

## 1 3D-print technieken

Dit hoofdstuk behandelt verschillende 3D-print technieken en behandelt welke het beste bij ATAG en deze casus past. Het bevat de belangrijkste begrippen, benodigde informatie en technieken die duidelijk moeten zijn voor het onderzoek. De 3D-print technieken zijn vooral bedoeld voor metaal. De onderstaande figuur weergeeft de bekendste kenmerken van de 3D-print technieken.

	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	Vat photopoly- merization	Sheet lamination	Powder bed fusion	Directed energy deposition
Polymers and polymer blends	x	x	x	x	x	x	
Composites		x	x	x		x	
Metals		x	x		x	x	x
Graded/hybrid metals					x		x
Ceramics			x	x		x	
Investment casting patterns		x	x	x		x	
Sand molds and cores	x		x			x	
Paper					x		

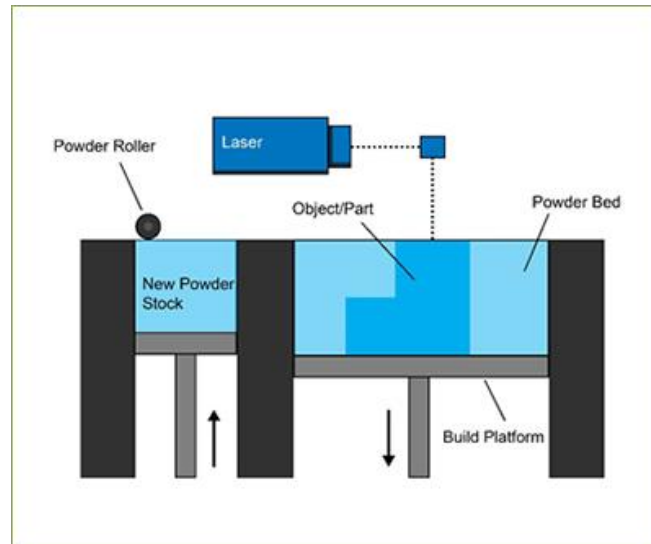
Source: Wohlers, Terry. "Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry." Wohlers Associates, Inc. 2012.

Figuur 1 3D-printen technieken

Hiernaast is ook een keuze gemaakt voor het metaal. De gekozen metaalsoort is roestvrijstaal (RVS) 316L. De verschillende soorten RVS zijn vergeleken in de bijlagen (zie: 7.1.5 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). RVS 316L is de op-één-na meest gebruikte RVS soort en staat bekend om zijn zeer gunstige weerstand tegen corrosie en uitstekende weerstand tegen hoge temperaturen. Dit zijn de doorslaggevende factoren bij de keuze voor RVS 316L.

## 1.1 Laser Powder Bed Fusion

Laser powder bed fusion (LBPF) ook wel Laser powder bed fusion genoemd is een proces waarbij dunne lagen van poeder uitgespreid worden op een platform. Het poeder wordt per laag samengesmolten door een laserstraal. De volgende lagen poeders worden over de voorgaande lagen gerold en samengesmolten tot het uiteindelijke 3D-product is gebouwd. Het overtollige poeder wordt vervolgens opgezogen en kan opnieuw gebruikt worden. Figuur 1 is een visuele weergave van dit proces (Kashania, Tuan, Gabriele, & Et al, 2018).



Figuur 2 LBPF proces (What is powder bed fusion, sd)

