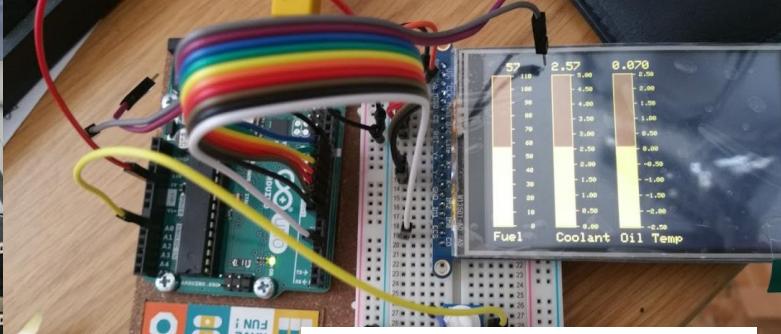


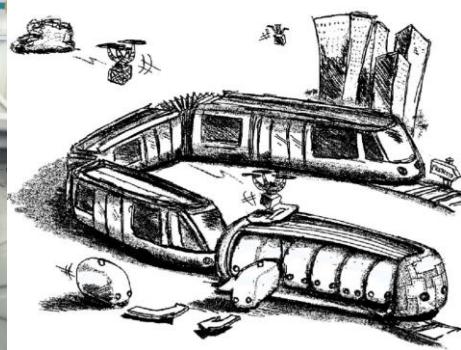
# ADDITIVE MANUFACTURING

Michael Erneland



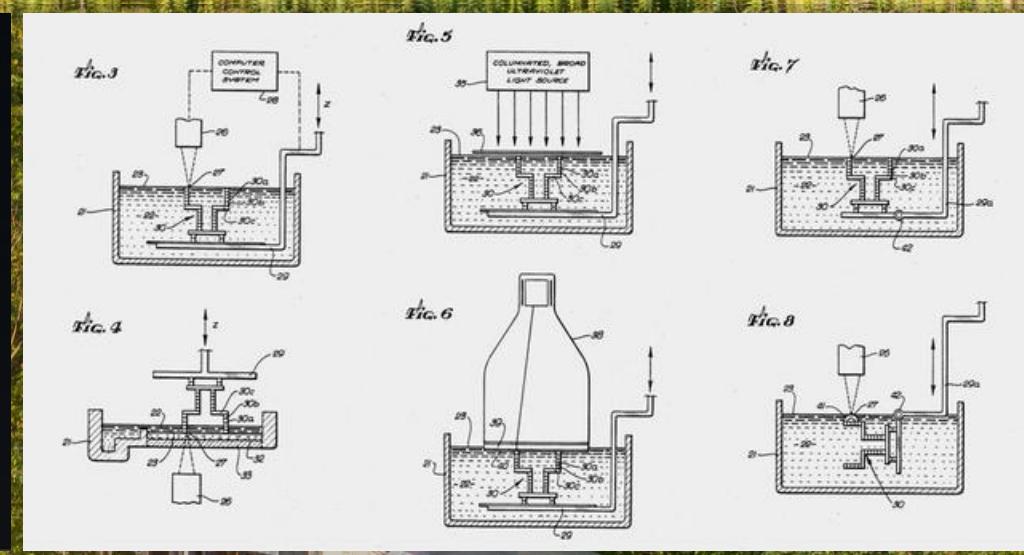


MICRO

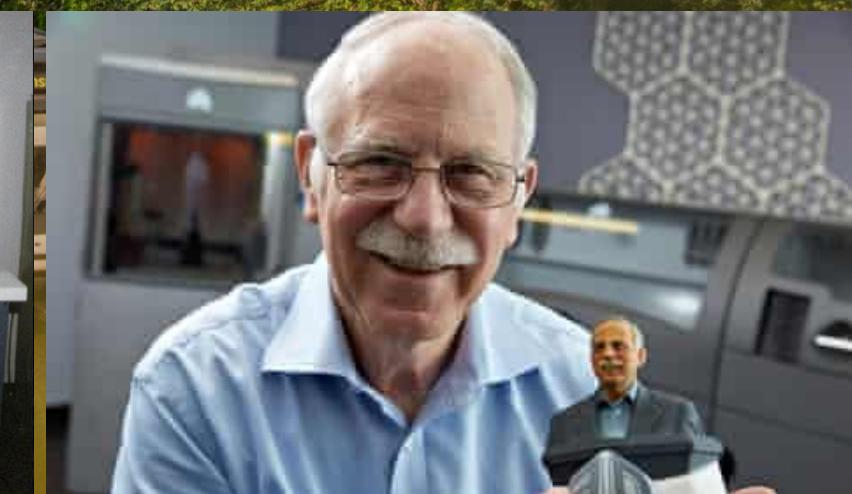


MBOARD.com





1983 – Chuck Hull came up with the idea of stereolithography. But the idea wasn't filed for patent until August of 1984. In July, same year, French researchers filed a patent application for a similar idea. However, this was turned down by the French General Electric Company (now Alcatel-Alsthom) and CILAS (The Laser Consortium).



# HVA ER ADDITIVE MANUFACTURING?

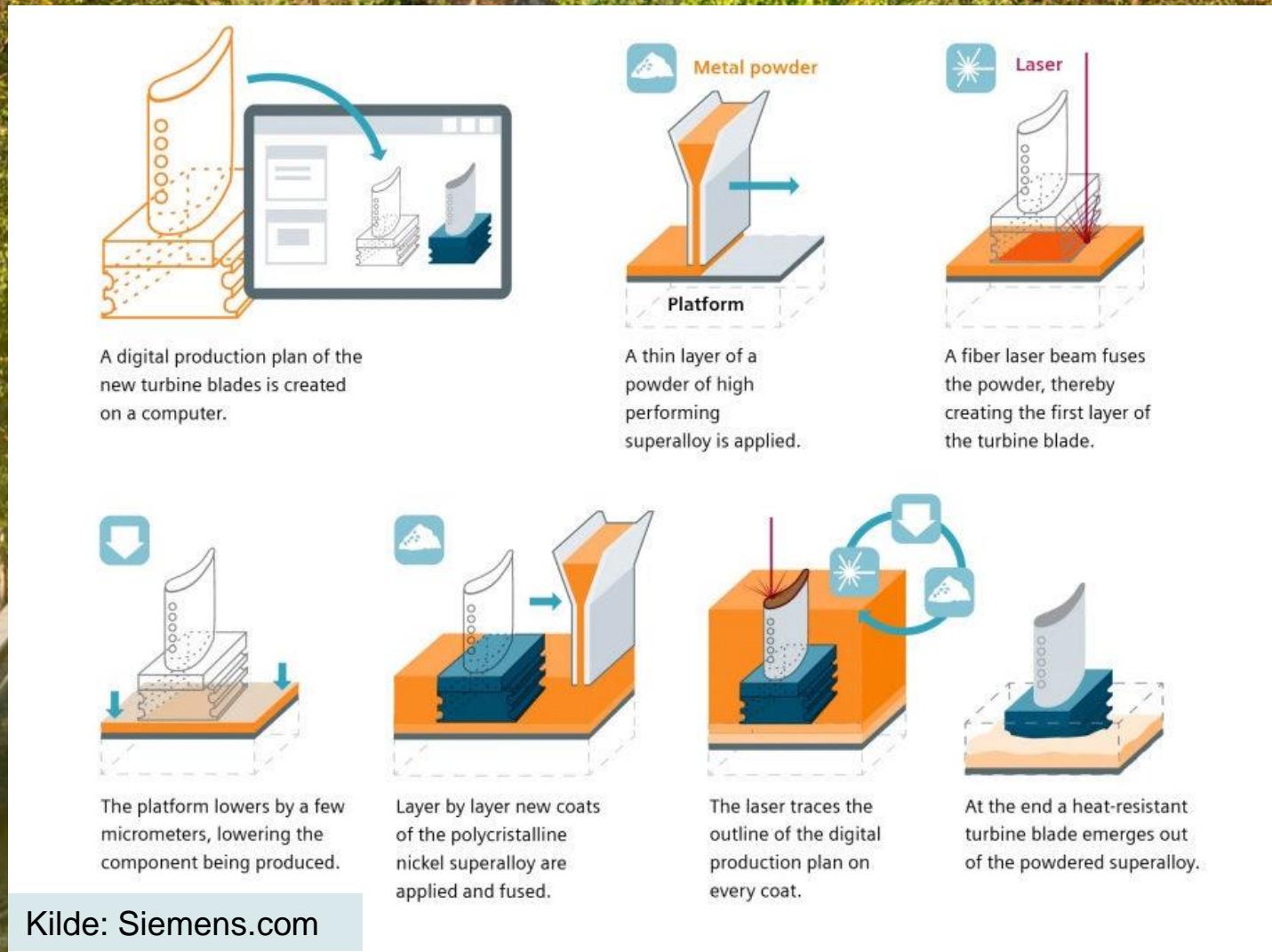
## Additive Manufacturing (AM)

En tilvirkningsprosess der en 3D-modell fra CAD, benyttes for å tilvirke en fysisk komponent, gjennom bygging av lager for lager.

Synonymer: 3D-printing, Layered manufacturing, Free form fabrication, Direct manufacturing, Rapid prototyping...



