Varmeledningsevne av aluminium sammenlignet med stål
 - Forskjeller i støttestrukturer



Supports: 316L



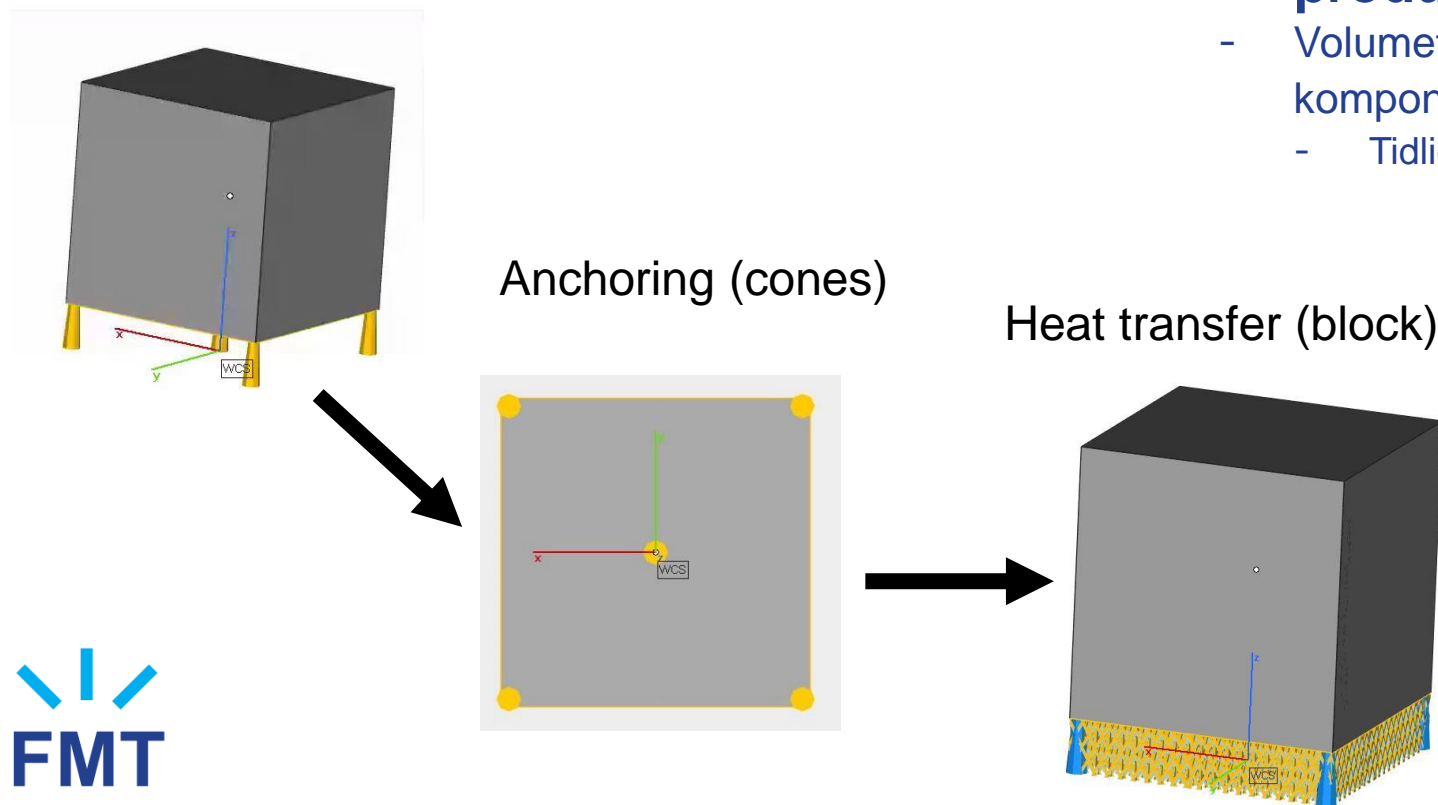
Prosess - Design av komponenter

– Formålet med støttene

- For å lede varmen fra komponenten til plattformen så effektivt som mulig
- "Forankrer" komponenten på plattformen for å motvirke deformasjoner på grunn av varme

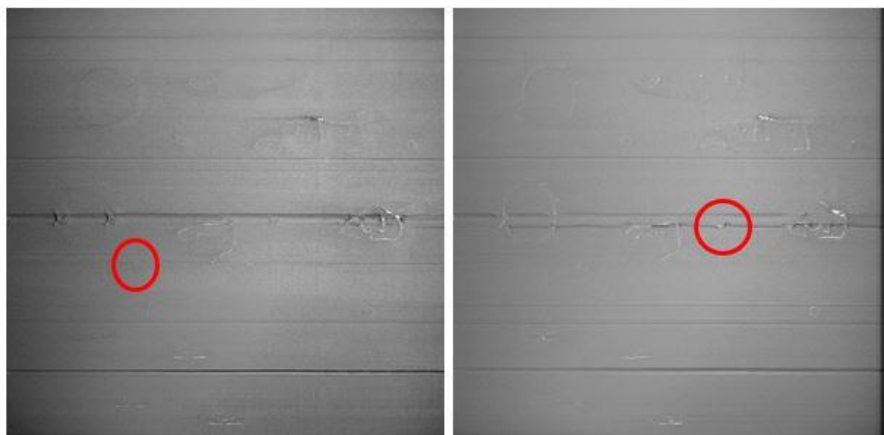
– En komponent er egnet for additiv produksjon når

- Volumet av støttestrukturen er mindre enn selve komponenten
- Tidligere lag støtter følgende lag → Støttestrukturer kan unngås

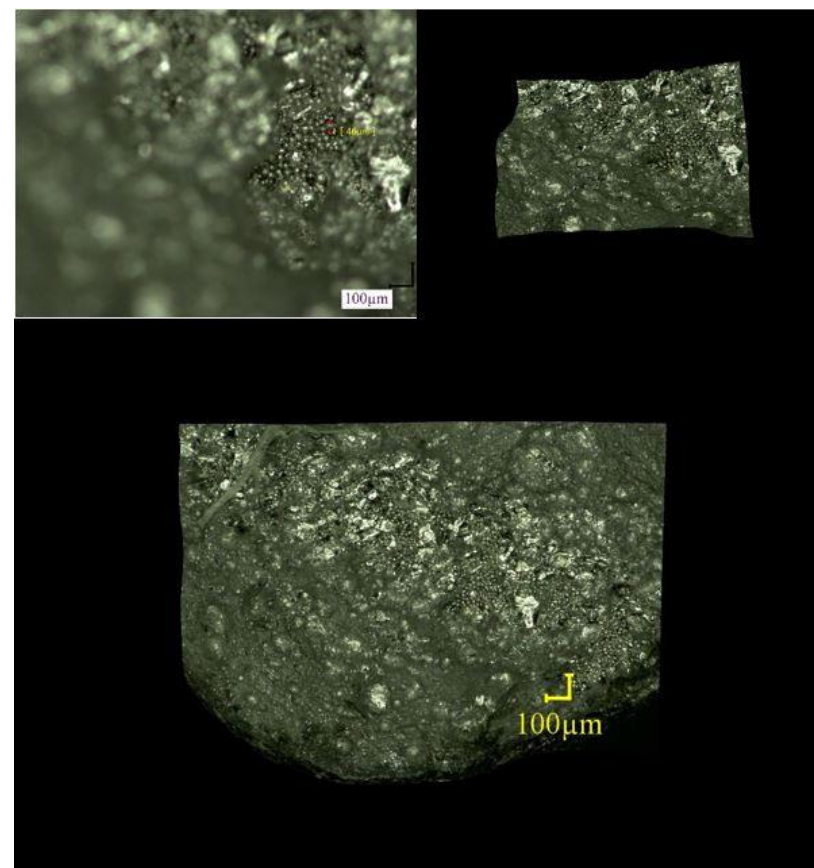




Prosess - Design av komponenter

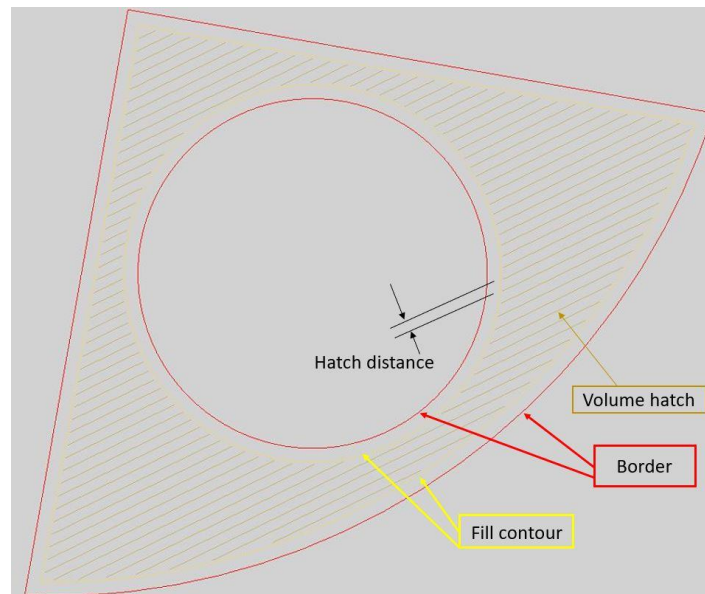


- Bilder viser pulversprederbladet som kolliderer med komponenten (viktigheten av riktig design)
- Dårlig geometri og utilstrekkelig støtte → porøs mikrostruktur og ikke-smeltede pulverpartikler!
- Dårlige mekaniske egenskaper