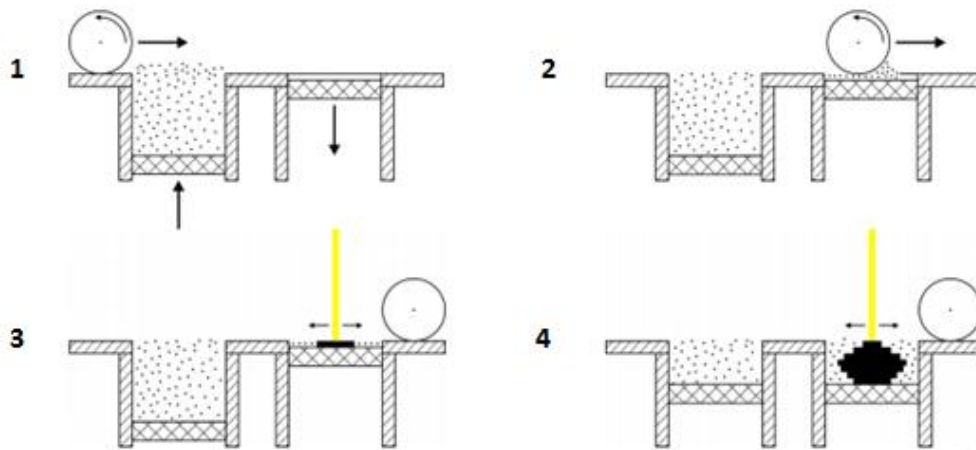
De algemene processtappen van powder bed fusion zijn te zien in figuur 2. Powder bed fusion heeft meerdere methoden. Deze methoden zijn:

### **LBPF voor polymeren:**

Selective Laser Sintering (SLS) maakt het mogelijk om functionele objecten te printen zonder gebruik te maken van een bindmiddel of assemblage te moeten doorlopen. (P., 2019) SLS is een techniek die voornamelijk gebruikt wordt voor polymeren.

### **LBPF voor metalen:**

Selective Laser Melting (SLM) is vergelijkbaar met SLS omdat een laser wordt gebruikt om warmte te leveren (daarom valt het onder LBPF), maar de laser smelt het poeder volledig in plaats van het te sinteren. (What is powder bed fusion, sd)



Figuur 3 LBPf process stappen (P., 2019)

### Direct Metal Laser Sintering (DMLS):

DMLS is een handelsmerk van EOS GmbH. Het is vergelijkbaar met SLM. Ondanks het gebruik van de term 'sinteren' wordt het volledig smelten bereikt. Daarnaast gebruikt SLM metaalpoeders met één smeltemperatuur en smelt de deeltjes volledig, terwijl in DMLS het poeder is samengesteld uit materialen met variabele smeltpunten die op moleculair niveau samensmelten bij hoge temperaturen (3dhubs.com, 2020).

Het productieproces voor SLM en DMLS is vrijwel hetzelfde. De stappen zijn:

- I. De bouwkamer wordt eerst gevuld met inert gas om de oxidatie van het metaalpoeder te minimaliseren en wordt vervolgens verwarmd tot de optimale bouwtemperatuur.
- II. Een dunne laag metaalpoeder wordt over het bouwplatform verspreid en een laser scant de doorsnede van het onderdeel, waarbij de metaaldeeltjes worden gesmolten (of samengesmolten) en de volgende laag wordt gecreëerd. Het gehele gebied van het model wordt gescand, zodat het onderdeel massief wordt opgebouwd.
- III. Wanneer het scanproces voltooid is, beweegt het gebouwde platform met één laagdikte naar beneden en verspreidt de recoater nog een dunne laag metaalpoeder. Het proces wordt herhaald totdat het hele onderdeel is voltooid.

Als het proces klaar is, zijn de onderdelen volledig bedekt in het metaalpoeder. In tegenstelling tot het fusionproces van SLS worden de onderdelen door middel van draagconstructies aan het bouwplatform bevestigd. Deze support structuren worden gebouwd met hetzelfde materiaal als het onderdeel. Vanwege de hoge temperaturen die metaal bereikt, heeft het iets vast nodig om op te staan, alleen de poeder laag (die bij SLS wel voldoet), is niet genoeg voor het 3D-printen van metaal. Daarnaast zorgen deze support structuren ervoor dat bij het afkoelen van het product er minder sprake is van kromtrekking en vervorming. (3dhubs.com, 2020) In figuur 3 valt een onderdeel dat geprint is met deze support te zien.



Figuur 4 Onderdeel met support structuren (3dhubs.com, 2020)

Wanneer de bak afkoelt, wordt het overtollige poeder handmatig verwijderd. Vervolgens worden de onderdelen van de constructieplaat losgemaakt en zijn ze klaar voor gebruik of verdere nabewerking.