# AM PROSESSEN FRA IDE TIL PRODUKT



# FORDELER MED AM

## Design frihet

- Komplekse objekt
- Individuelt anpassede objekter

## Minimere materialbruken

- Optimal vekt og struktur
- Lav waste av materiale

## Økt funksjonalitet

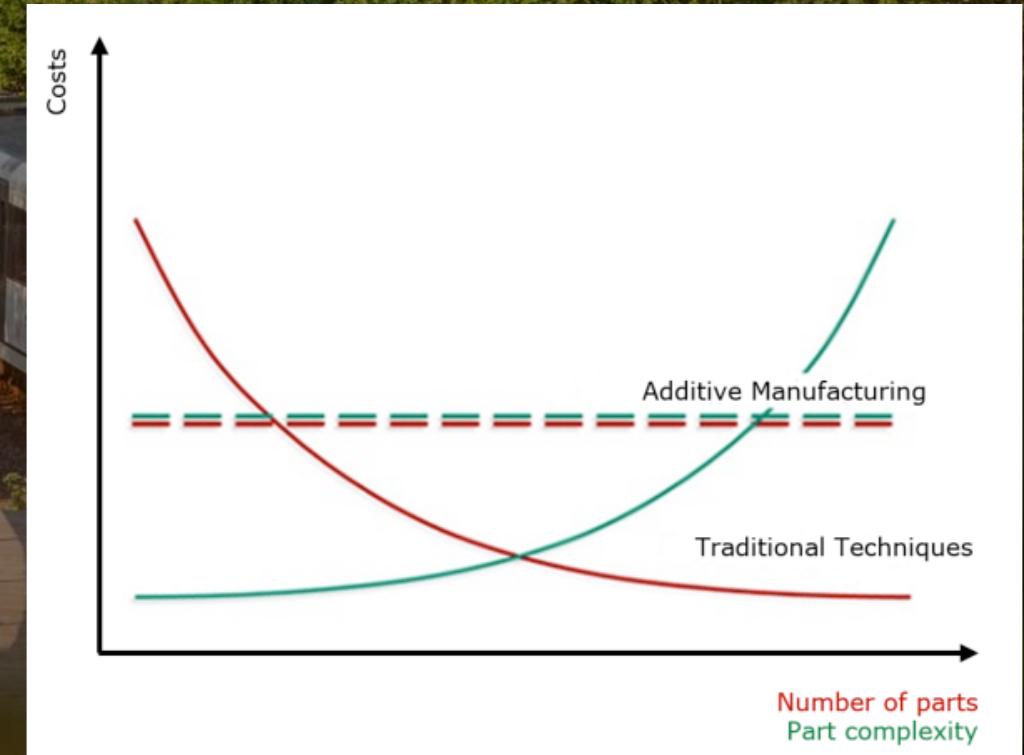
- Enkel montering pga ferre deler
- Økt produktsjonsverdi

## Tilvirkning on-demand

- Kundeanpassede produkter
- Korte serier

## Teste ideer uten risiko

- Ta frem prototyper uten spesialverktøy



MARTORELLI M., et. al. (2017) Flatness, circularity and cylindricity errors in 3D printed models associated to size and position on the working plane.

# UTMANINGER MED AM

Begrenset  
objektstørlek

- Begrenset størrelse på byggkammare

Langsom prosess

- AM er en langsom proses og er derfor ikke effektiv for store serier/massetilvirkning

Høy kostnad

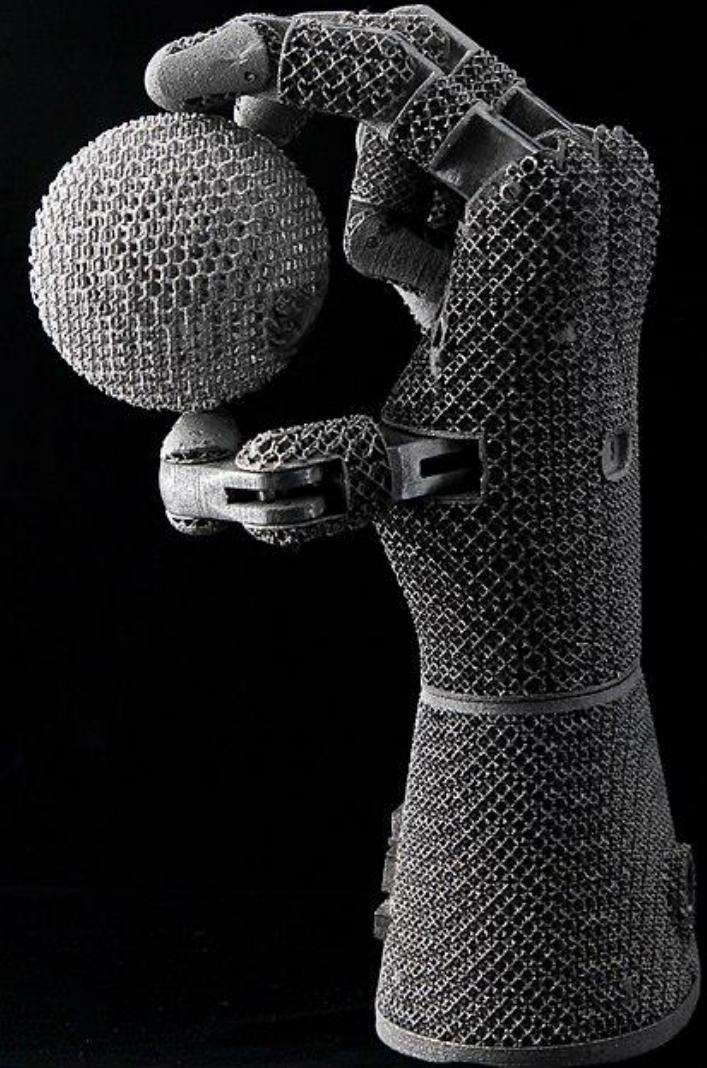
- Det finnes AM metoder og materialer med meget høy kostnad (superlegeringer etc).

Omkonstruksjon

- Eksisterende design kan ikke alltid brukes for AM.

Mangel på standarder

- Etablering av standarder er meget viktig!



Kilde: Oak Ridge National Laboratory

# APPLIKASJONER

## Medisinske implantat

Dette området er svært siden mange implantat er unike, og det blir dermed mer effektivt med 3D printing



Medisinske implantat  
Kilde: GE.com

## Fly- och romindustrien

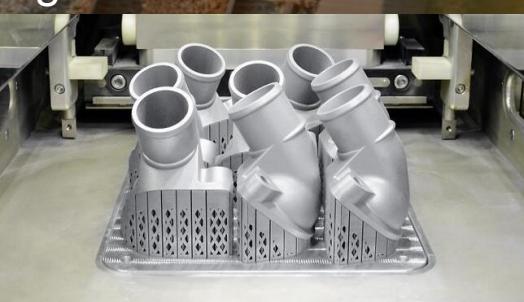
Her blir det mer effektivt med 3D-printede objekt i metall og plast for att spara tid, vikt, og kompleksitet



Prototyp tillverkning med AM  
Kilde: Fit technology

## Bilindustri

Her begynner de å se mulighetene med AM, også av samme anledning som flyg- och romindustri



Mercedes-Benz Trucks, reserveydelar  
Kilde: Trailer.se

## Moteindustrien

Dette området vokser og, då man kan skapa fine geometriske former relativt lett med AM

BMW i8 roadster

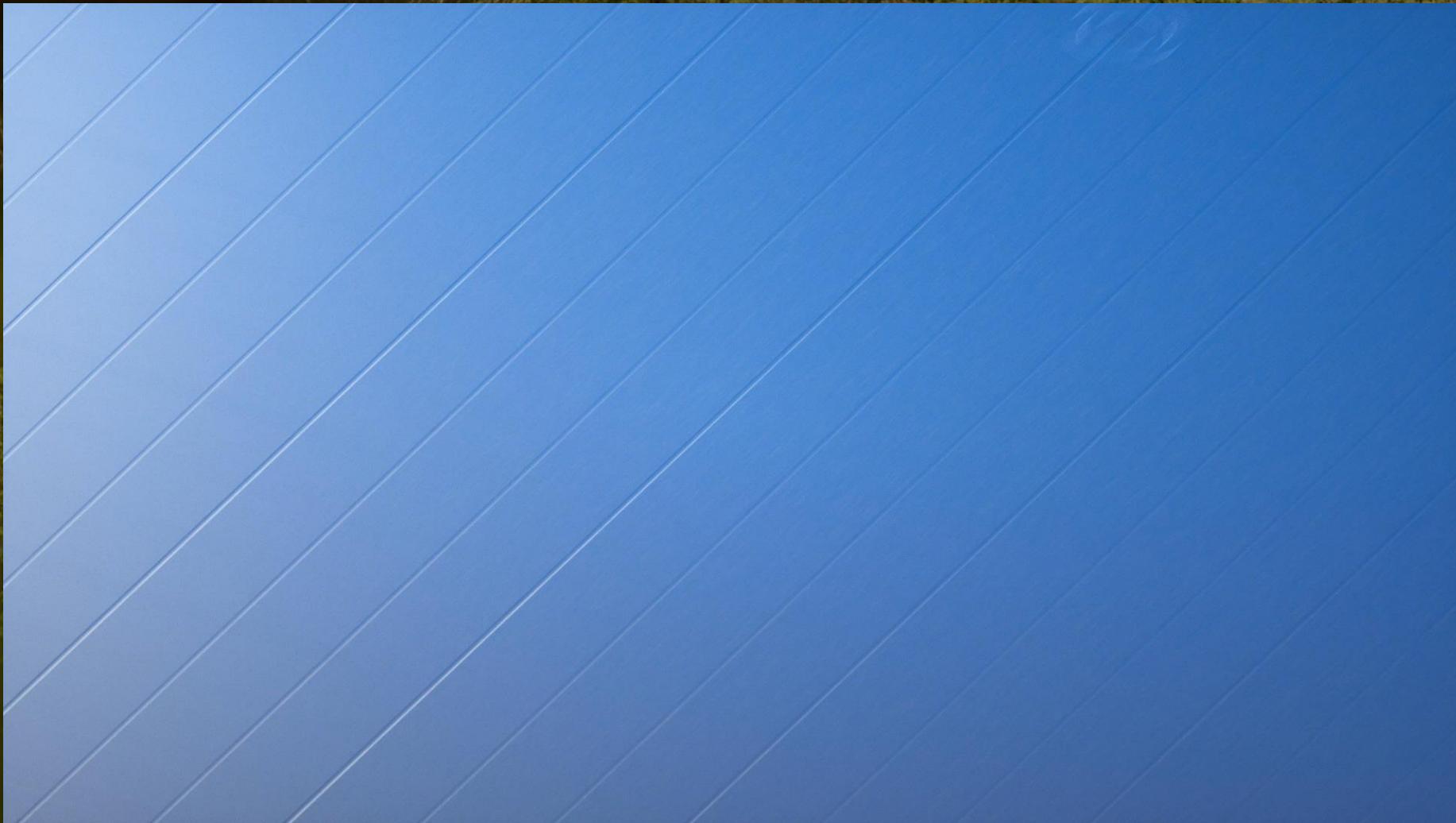
## Togindustrien?