Prosess - Opprette støtter og utskriftsparametere

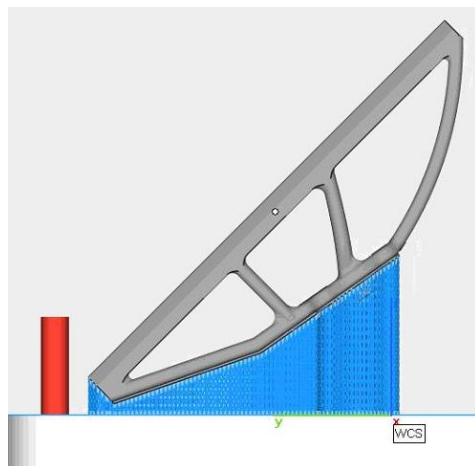
- Overfør deler til 3D printing pre-processing programvare i STL format
 - Plassere delen på plattformen
 - Bestemme komponentorientering
 - Design av støtte
 - Valg av støtte ex. punkt, linje, f.eks. poeng, linje, kile osv
 - Ulike materialer har forskjellige behov for støttestrukturer
 - Valg av laserparametere for forskjellige deler (bilde), for eksempel:
 - lasereffekt
 - laser hastighet
 - Innstillinger for laserpåfylling
 - Valg av lagertykkelse
 - Opprettelse av konfigurasjonsfil (.SLM)



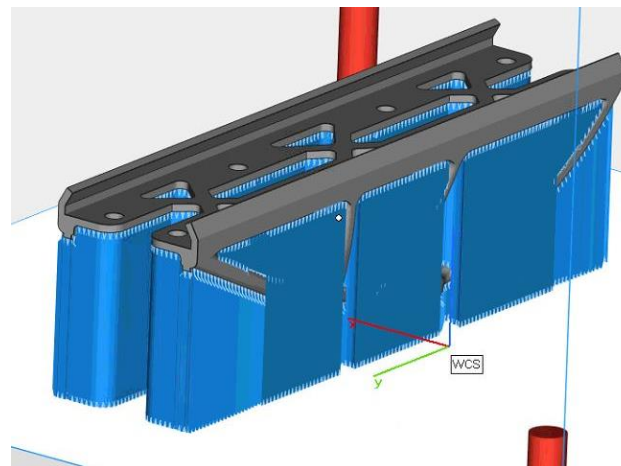


Prosess - Bestemming printingstid og pris

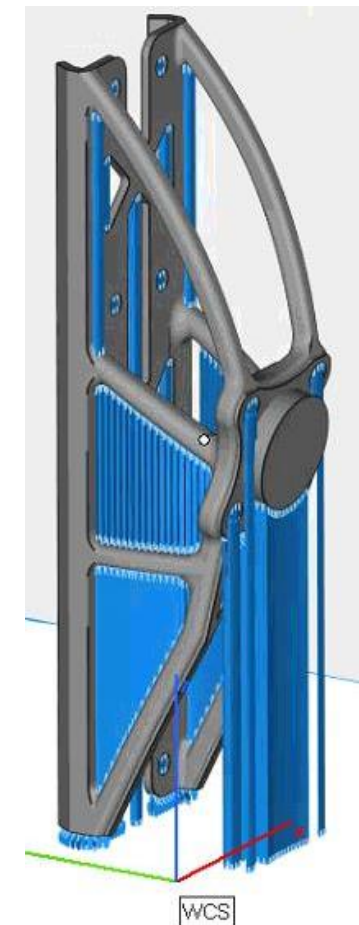
Pulverspredningstid +
lasertid + avkjølingstid
mellom lag = **1 lags
utskriftstid**



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



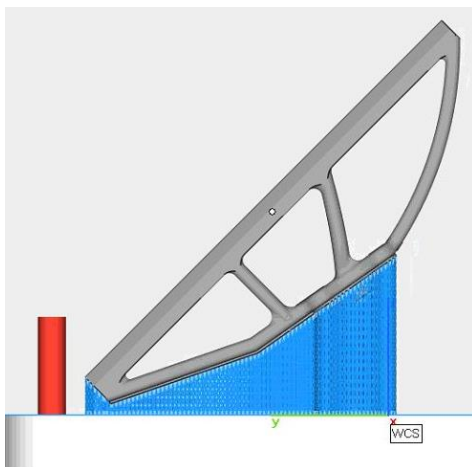
0 deg (30 μm , AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 66165 [mm³]
Printing time: 8 h
Post-processing: hard



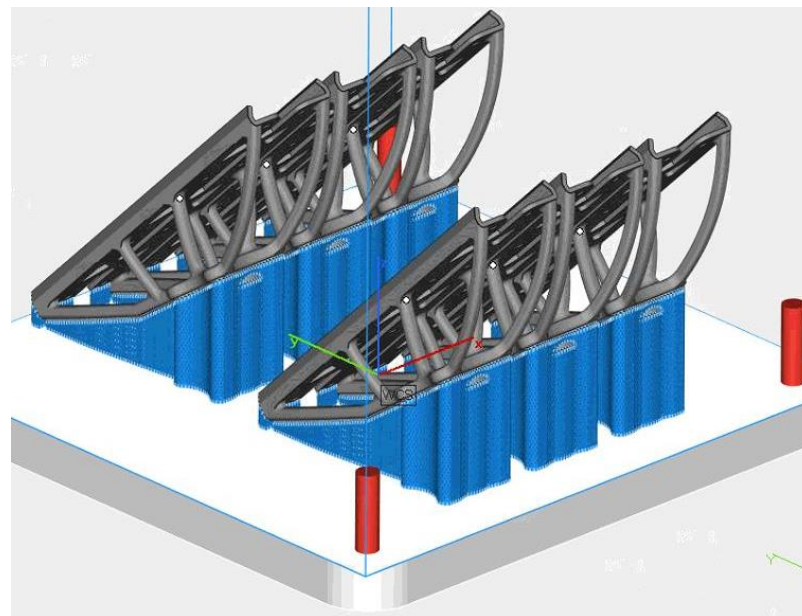
90 deg (30 μm , AlSi10Mg):
Part volume 37203 [mm³]
Support volume 9749 [mm³]
Printing time: 15 h 30 min
Post-processing: medium