#### **LBPF voordelen**

De belangrijkste voordelen van LBPF zijn, de fijne resolutie en de hoge kwaliteit. Deze voordelen maken LBPF geschikt voor het printen van complexe structuren. LBPF wordt veel gebruikt in lucht- en ruimtevaart, elektronica, maar ook voor het nabootsen van weefselstructuren in de zorg. LBPF wordt voornamelijk gebruikt voor complexe, waardevolle ontwerpen. Complexe onderdelen met binnenkamers kunnen gemaakt worden met LBPF, zolang het poeder nog via een kleine uitgang verwijderd kan worden. (Lee, 2017). Daarnaast is het metaalpoeder in SLM en DMLS zeer goed recyclebaar. Na elke print wordt het ongebruikte poeder opgevangen, gezeefd en vervolgens aangevuld met nieuw poeder tot de hoeveelheid die nodig is voor het volgende product.

LBPF is duur in aanschaf. LBPF is een langzaam proces omdat er steeds een nieuwe laag poeder over het product heen uitgespreid moet worden. Als dit proces gebruikt wordt voor één component is het relatief duur. Voor kleine batches van producten, kan dit een goede oplossing zijn. Het “re-coaten” zal bij een klein product evenveel tijd blijven kosten als bij veel producten of een groot product. Bij LBPF kan alleen in de breedte gewerkt worden, vanwege de support structuren die vast zitten aan de bouwplaat. Bij LBPF wordt er vaak ook gebruik gemaakt van inert gas in de printkamer, om zo oxidatie en reacties te voorkomen tijdens het printen (Power bed fusion, 2019).

Een product gemaakt in een LBPF machine heeft vaak maximale afmetingen van: 250 mm x 250 mm x 300 mm. In de figuur hieronder zijn de verdere ontwerp specificaties te zien voor een algemeen LBPF ontwerp (3dhubs.com, 2020).

Tabel 1 Ontwerp specificaties LBPF (3dhubs.com, 2020)

Feature	Design specification
<b>Gat grootte</b>	Diameters tussen 0,5 mm en 6 mm zonder support. Diameters groter dan 6 mm hebben hoogstwaarschijnlijk support nodig.
<b>Ontsnappingsgaten</b>	Minimaal 2-5 mm in diameter
<b>Uitsteeksels</b>	Groter dan 45° voor horizontale niet ondersteunde onderdelen.
<b>Niet ondersteunde randen</b>	Maximum 0,5 mm
<b>Aspect ratio</b>	8:1 hoogte tot breedte
<b>Dimensionele nauwkeurigheid</b>	± 0.1 mm

### Samengevat

Laser powder bed fusion (LBPF) is een proces waarbij dunne lagen van poeder uitgespreid worden op een platform. Het poeder wordt per laag samengesmolten door een laserstraal. De volgende lagen poeders worden over de voorgaande lagen gerold en samengesmolten tot het uiteindelijke 3D-product is gebouwd. De support die nodig is tijdens het bouwen en afkoelen wordt tijdens deze lagen gebouwd van hetzelfde materiaal als het product.

Het overtollige poeder kan gebruikt worden voor een nieuw product. LBPF is goed te gebruiken voor complexe structuren met veel details (3dhubs.com, 2020).

## 1.2 Electron Beam Powder Bed Fusion

Electron Beam Powder Bed Fusion (EBPF) is een vorm van Powder bed fusion. Het wordt ook wel Electron Beam Melting (EBM) genoemd. EBM lijkt veel op LBPF, het grootste verschil is het gebruik van een Electron Beam in plaats van een laser. EBM-technologie wordt voornamelijk gebruikt in de luchtvaart en medische toepassingen, met name voor het ontwerp van implantaten (Carlota, 2019).

EBM maakt gebruik van een energierijke straal, in plaats van een laser, om metaalpoeder deeltjes te fuseren. Een geconcentreerde elektronenbundel scant over een dunne laag poeder en veroorzaakt het gelokaliseerde smelten en stollen van een specifieke doorsnede. Elektronenbundelsystemen produceren minder restspanningen in onderdelen, wat resulteert in minder vervorming en minder behoefte aan een ondersteuningsconstructie. Bovendien gebruikt EBM minder energie en kan het lagen produceren in een sneller tempo dan SLM en DMLS, maar de minimale detail afmetingen, de grootte van de poederdeeltjes, de laagdikte en de afwerking van het oppervlak zijn meestal van mindere kwaliteit. EBM vereist ook dat de onderdelen in een vacuüm worden geproduceerd en het proces kan alleen worden in combinatie met geleidende materialen (bijvoorbeeld titanium) (Redwood, n.d.).