Flere aktører har satt fokus på AM...



Smycketillverkning med AM  
Källa: latimes.com

# PULVERBEDDSMETODER



Courtesy: GE.com

What is additive manufacturing? | GE Additive  
<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>

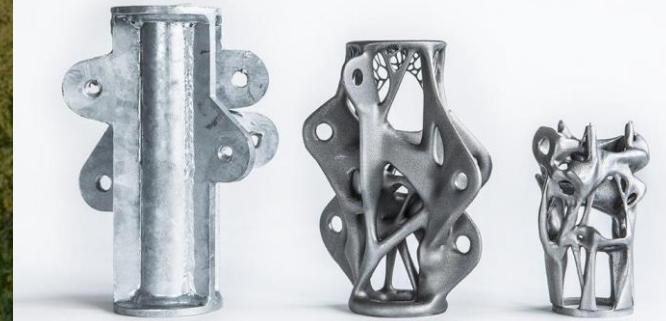
# MULIGHETER & BEGRENSINGER

## Muligheter:

- Muligheten att tilvirka komplekse former i metall
- Individuelt tilpassede objekt
- Optimal vekt og struktur, ikke noe sløsing med materiel
- Bra for lavvolumtilvirkning av dyra komponenter

## Begrensinger:

- Høy kostnad for maskin- og pulverinnkjøp
- Liten byggeareal
- Utviklingen av ett parametersett til vært material er nødvendig
- Anisotropi i ferdige deler
- Etterfølgende bearbeiding kreves f.eks. fjerning av bygg platen og støttestrukturer samt varmebehandlinger



Kilde: protocam.com



Kilde: pdinnovation.com



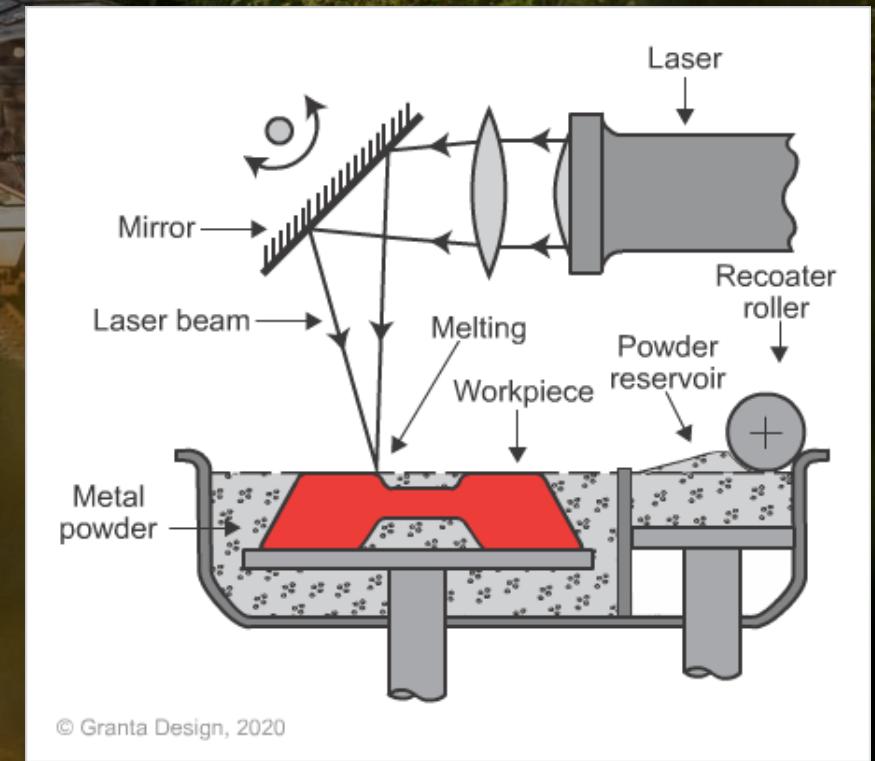
GE Aviation's LEAP fuel nozzle  
Kilde: GE.com

# LASER POWDER BED FUSION (L-PBF)

Selective Laser Melting (SLM) / Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

**Metode:** Komponenten bygges opp i lager gjennom att en laserstråle smelter pulver i henhold til en CAD-modell

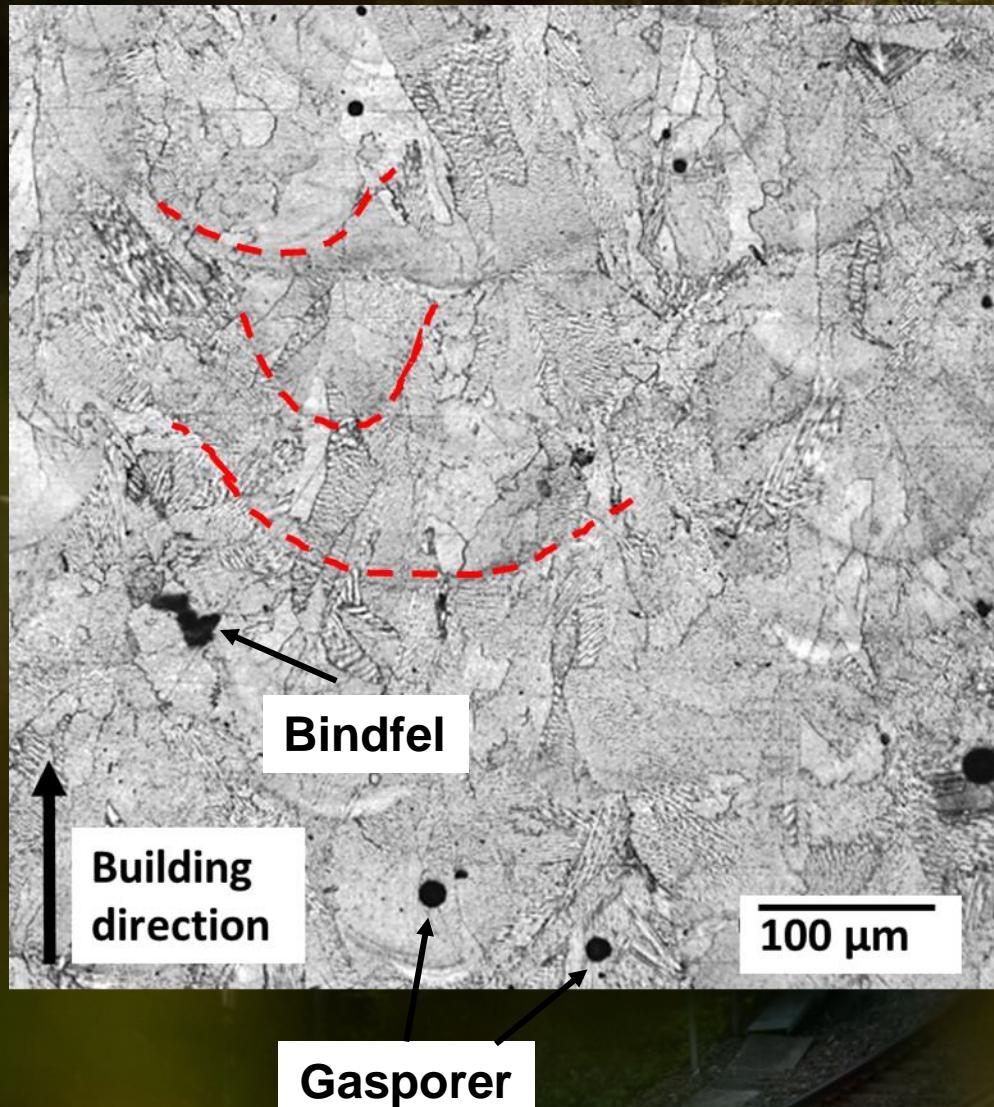
- Argon gas atmosfere
  - Passar bra for alle metallegeringer
  - En maskin – alle materialer
- 
- + Stor geometrisk frihet
  - + Kundeanpassede produkter
  - + Ikke noe sløsing med materiale
  - + Høg ytfinhet
  - Utviklingen av ett parameterset til vært materiale er nødvendig!
  - Restspenninger i ferdiga komponenter
  - Defekter: Gasporositet, Bindefeil mellom to lager og sprekker