Prosess - Bestemming printingstid og pris



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



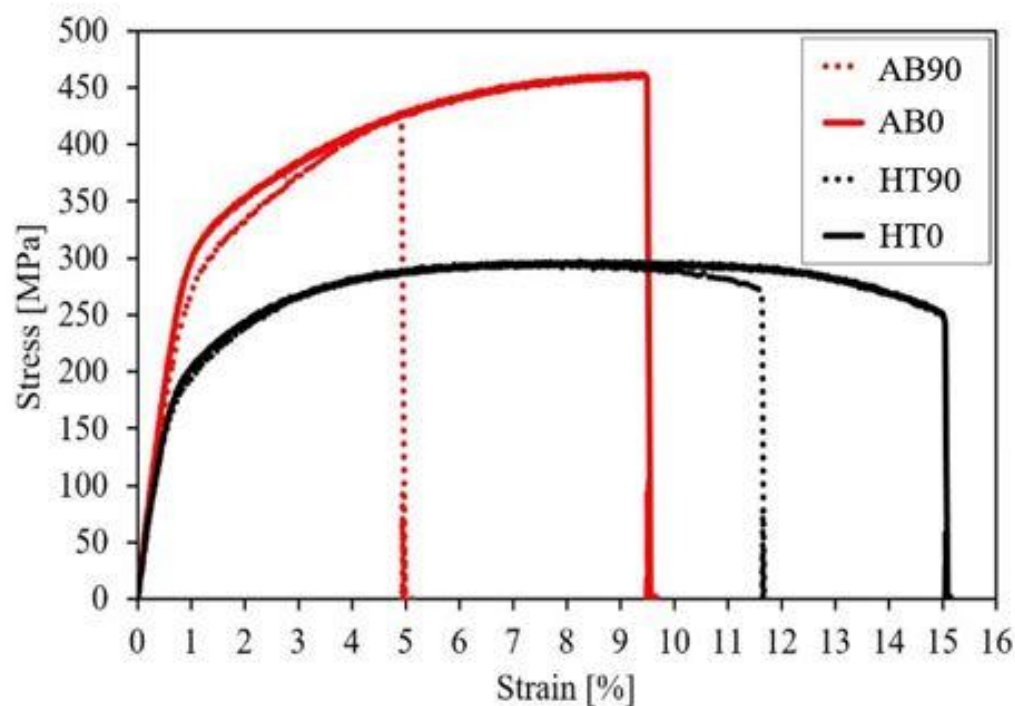
Prosess - Overflatekvalitets faktorer

- Lagtykkelse
- Geometri av komponenten
- Topp- og bunnflater og vinkler mot horisontalplanet
- Partikkelstørrelse på brukt metallpulver
 - Ofte:
 - Stål 10-45 um
 - Reaktive materialer aluminium og titan 20-63 um
- Laserparametere for disse overflatene





Prosess - Mekaniske egenskaper



Strekprøver med to retninger ved bruk av AlSi10Mg som testmateriale. Både med og uten varmebehandling.

– Påvirkende faktorer

- komponent geometri
- Riktig valg av materiale
- Anisotropi av materialer
 - Komponentretning er viktig
- Laserparametere spesielt på innsiden (volumluke og lukeavstand)
- Fuktprosent av pulveret <5% → Forhindrer porøsitet
- Lagtykkelse

| 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 |

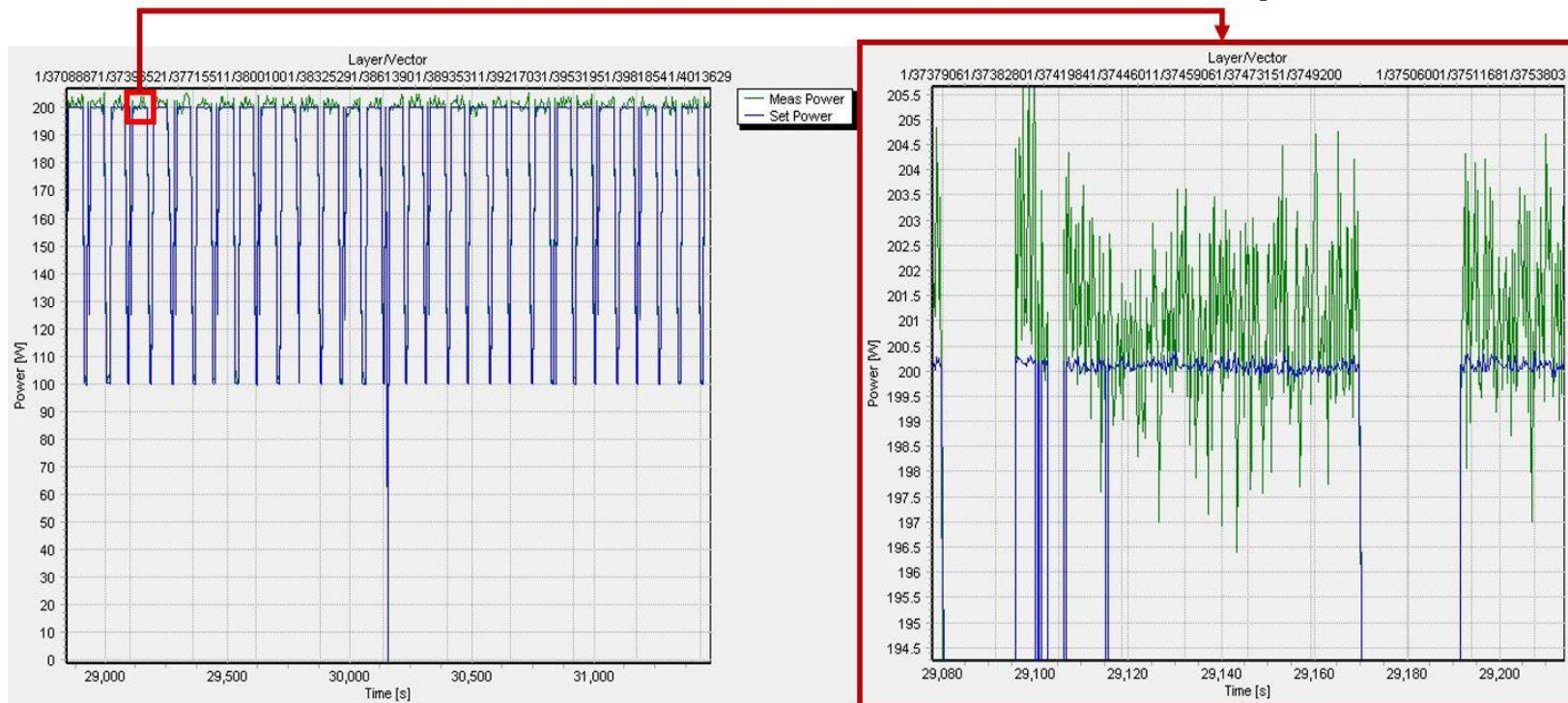
Strekprøver med 316L-materiale med tre forskjellige parametere. Varmebehandlet:

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



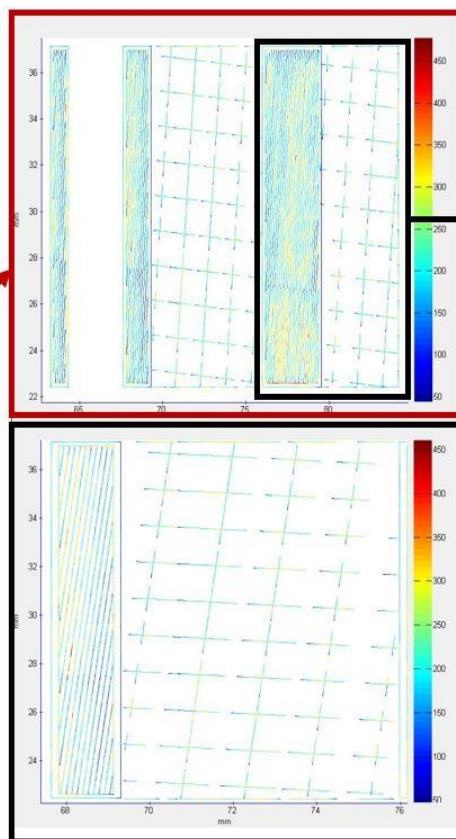
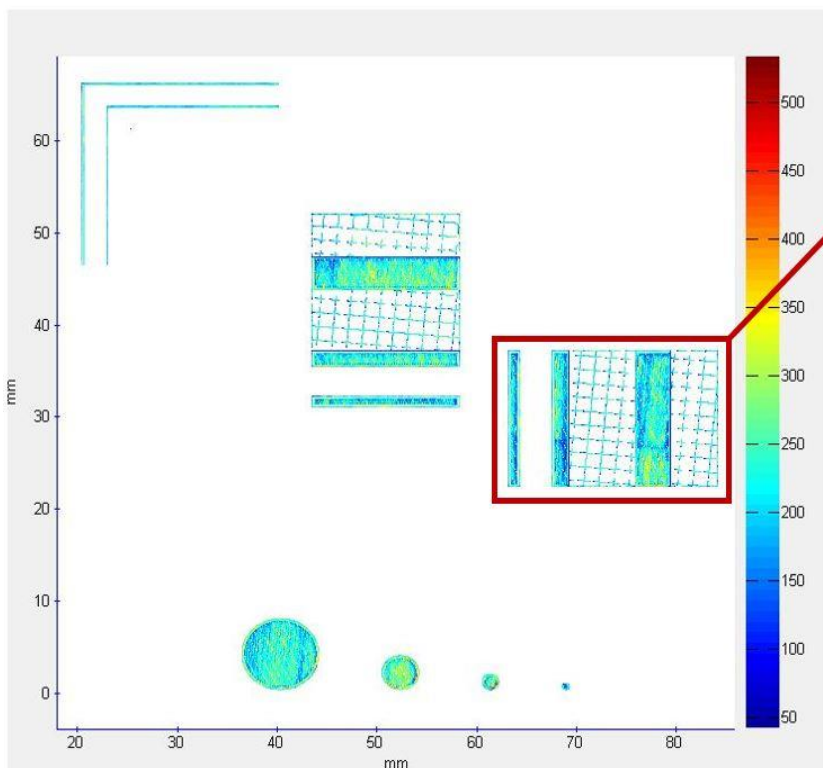
Prosess - Mekaniske egenskaper

- **Overvåkingsverktøy - LPM (Laser power monitoring) og MPM (Melt Pool Monitoring)**
- Maskinprodusenter har begynt å utvikle forskjellige programvare for å observere / visualisere kvaliteten på utskrivning
- LPM brukes til å overvåke laserkraft i sanntid
 - Legger merke til når nominell ytelse og faktisk wattstyrke avviker betydelig
- Gassanalysator





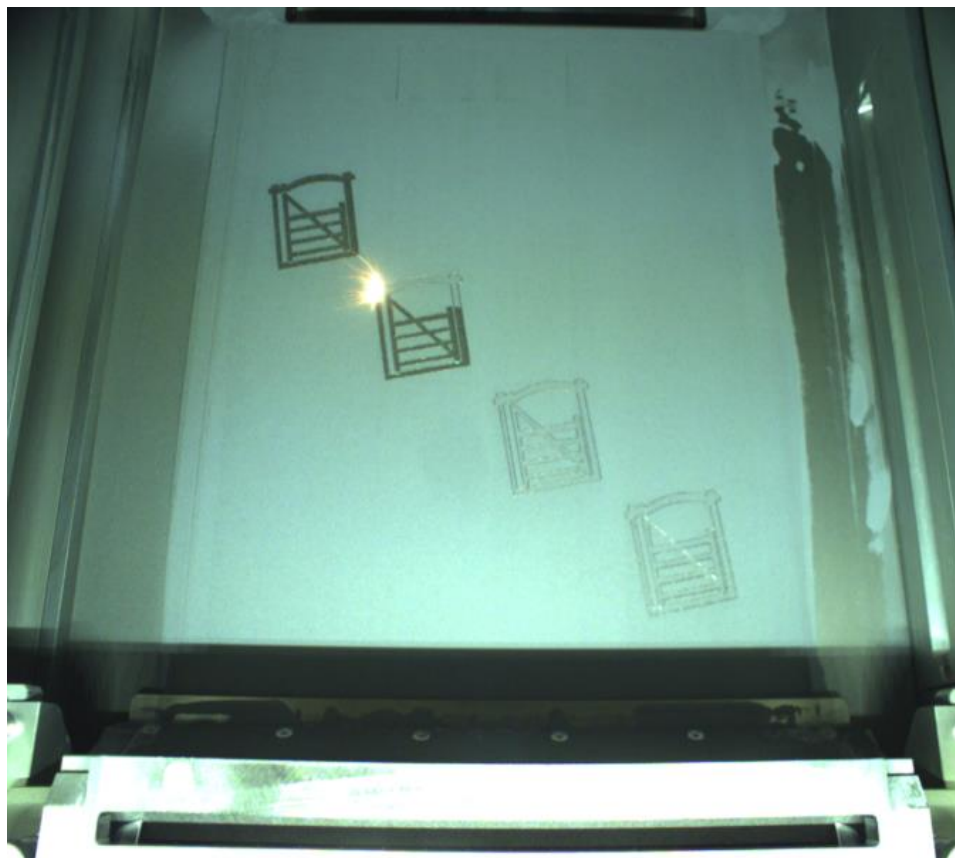
Prosess - Mekaniske egenskaper



- **Overvåkingsverktøy - LPM (Laser power monitoring) og MPM (Melt Pool Monitoring)**
- Maskinprodusenter har begynt å utvikle forskjellige typer programvare for kvalitetsobservasjon
- MPM brukes til å overvåke sanntids smeltebasseng produsert av laserstrålen (temperaturbasert)
 - Markerer avvik i smeltebassenget (eks porer)
 - Hvis en av komponentene (eller komponenten) ikke er skrevet ut riktig, kan MPM brukes til å vurdere området slik at komponenten kan redesignes
 - Målet er å oppnå en god temperaturhistorie for smeltebassenget



Prosess - Bruk av SLM 280 HL printer



- Eksport av konfigurasjonsfilen til maskinen (MCS .SLM)
- Eventuelle maskinparameterendringer
 - Kjøletid mellom lagene
 - Mating pulver
 - Gassstrøm (argon, nitrogen)
 - Innstilling av plattformens temperatur
- **Grunninnstillinger**
 - Plattform og kalibrering av bladbelegg - startnivå
 - Rengjøring av laserbeskyttelsesglasset
 - Virkelig tynt startlag av metallpulver
 - Fyll bygningskammeret med beskyttelsesgass → anoksisk tilstand
- **MPM start**
- **LPM start**
- **Start av printing**
- **Under bygging er det spesielt nødvendig å observere:**
 - Pulver påføres jevnt og beskyttelsesgass strømmer ordentlig



Prosess - Prosedyrer etter printing

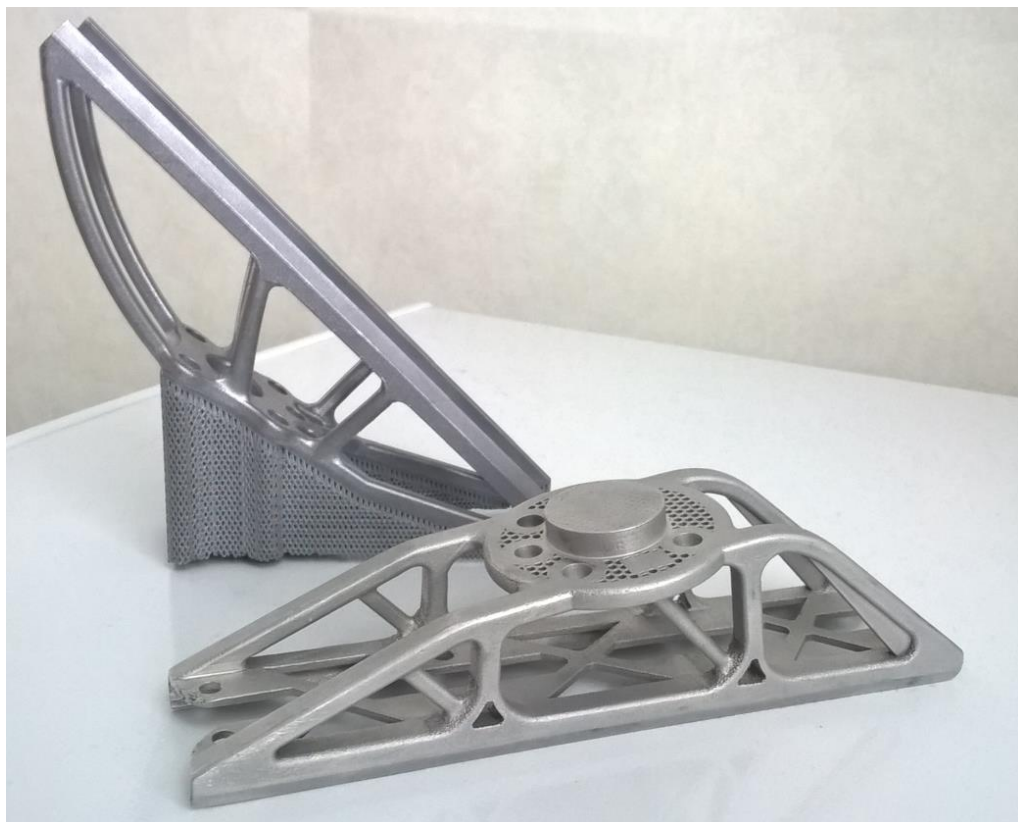


– Når utskriften er fullført

- Gjenvinning pulveret fra maskinen
 - Plattformen løftes manuelt slik at pulveret kan flyttes med en børste til oppsamlingsbeholdere
 - Dette gjentas til platen er tilbake i startposisjonen
- Sikting av pulveret
- Gjenbrukbart pulver blir lagdelt og returnert til maskinen (bilde)
- Fjern konstruksjonsplattformen fra maskinen
- Rengjøring av laserbeskyttelsesglass og kammer
- Fjern deler fra byggeplattformen
 - Deler blir ofte varmebehandlet (stressavlastning, utglødning) mens de fortsatt er igjen på plattformen
- Ta deler for etterbehandling
- Rengjøring av plattformen fra støtterester →
montering av plattformen inn i skriveren