© Granta Design, 2020

Kilde: Grantadesign.com

# DEFEKTER: BINDEFEL, GASPORER & SPREKKER



**Bindfel:** ett resultat av for lav lasereffekt

**Sprekker:** restspenninger som oppstår under smeltings- og stelingsprosess leder til sprekker i den ferdige detaljen

**Gasporer:** årsakas av pulverpartiklar med innesluttet argon gas fra pulver produksjonsprosessen

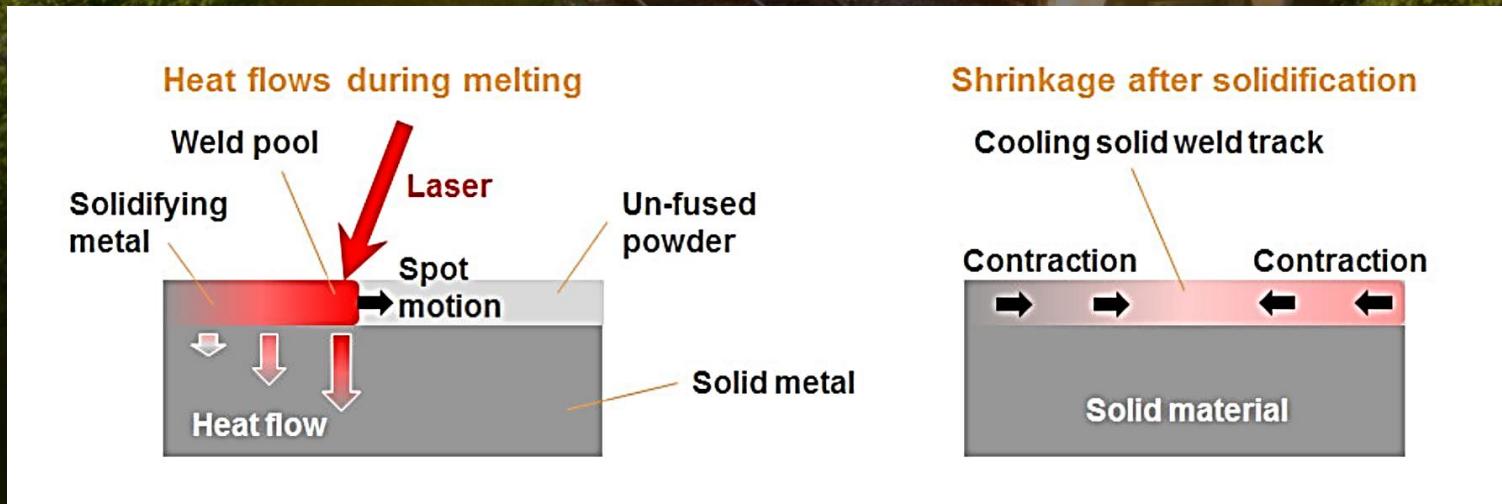
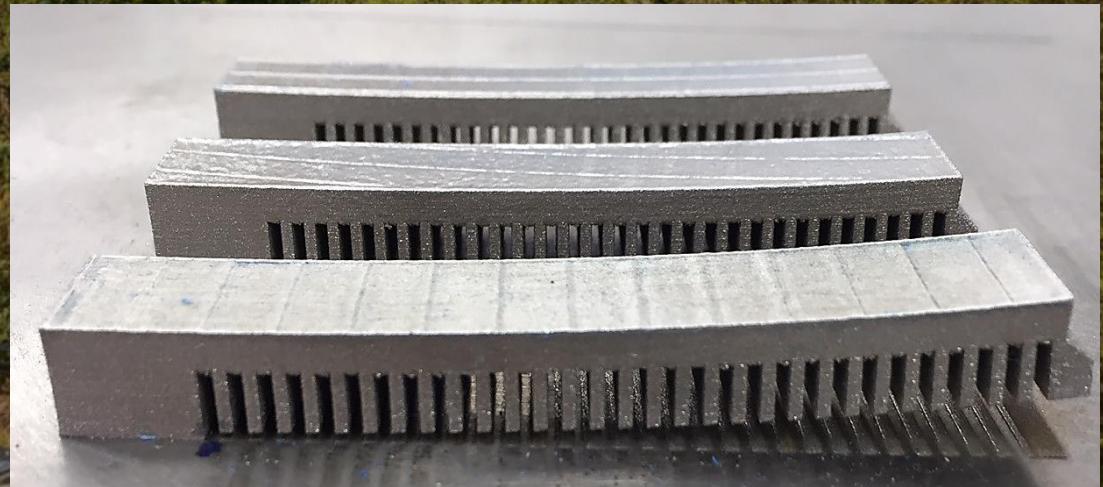


Pulverpartikkel med innesluttet argon gas fra pulver produksjonsprosessen

# DEFEKTER: RESTSPENNINGER

Restspenninger:

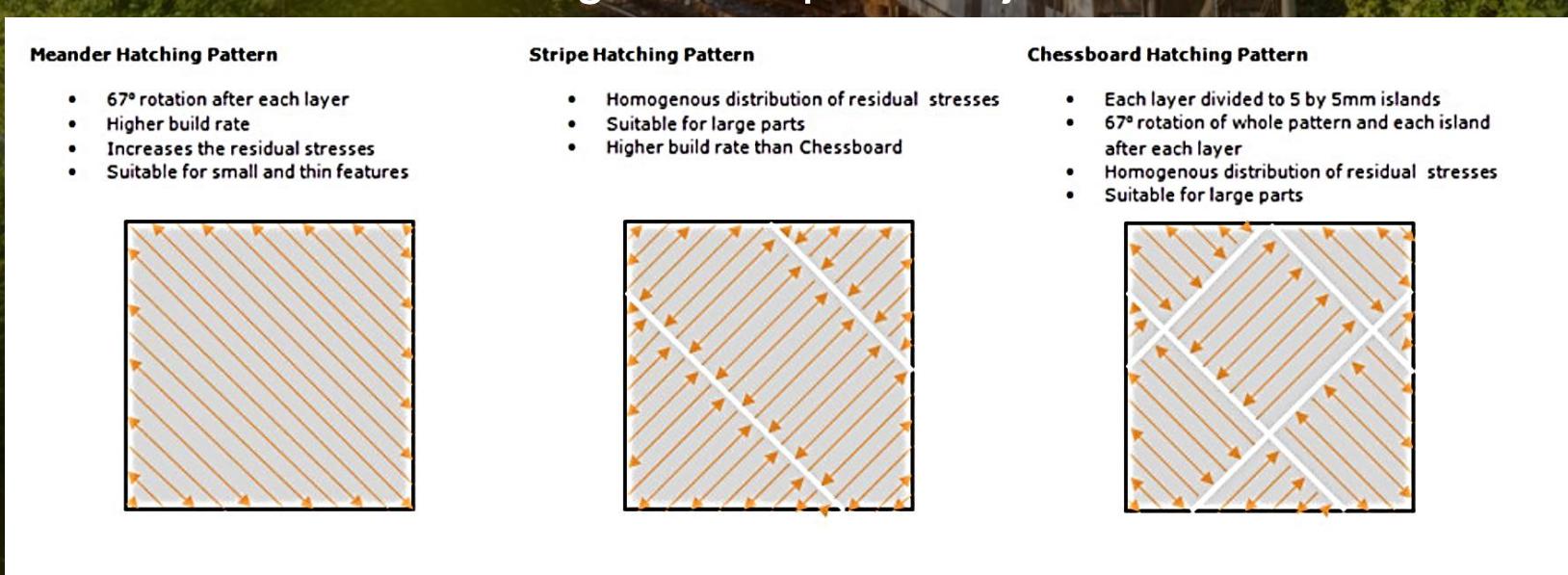
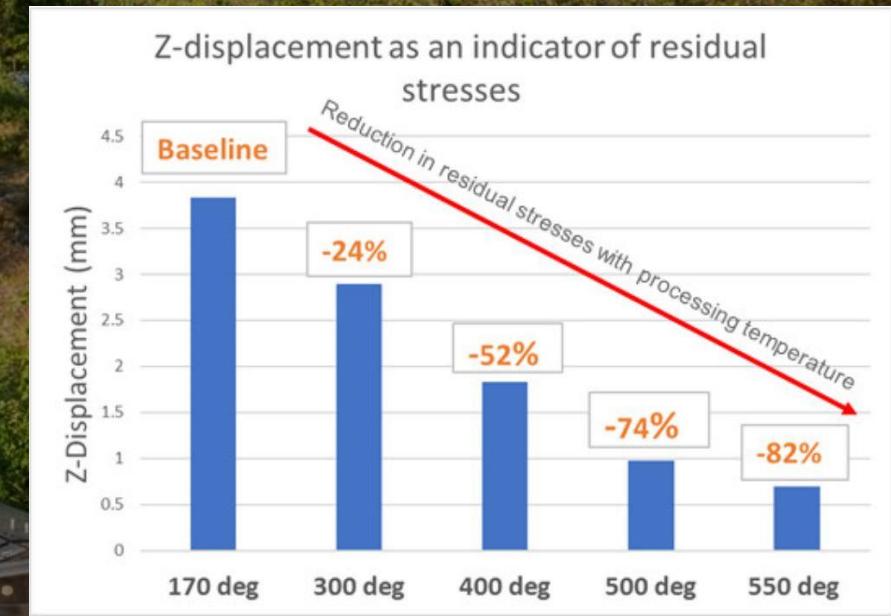
- Er spenninger som blir kvar i materialet etter kjøling
- Beror på det høye termiske forløpet under L-PBF prosessen
- De kan resultere i deformasjoner, sprekk og lavere utmattelses bestandighet.