Prosess - Etterbehandling av komponentene



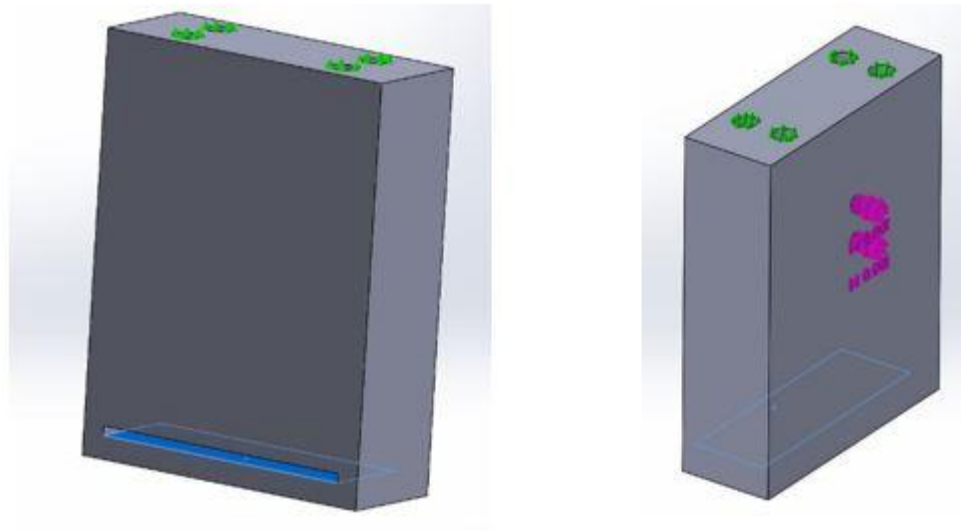
- Vanligvis er komponentene ikke klare til bruk umiddelbart etter utskrift, etterbehandling er nødvendig
 - Rengjøring av komponent (komponent + bærestruktur) fra resterende pulver
 - Varmebehandling
 - Fjern komponenten fra plattformen og fjern støttekonstruksjonene
- **Etterbehandling og metoder er for eksempel:**
 - Mekanisk fjerning av deler fra plattformen, for eksempel ved saging eller EDM
 - Industrielle rengjøringsmetoder (f.eks. Ultralydrens)
- **fresing**
- **sliping**
- **varmebehandling**
- Kjemisk behandling, eks **etsing**
- **sprengnings**
- **belegg**



DFAM – Topologioptimalis ering casestudie - robothånd

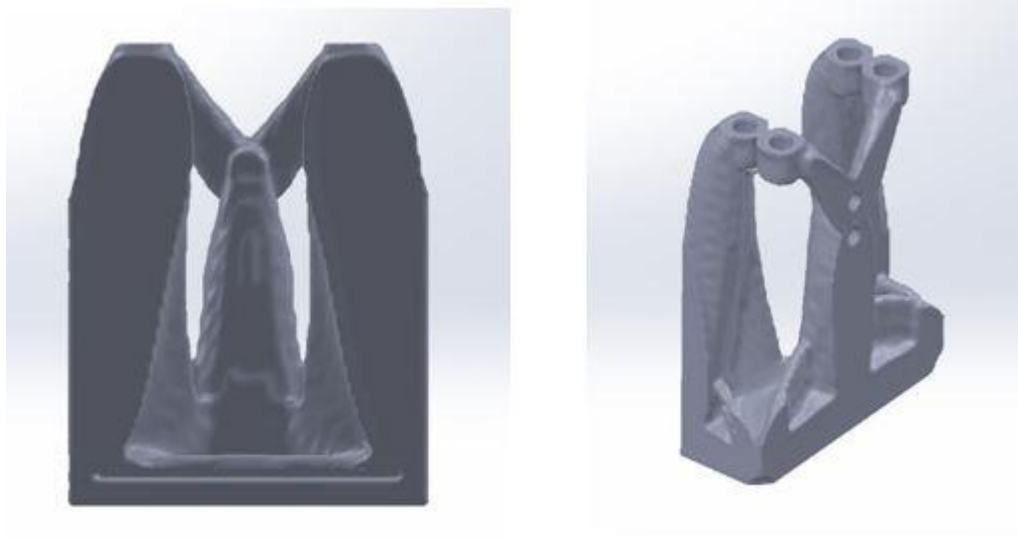
Trinn 1:

- Lag en massemodell
 - Størrelse grenser
 - Målinger av massemodellen
 - Forutsetninger
 - Faste spenningspunkter
 - Spenninger/ krefter





DFAM – Topologioptimalis ering casestudie - robothånd



Trinn 2:

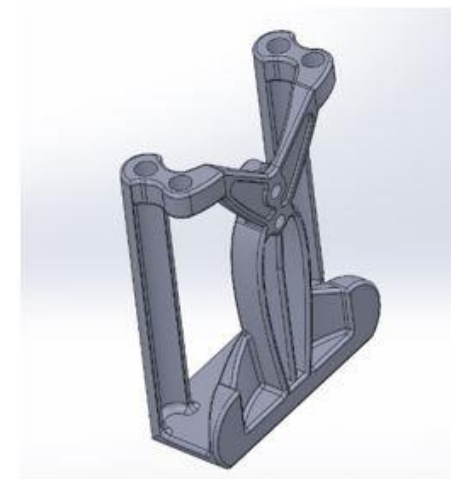
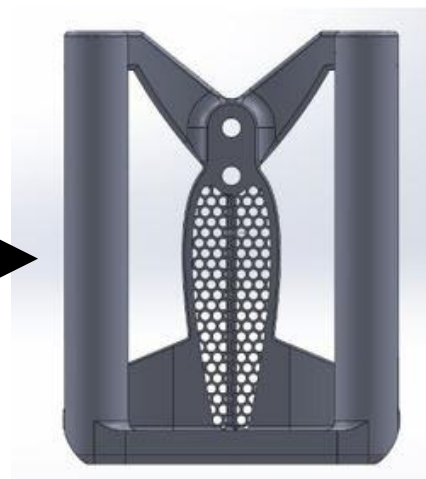
- Første FEM-beregningsresultater
 - Optimalisering angående styrke og vekt
 - I dette tilfellet var målet å redusere 75 vektprosent
 - Fullført foreløpig mål, vist i figur
 - Spenningsvei
 - Komponentens egenskaper
- Tar ikke hensyn til fremstillingsmetode → redesign



DFAM – Topologioptimalis ering casestudie - robothånd

Trinn 3:

- Redesign
 - Å dra nytte av resultatene fra den første FEM-optimaliseringen
 - Ta også hensyn til begrensningene i fremstillingsmetoden
 - Valg av den beste orienteringen (70 grader fra det horisontale planet) som designet er basert på

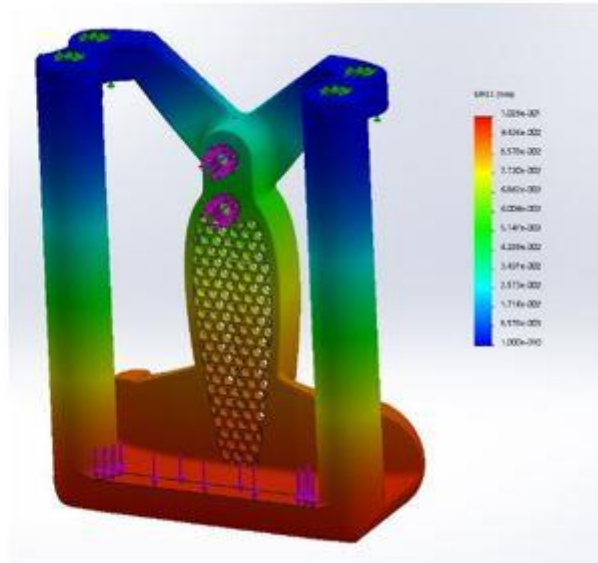
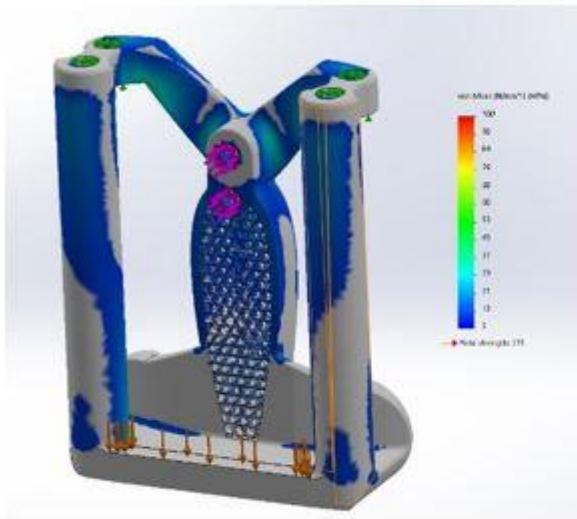




DFAM – Topologioptimalis ering casestudie - robothånd

Trinn 4:

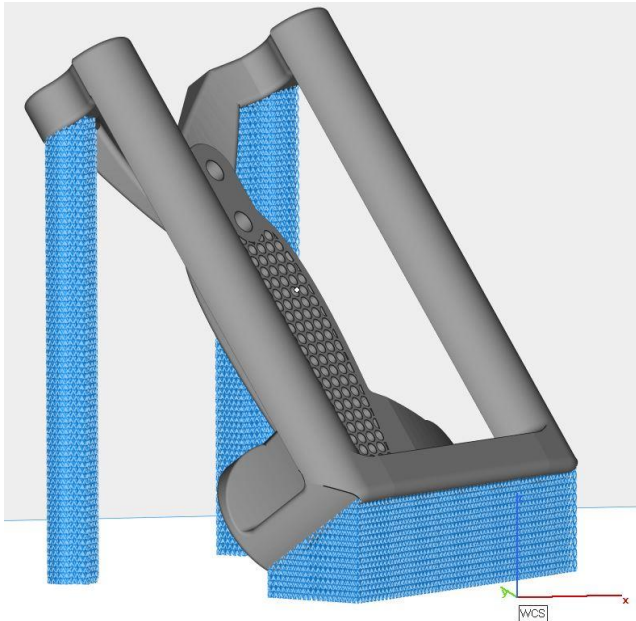
- Gjenta strømberegningen
 - Sikre styrken av komponenten ...
 - ... og finn ut at det er holdbart!
- Fortsett med utformingen av støttestrukturer
- Her er vektresultatene fra denne saken:



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



DFAM – Topologioptimalis ering casestudie - robothånd

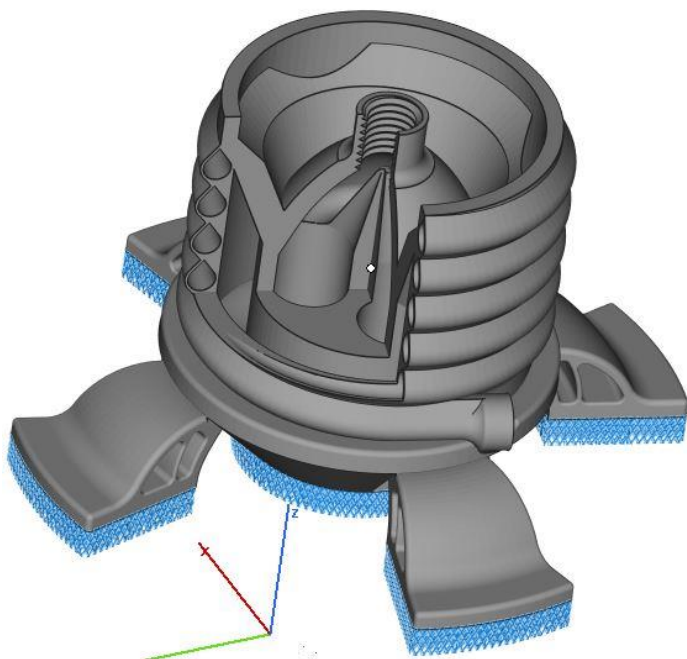


Trinn 5:

- Lag støttestrukturer og bestem prosessparametere:
 - Orientering er blitt bestemt på nytt for komponenten i prosjekteringsfasen
 - Valg basert på geometri
 - I dette tilfellet var blokkstøtten fordi overflatene er store og støtten vil bli fjernet
 - Valg av lagtykkelse og laserparametere
- I dette tilfellet ble det skrevet ut fire detaljer:
 - Utskriftstid 16 t 30 min
 - Pris / komponent 330 € + etterbehandling 25 min
 - Fresing og glassbollesprengning



DFAM - Montering av komponent i sin helhet - casestudie



- Materialblander med dysestruktur
 - Tre kanaler går sammen fra bunnen og strømmer ut gjennom dysen
- Omgitt av kjølekanaler
- Det valgte materialet er AlSi10Mg for sine varmeledningsegenskaper
- Åtte deler slått sammen til en
- Designet slik at tidligere lagre støtter følgende → ikke behov for støttestruktur
 - Støtt nederst for å kunne fjerne fra plattformen
 - Kan også skrives direkte på plattformen og fjernes med EDM
- Fire deler ble skrevet ut
- Utskriftstid 29 t → Kostnaden for en komponent var 580 € + fresing



Ytterligere tiltak - forskjellige byggeplattformer

- Det er tre forskjellige størrelser av plattformer for 3D-printers
- Høy temperaturvarmer (HTH) -plattform
 - (Rund-format) diameter 90 mm og utskriftshøyde av 100 mm
 - Maksimal temperatur 550 ° C
 - For temperaturer over 200 ° C kreves en keramisk skrape. Spredning av pulveret gjøres bare i en retning.
 - Høye temperaturer brukes til titan og stål
- Redusert størrelse på plattform
 - Utskriftsvolum 50x50x80 mm³
 - Ingen separat oppvarming
 - Den reduserte plattformen brukes til aluminium, titan og stål
- Generell plattform
 - Utskriftsvolum 280x280x365 mm³
 - Maksimal oppvarmingstemperatur 200 ° C



Ytterligere tiltak - Endring av utskriftsmaterialer

Ved skifting materialer fra stål til stål og aluminium til stål, er det en stor forskjell i det arbeidet som kreves

- Rengjøring mellom reaktiv (aluminium og titan) krever ikke så mye arbeid som når du skifter fra stål til reaktiv. Bytte mellom ståltyper krever ikke ekstra rengjøring.
- For eksempel, når du skifter fra stål til aluminium, må du bytte filter og rengjøre følgende:
 - Rør til materialer testing
 - utskrift kammeret
 - Skrapen som sprer pulveret
 - Hovedkammeret
 - pulverbeholdere
 - Silen
 - Vakuumet



Ytterligere tiltak

-

Pulversiktingsstasjon PSM 100

Separat siktestasjon PSM 100

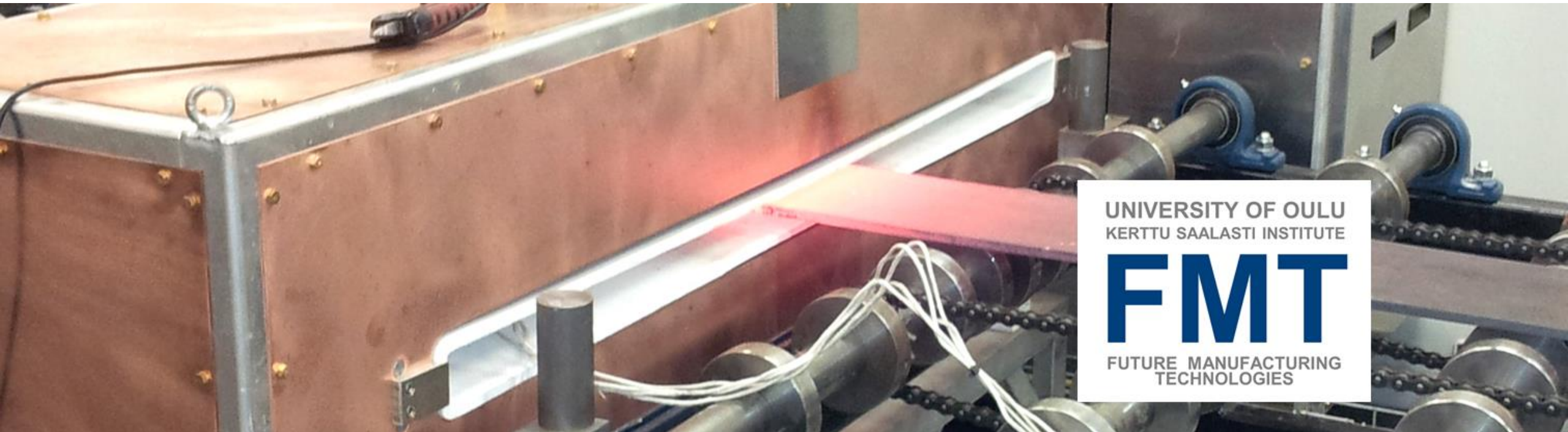
- Har to forskjellige sikthulldiameterer: 75 μm (stål) og 100 μm (aluminium og titan).
- Pulveret siktes for å skille dårlige pulverkorn fra pulveret
- Sikting av alt gjenværende pulver for å fjerne sveisede korn fra pulveret





Sammendrag og diskusjon

- SLM-metoden i praksis
- Design for SLM-metoden
- Etterbehandling og minimering av det
- Det er mange materialer tilgjengelig -
men er de nyttige?



UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES





Bruk av AM



Hva er kostnaden?

Maskiner

Materialer

Filtre

Gass

Operatørkostnader

Etterbehandling

– Maskiner

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

– Filaments

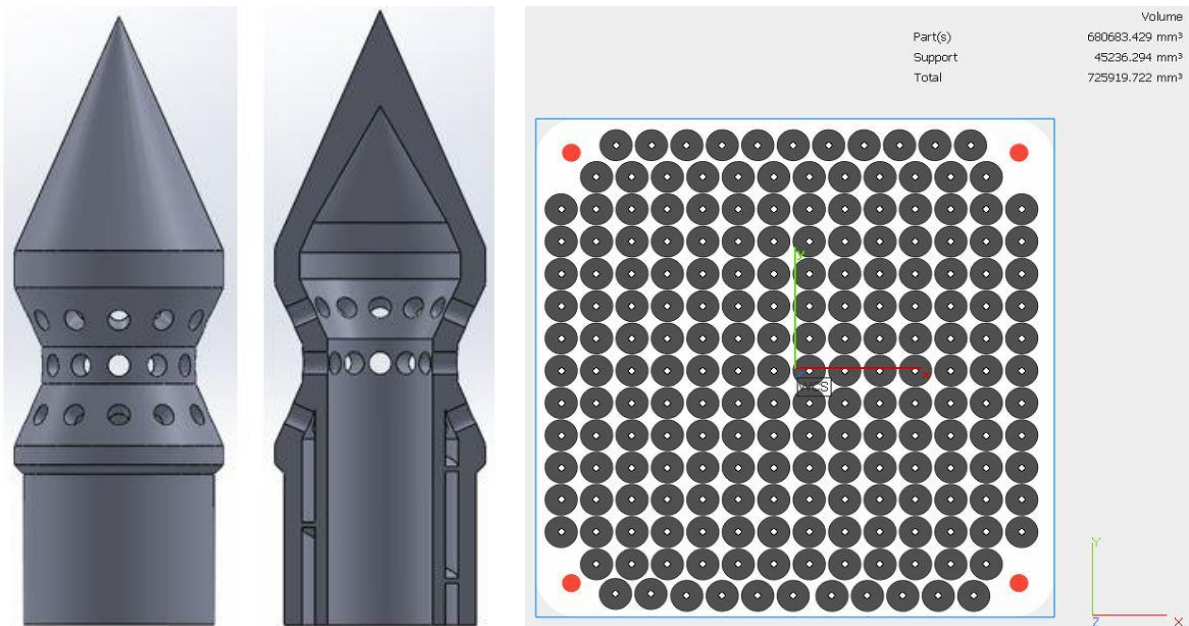
- PLA c. 20 €/Kg, Antimicrobial 50 €/kg
- ABS c. 25 €/kg
- Nylon c. 80 €/kg

– Metallpulver

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



Hva er kostnaden?



- 200 stk utskrift av branndyser (SLM280HL med en 700W laser)
- 725919 mm³ totalvolum (komponenter + støttekonstruksjoner)
 - Støttestrukturer 45236 mm³ (ca. 6% av det totale volumet)
- Utskriftstid 133 t
- utskriftskostnader
 - Kostnader for maskindrift 133 t * 100 € / t = 13300 €
 - Materialskostnader 573,5 €
 - Etterbehandling kostnader
- Kostnader for den utskriftete komponenten 13873,5 € / 200 = 69,4 € / komponent
- Kostnaden for etterbehandling ble estimert til å være omtrent 30 € / komponent (varmebehandling, skille fra byggeplattformen, fjerning av støttekonstruksjoner og gjenging og montering av O-ringen (tetting))
- Total kostnad per komponent 99,4 €
- Hvordan kan kostnadene reduseres ytterligere?
 - Utnytte volumet av kammeret så mye som mulig !!



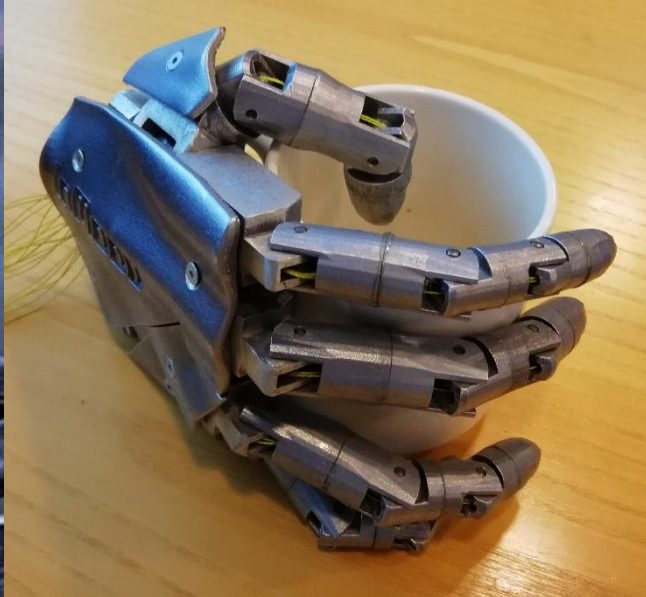
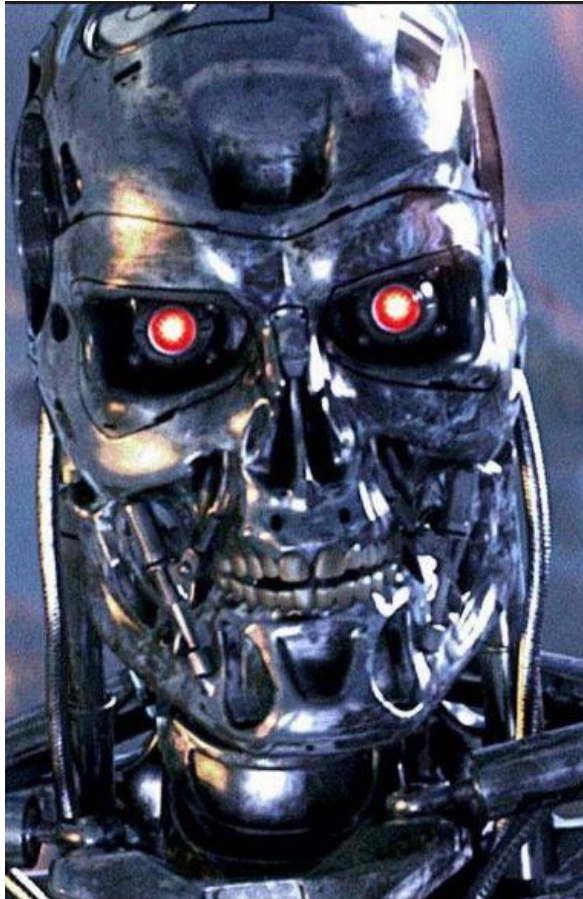
Era av metall 3D-skrivere?