# DEFEKTER: RESTSPENNINGER

Kan minimeres gjennom att:

- Velge en skannings strategi med "små ruter"
- Bygga deler på en varmere byggplate
- Kan minskes med varmebehandlinger etter produksjonen

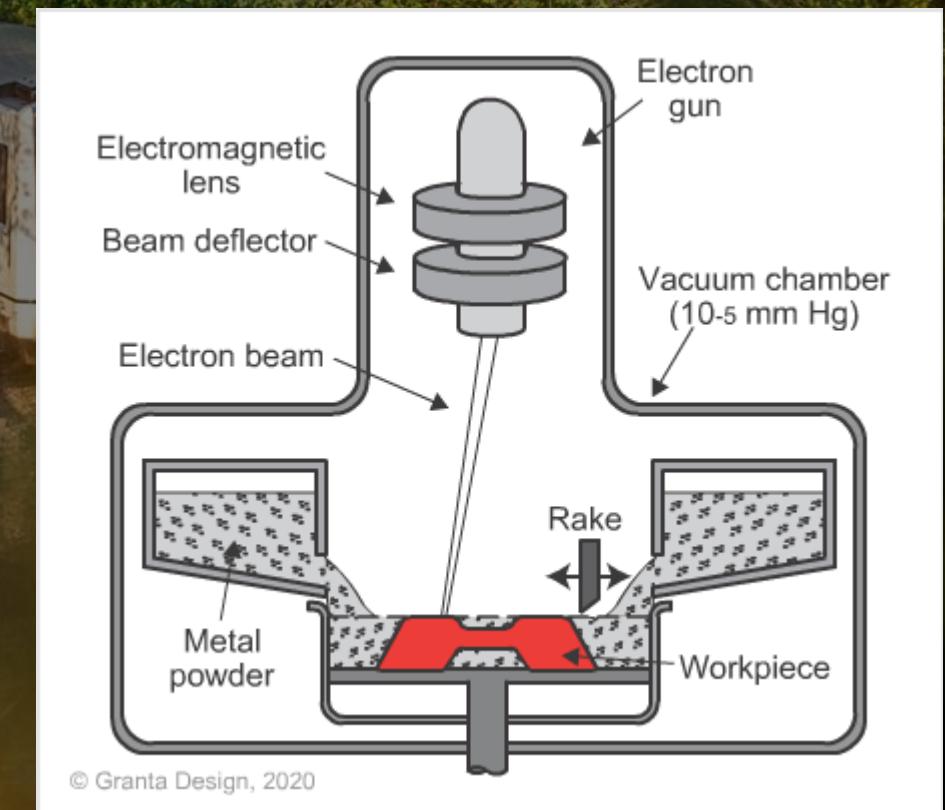


# ELECTRON BEAM POWDER BED FUSION (EB-PBF)

## Electron Beam Melting (EBM)

**Metod:** Komponenten bygges opp i lager gjennom att en elektronstråle smelter pulver i henhold til en CAD-modell

- Prosessen skjer i vakuum
  - Prosess temperaturen er 700 – 1000 °C
  - Passer bra for reaktive material, feks. titan
- 
- + Kjappere enn L-PBF
  - + Ikke noen gasporer eller restspenninger
  - + Stapling av deler mulig
  - En maskin avsettes til ett materiale!
  - Sintret pulver ikke lett att ta bort
  - Krever etterfølgende bearbeiding
  - Grøvre yta enn L-PBF



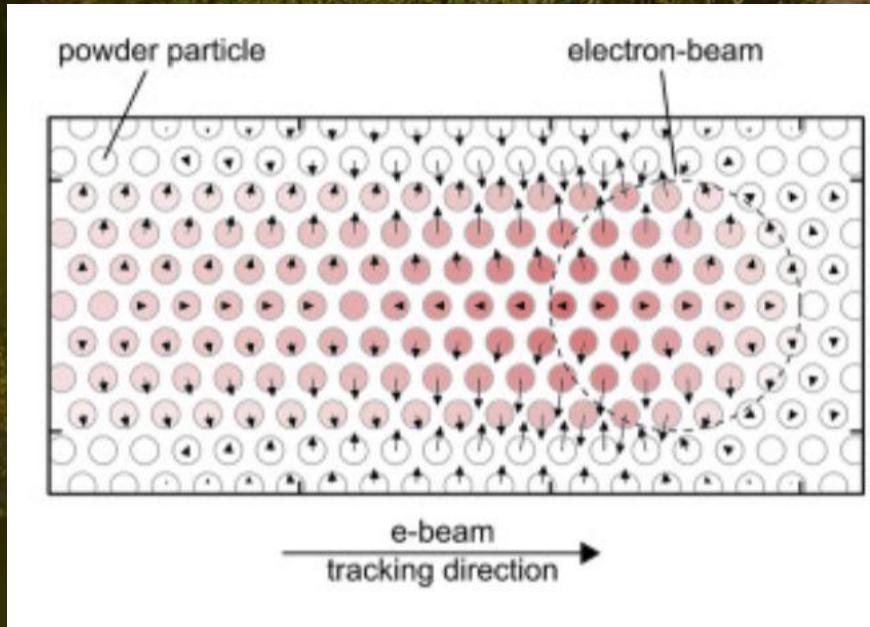
© Granta Design, 2020

Källa: Grantadesign.com

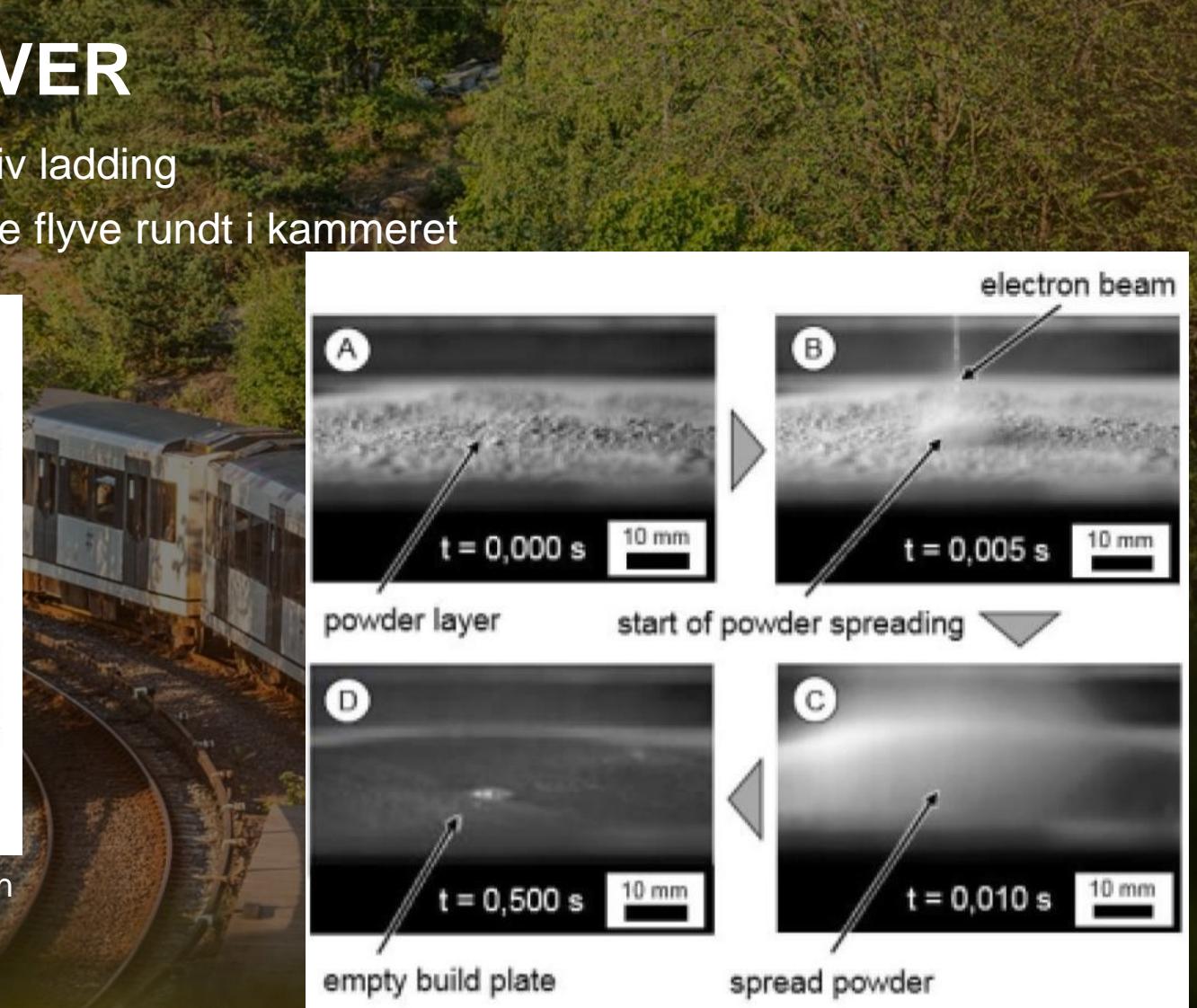
# ELEKTRONSTRÅLE OG PULVER

Elektroner ladder opp pulverpartiklarna med negativ ladding

Partiklarna repellerer da hverandre og kan begynne flyve rundt i kammeret



Laddningsfordeling og elektrostatisk kraft i pulverbedden



Løsning:

Pulverpartiklene trenger å bindes sammen mekanisk innen skarp stråle benyttes

Diffus (stor strålediameter) stråle med høy effekt sveper kjapt over pulveret flere ganger, temperaturen stiger langsomt og pulveret sintres sammen.

Prosessen er altså (nesten) alltid varm. Temperatur velges beroende på materiale som benyttes.

# EXEMPEL PÅ MATERIALER

## Aluminiumlegering

- AISi10Mg

## Nickellegering

- Hastelloy X
- IN625
- IN718

## Titan

- Ti6Al4V

## Rustfritt stål

- 316L

## Verktøysstål

- H13

## Kobolt krom

## Koppar

.....