- 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

- I dag
 - Antall lasere i skriverne øker
 - Størrelsen på utskriftskammeret har økt
 - Økt produktivitet av maskinene
 - Automatisering for maskinene øker
 - Automatisk pulvergjenvinning
 - Automatisk rengjøring og utskifting av kamre
 - Mulighet for CNC-maskinering under utskrift
 - Optimalisering av utskriftsparametere øker og forbedres
 - forbedret utskriftskvalitet
 - Overvåkingssystem for utskriftsprosessen
 - Raskere maskiner i markedet
 - Evne til å lage komponenter raskere (hvis mekaniske egenskaper ikke er hovedkriteriet)

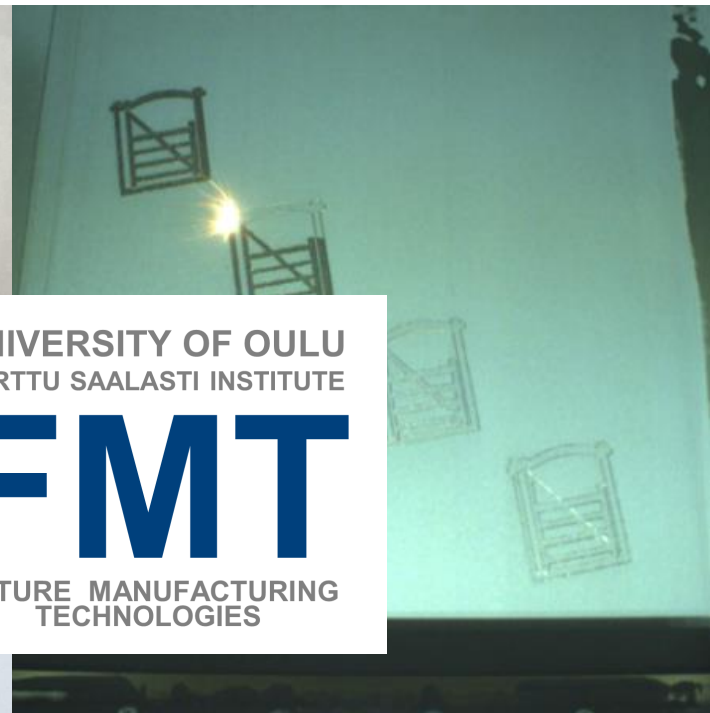
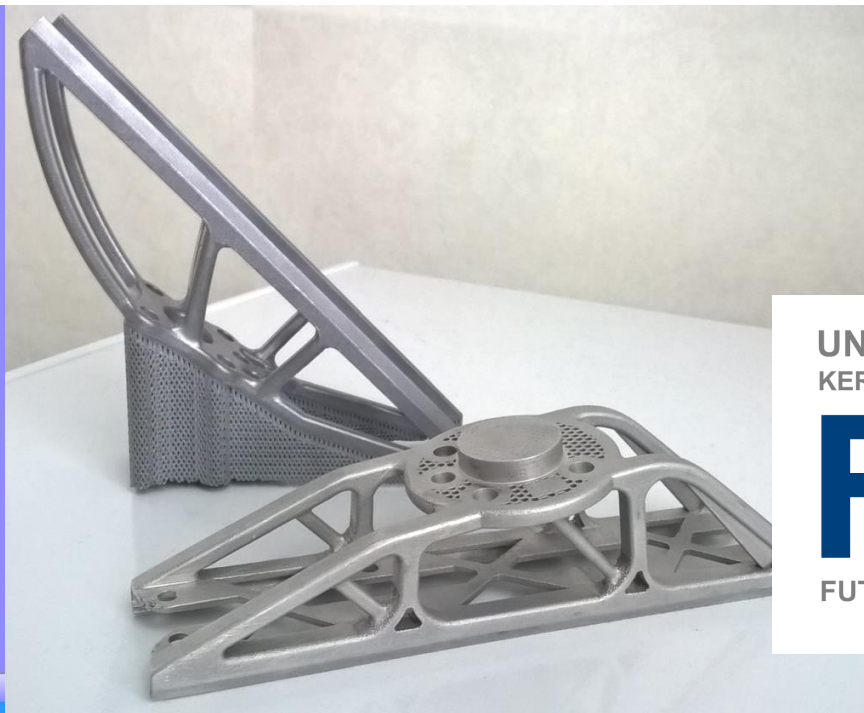
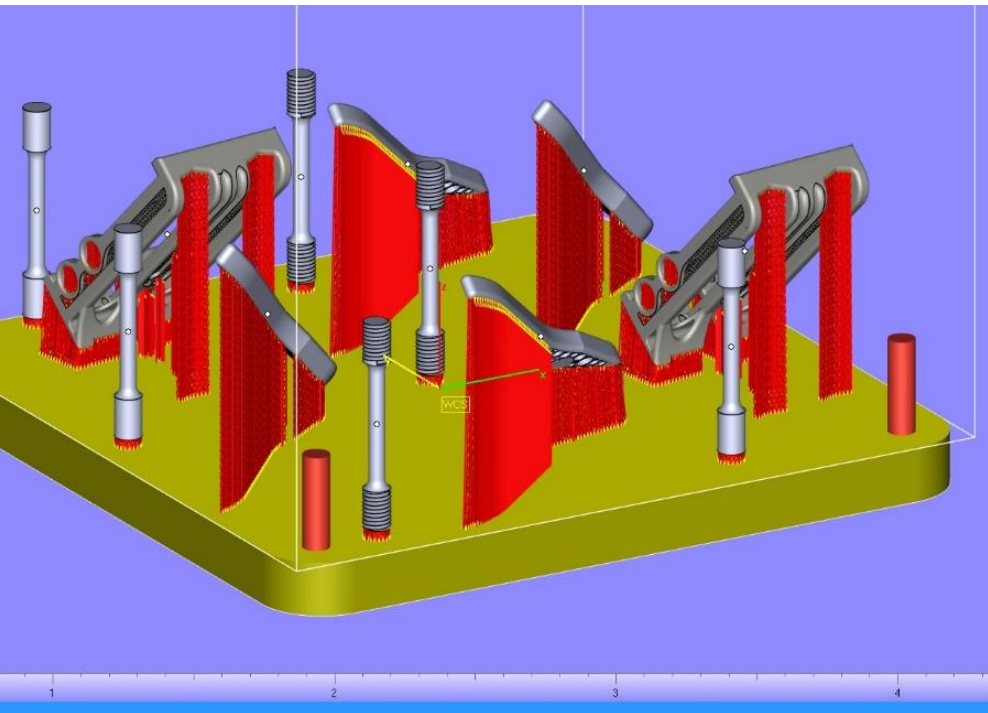


Fremtiden av metall 3D-printing?



Fremtiden

- Økt automatisering av maskinene
- Eliminering av støttestrukturer
- Økt utskriftsstørrelse
- Multi-materialer for metaller også?
- Økt kvalitetssikring
 - Maskinen kan uavhengig forbedre kvaliteten under utskrift
- SLM, DLD, Jetting processes



UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE
FMT
FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES



UNIVERSITY OF OULU
KERTTU SAALASTI INSTITUTE

FMT

FUTURE MANUFACTURING
TECHNOLOGIES

C3TS

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



In cooperation with



TROMS County Council
TROMS fylkeskommune

**Interreg
Pohjoinen**

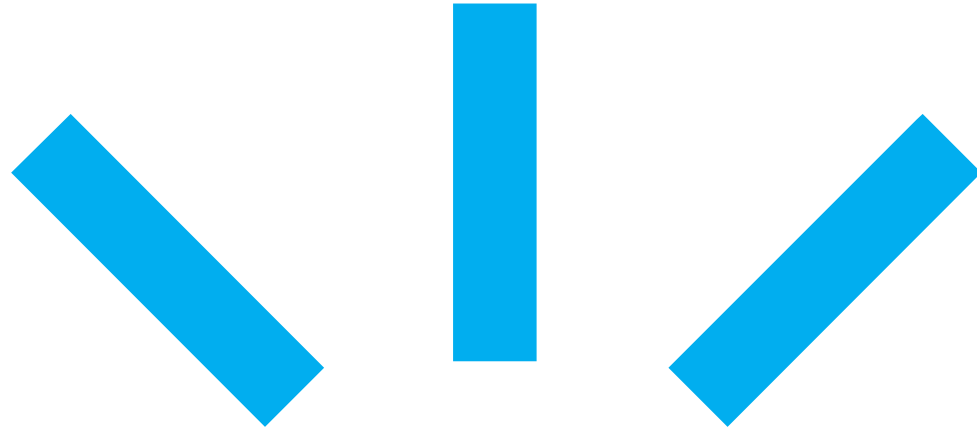
Euroopan aluekehitysrahasto



EUROOPAN UNIONI



LAPIN LIITTO



Sammen drag og diskusjon



- 3D printing techniques
- DFAM – Design
- SLM printing i praksis
- Industriell bruk og fremtiden
- Diskusjon og kommentarer



Takk for oppmerksomheten!



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**