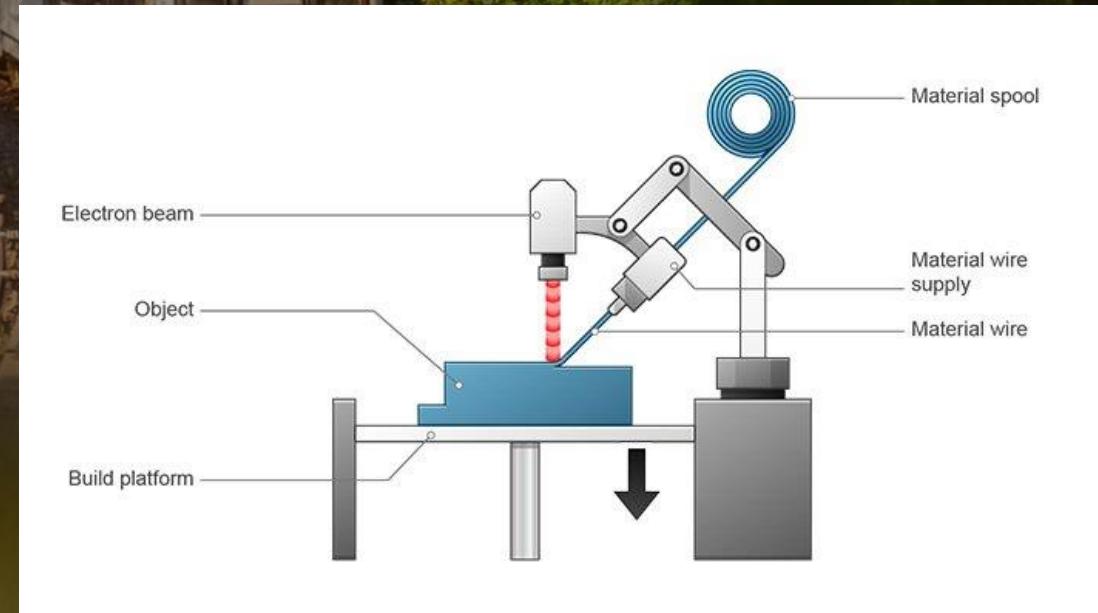
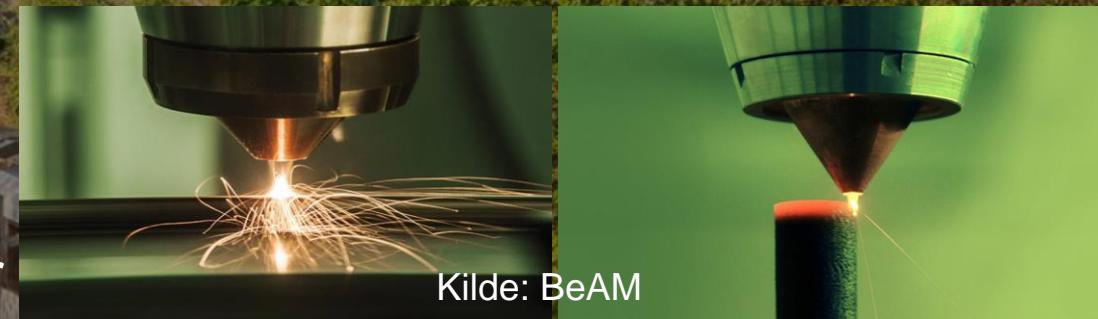
Lettvekt titandeler til Mountain bike  
Kilde: Renishaw.com

# DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

Laser Metal Deposition (LMD)

**Metod:** Metallpulver eller tråd mates fra en nozzle og smelter m.h.a. en laser- eller elektronstråle.

- + Kjappere enn pulverbett
- + Kan benyttes for ytbelegninger og reparasjoner
- + Kan bygge store detaljer
- + Kan kombinere ulike materialer
- + Mange tilgjengelige materialer
- + Bra for hybridetilvirkning
- Lav nøyaktighet
- Grøvre yte enn pulverbettsmetoder



Kilde: Dassault Systèmes

# DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)

Kombinere tilsatsmateriale og energikilder for att få ulike prosesser

Tilsatsmateriale

Pulver

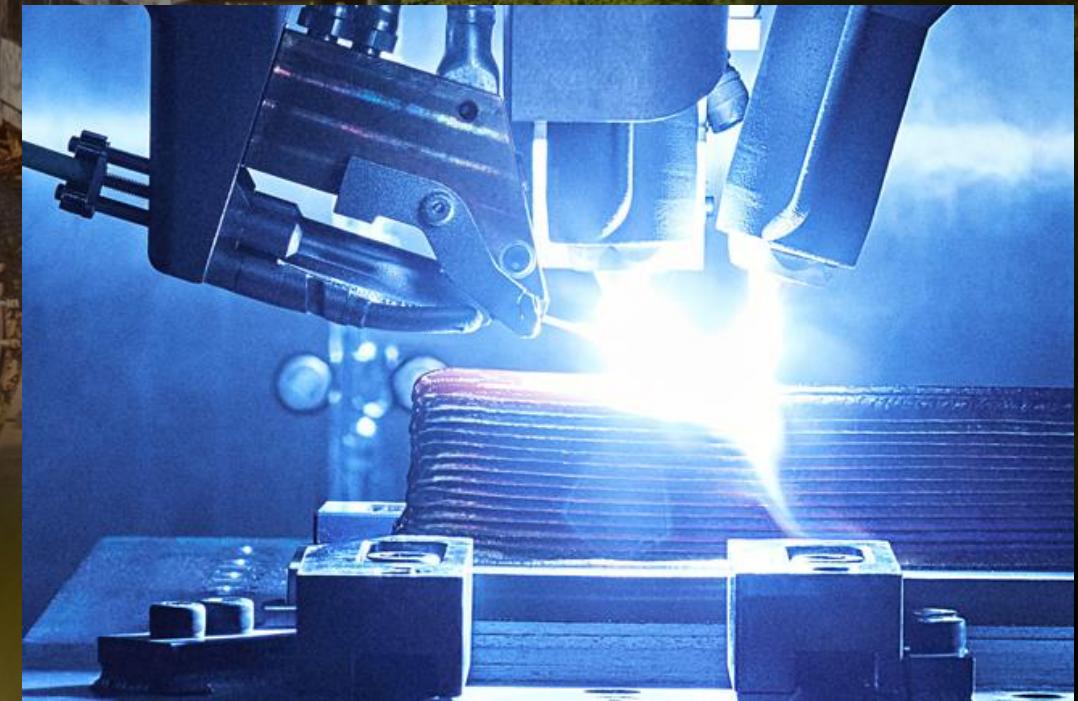
Tråd

Energikilder

Ljusbåge

Elektronstråle

Laser



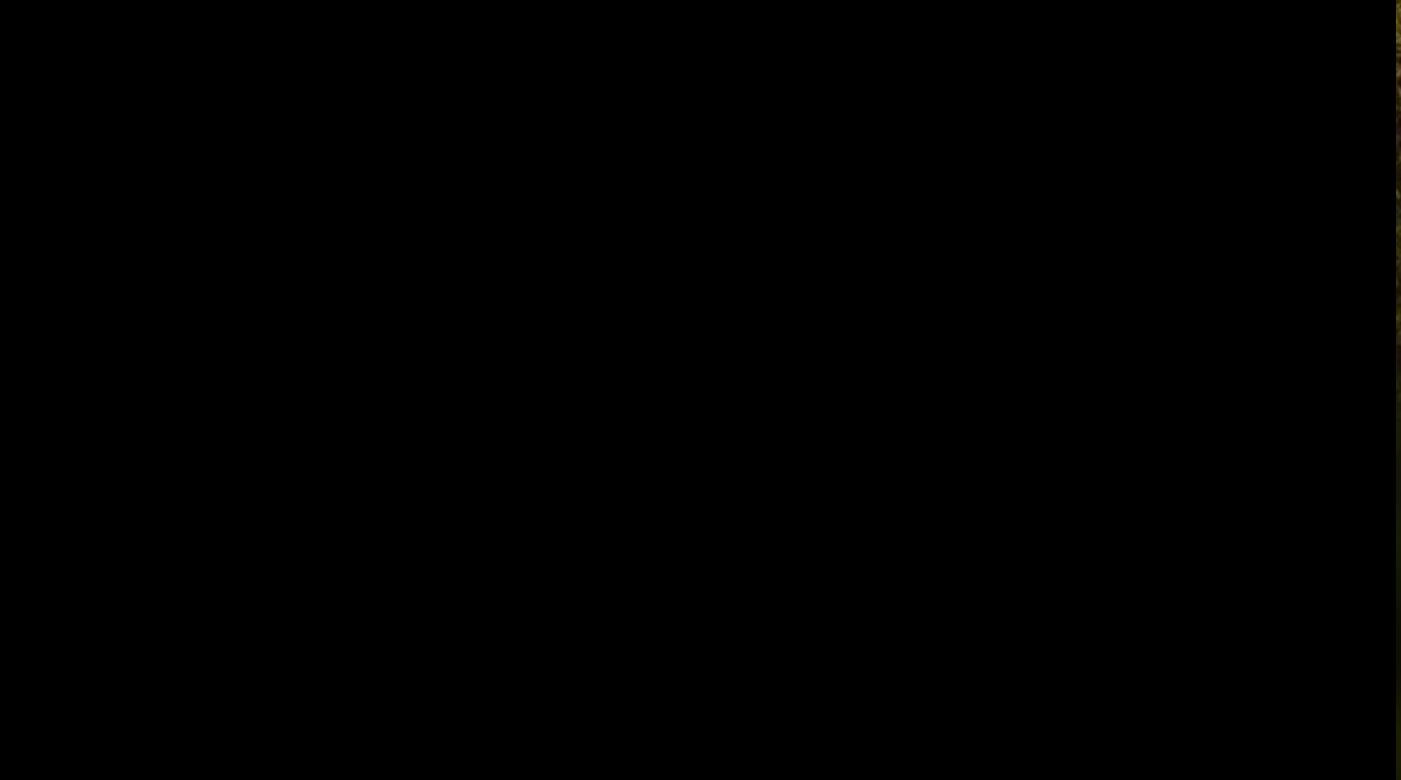
Kilde: Digital Alloys

# DIRECTED ENERGY DEPOSITION – POWDER (DED-p)

LMD-powder

**Metod: Pulver + Laser**

- + Selvregulerende prosess
- + Lett att komme i gang
- + Nøkkelferdige system
- + Ubegrenset størrelse
- + God geometrisk nøyaktighet
  
- Krever ofte HIP\* og bearbeiding
- Dyrt med pulver
  - Innkjøp
  - Sikkerhet
  - Effektivitet



Kilde: Kjell Hurtig, Högskolan Väst

# DIRECTED ENERGY DEPOSITION – WIRE (DED-w)

Metod: Tråd + Laser

- + Høy materialkvalitet
- + Ubegrenset størrelse
- + Automatisering med reguleringsssystem
  
- Relativt dyrt utstyr
- Vanskelig uten reguleringsssystem



Kilde: Kjell Hurtig, Högskolan Väst

# ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING (EBAM)

Metod: Tråd + Elektronstråle

- + Høy bygghastighet
- + Høy materialkvalitet
- + Nøkkelferdige system
  
- Vakuumkammare
- Dyr utrustning



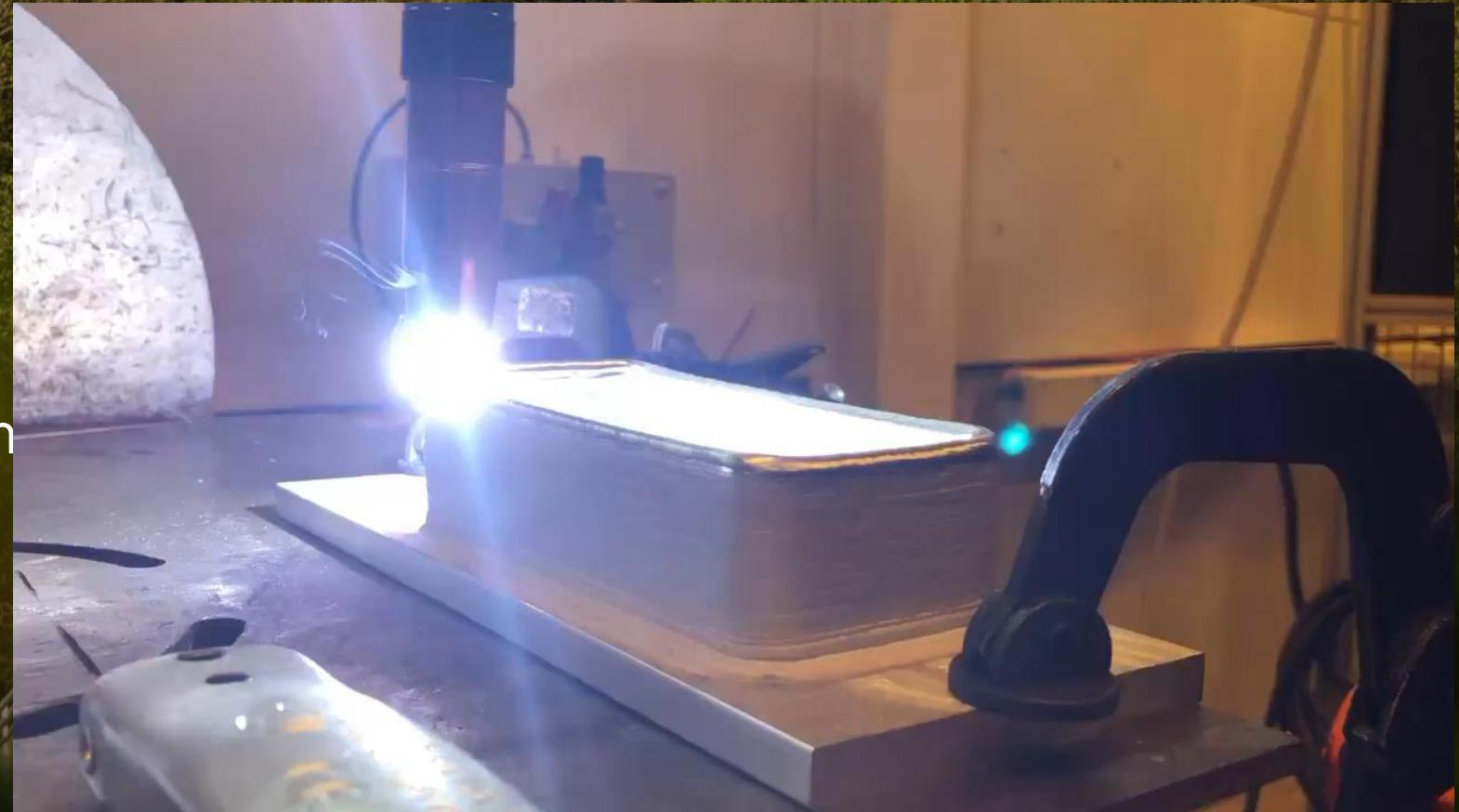
clideo.com

# WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)

## Metod: Tråd + Ljusbåge

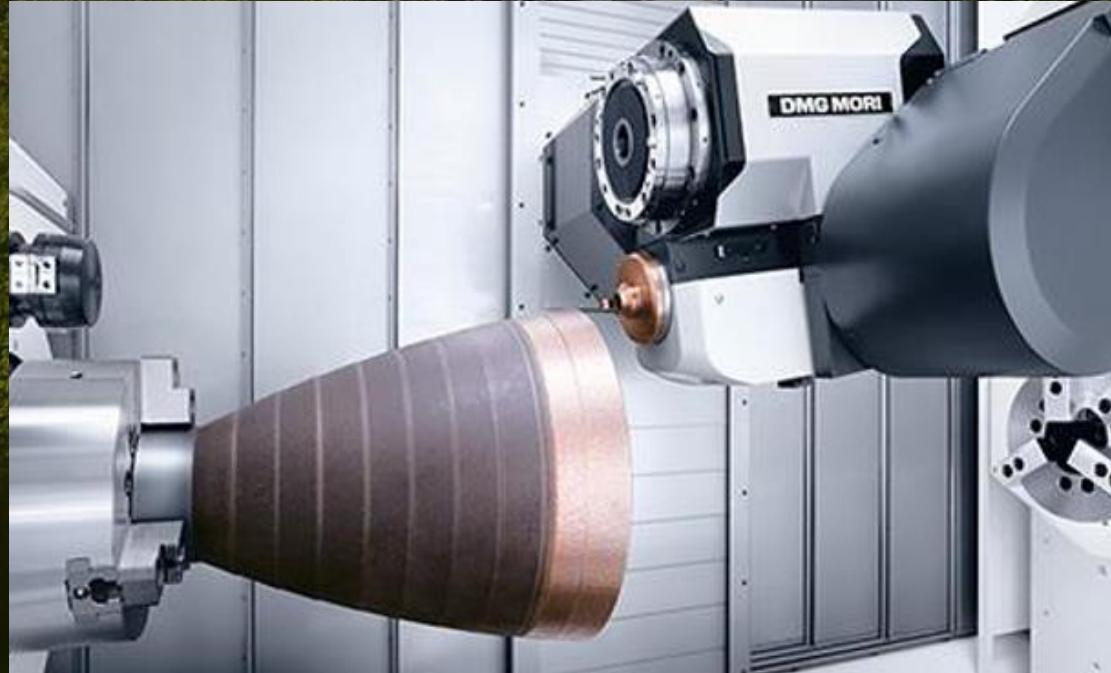
- + Billigst utstyr
- + Høy bygghastighet
- + Lempelig for høye byggen
- + Bevegelsesfrihet i robotarm
- + Bra for reparasjonsprosessen

- Restspenninger i materialet pga høy prosess temperatur
- Dårlig materialkvalitet ved komplekse geometrier
- Grøvre yta => bearbeiding trengs



Kilde: Kjell Hurtig, Högskolan Väst

# HYBRID TILLVERKNING MED DED-METODEN

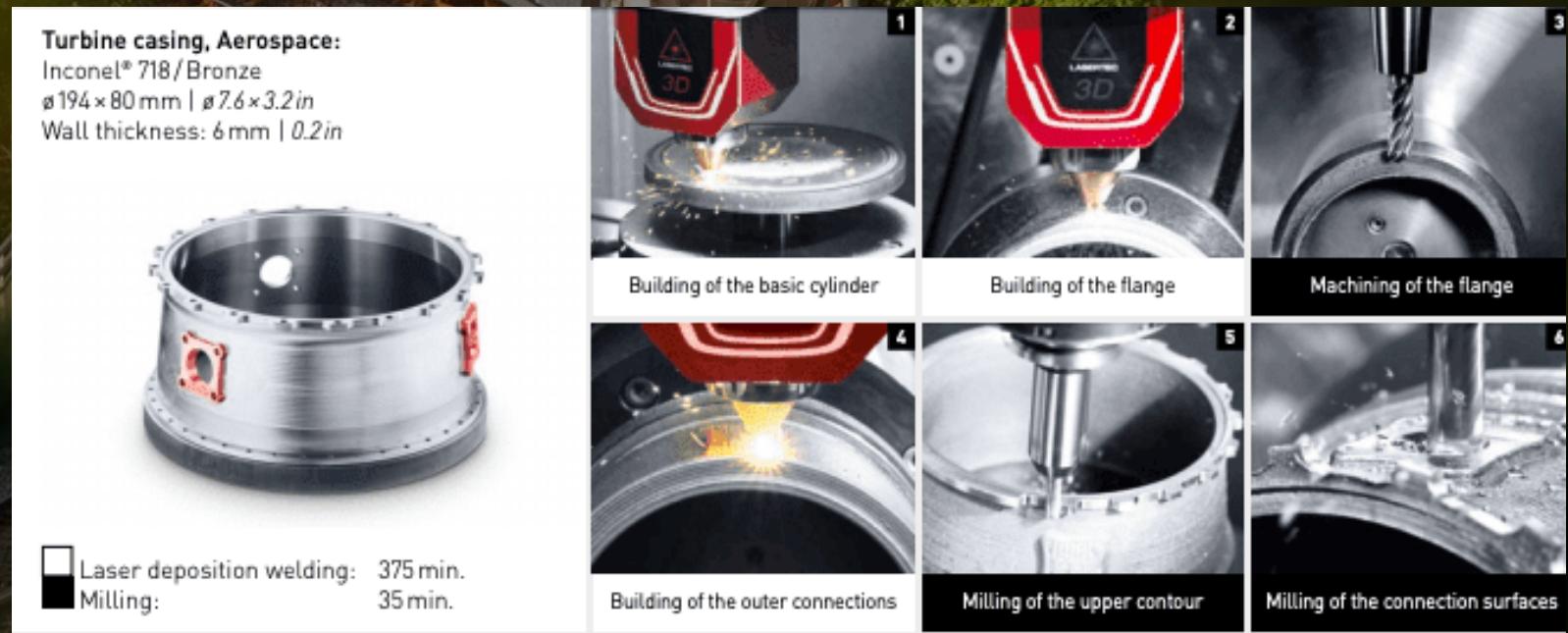


Kilde: [dmgmori.com](http://dmgmori.com)

# HYBRID TILLVERKNING

**Metode:** Teknikken kombinerer subtraktiv og additiv tillverkning for att kunna tillvirke en komponent.

- + Kan benyttes for ytbelegninger og reparasjoner
- + Kan kombinere ulike materialer
- + Kjapp prosess
- + Kan bygge store detaljer
- Grøvre yta enn pulverbeddmetoder
- Semre nøyaktighet



# NÅSITUASJONEN & FREMTIDEN

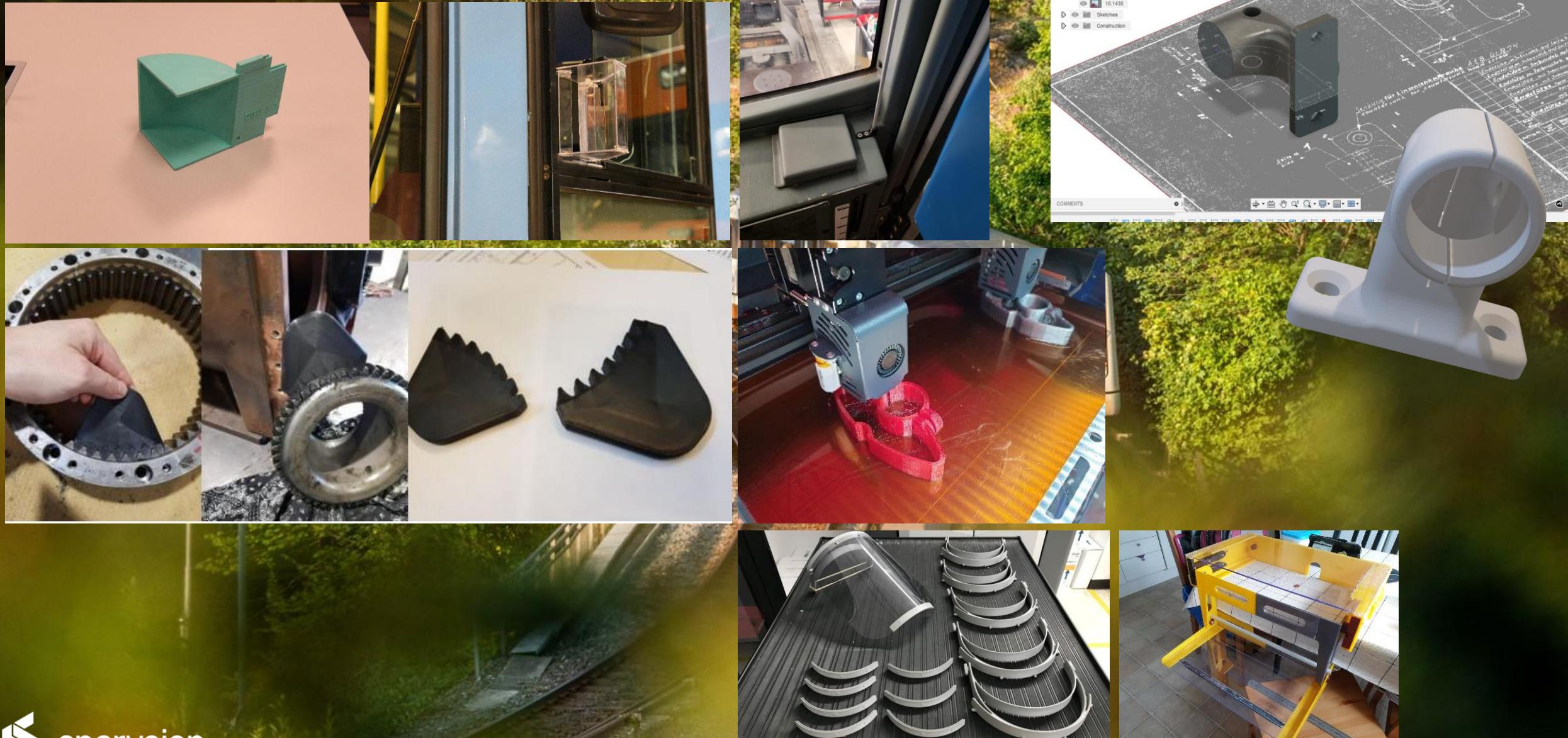
## Nåsituasjonen:

- Intensiv forskning pågår
- Teknikken utvikles kontinuerlig
- Defekter fra prosessen er vanlige
- Kun ett fåtall standarder etablerte
- Varierende kvalitet mellom tilvirkede detaljer
- Økonomiske faktorer

## Fremtiden:

- Etablering av standarder er viktig
- Utvikling av hårdvare, til eksempel sensorer og høyhastighet kamera som benyttes under prosessen
- En komplettering til konvensjonelle metoder

# EKSEMPEL FRA SPORVEIEN



## LEVERANDØRAVTALE

Krav kring AM til leverandør. Kvalitet, standard etc.



2

## 3D-modell

Vi begynner å stille krav kring BIM-objekter og 3D-modeller.

## GCODE

Det er mer enn selve komponenten som trengs. For eksempel GCODE med korrekte detaljer kring infill, temperatur, hastighet, filament etc.

3

```
24 ; Set the extruder to the requested print temperature
25 ;M104 S195
26 M83 ;relative extrusion mode
27 G1 F1800 E-7
28 ;LAYER_COUNT:57
29 ;LAYER:0
30 M107
31 G0 F3600 X8.164 Y-1.352 Z0.3
32 ;TYPE:SKIRT
33 G1 F1800 E7
34 G1 F600 X8.24 Y4.088 E0.33929
35 G1 X8.623 Y9.48 E0.33711
36 G1 X9.194 Y14.111 E0.29099
37 G1 X9.226 Y14.62 E0.03181
38 G1 X9.24 Y19.98 E0.33427
39 G1 X9.202 Y20.561 E0.03631
40 G1 X9.084 Y21.132 E0.03636
41 G1 X8.889 Y21.681 E0.03633
42 G1 X8.621 Y22.199 E0.03637
43 G1 X8.285 Y22.675 E0.03634
44 G1 X7.887 Y23.101 E0.03636
45 G1 X7.435 Y23.468 E0.03631
46 G1 X6.936 Y23.769 E0.03634
47 G1 X6.401 Y24 E0.03634
```

Supply Contract

A contract between \_\_\_\_\_  
and \_\_\_\_\_  
for \_\_\_\_\_

Contents

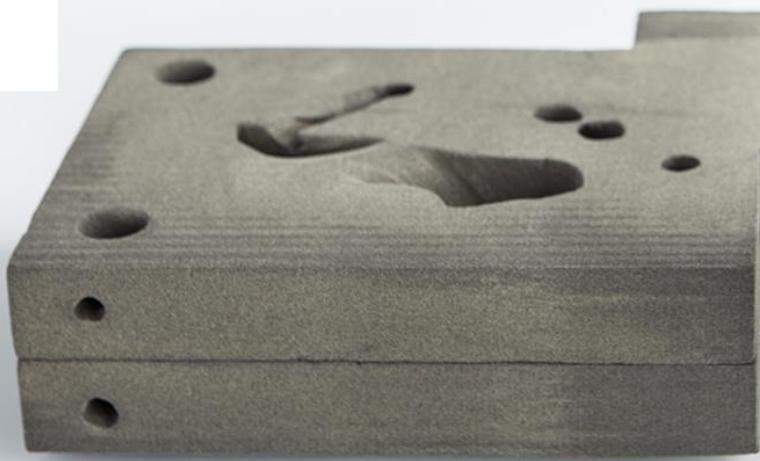
Part C1: Agreements and contract data	1
Form of Offer and Acceptance	1
Contract Data provided by the Purchaser	4
Contract Data provided by the Supplier	9
Part C2: Pricing Data	11
Part C3: Scope of Work	14

Conditions of Contract (available separately)

Notes about this contract are printed in boxes like this one. They are not part of the contract.

© This contract contains copyright material from the New Engineering Contract system. The copyright material has been reproduced with permission of the Institution of Civil Engineers (London), and may not be reproduced other than in this document without the permission of the copyright holder's agent. Publisher: Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD. Telephone +44 20 7987 6999, Fax +44 20 7538 4101

Based on the  
NEC Engineering and Construction Contract 2nd Edition (November 1995),  
NEC Professional Services Contract 2nd Edition June 1998, and  
NEC Engineering and Construction Short Contract, 1st Edition July 1999



 sporveien



A light rail train, numbered 3377, is shown from a high-angle perspective, curving along a track through a lush green landscape. The train is white with dark windows and doors. The text "Spørsmål?" is overlaid in the center of the image, with a blue diagonal striped pattern.  
**Spørsmål?**