### Verschillen tussen EBPF en LBPF

Tabel 2 - Verschillen tussen EBPF en LBPF (Kowen, 2020)

Electron Beam Powder Bed Fusion	Laser powder bed fusion
Werkt alleen met geleidende materialen	Werkt met zowel metalen als polymeren
Ruwe oppervlaktes, problemen met werken met fijnere poeders	Minder ruwe oppervlaktes, werkt met fijne poeders
Heeft een lange afkoeltijd, maar kan wel sneller produceren. Netto een snellere productietijd.	Heeft een korte afkoeltijd, maar kan minder snel produceren
Heeft een powder cake als support structure	Heeft weinig support van het powder bed
Werkt goed met meerdere laagdiktes	Werkt minder goed met verschillende laagdiktes
Werkt alleen in een vacuüm	Werkt i.c.m. inert gas
Post proces - alleen de powder cake weghalen	Post proces - support structures weghalen
Minder vervorming, poeder wordt geleidelijk verhit	Meer kans op vervorming, minder geleidelijke verhitting van het poeder. Support structures helpen hiertegen
Objecten kunnen worden genest om productiviteit te verhogen	Objecten kunnen niet worden genest om productiviteit te verhogen

### Voordelen & grenzen van Electron Beam Powder Bed Fusion

De belangrijkste voor- en nadelen van de techniek worden hieronder samengevat:

- ✓ Minder support structuren benodigd
- ✓ Geen extra hittebehandeling nodig om het materiaal te ontlasten
- ✓ Permanente verwijdering van poriën door gebruik te maken van Hot Isostatic Pressing
- Verwijdering van de powder cake is intensief werk, vooral in interne kanalen. Echter is dit wel mogelijk

## Commerciële machines op de markt

Tabel 3 EBPBF machines op de markt (Kowen, 2020)

Bedrijf	Land	Systeem	Bouw volume (mm)	Materialen	Electron Beam Kracht
GE Additive Arcam	Zweden	A2X	200 x 200 x 380	Titanium, nickel alloy, titanium aluminide	3 kW
		Q10plus	200 x 200 x 180	Titanium, cobalt-chrome, copper	3 kW
		Q20plus	350 Ø x 380	Titanium	3 kW
		Spectra L	350 Ø x 430	Titanium	4.5 kW
		Spectra H	250 Ø x 430	Titanium, titanium aluminide, nickel alloy, tool steel	6 kW
Freemelt	Zweden	ONE	100 Ø x 100	Ongelimiteerd	0-6 kW variabel
Tianjin Qingyan Zhishu Technology Co., Ltd. (Qbeam)	China	Lab200	200 x 200 x 240	Ti alloy, superalloy, copper alloy, refractory metals	3 kW
		Med200	200 x 200 x 240	Titanium	3 kW
		Aero350	350 x 350 x 400	Ti alloy, nickel base superalloy, copper alloy, refractory metals, titanium aluminide	3 kW
Xi'an Sailong Metal Materials Co., Ltd.	China	S200 production	200 x 200 x 200	Titanium alloy, titanium aluminum, stainless steel, refractory metal	3 kW
		Y150 Biomedical	150 x 150 x 180	Titanium alloy, cobalt chromium, tantalum, titanium tantalum alloy	3 kW
Tada Electric (Mitsubishi Electric group)	Japan	EZ300	250 x 250 x 300	Niet bekend	6 kW

### Bedrijven die EBPBF als service aanbieden

#### - Materialise

Materialise is een [Belgisch bedrijf](#) dat gespecialiseerd is in [additive manufacturing](#), de software hiervoor en de industriële toepassingen ervan. Het hoofdkantoor is in [Leuven](#) gevestigd op het Researchpark [Haasrode](#).

#### - Shapeways

Shapeways is een bedrijf voor [3D](#)-printservice. Het bedrijf is gevestigd in [Eindhoven](#). De missie van Shapeways is het voor iedereen mogelijk maken om producten te ontwerpen, te maken en te verkopen. Via de website van Shapeways is het mogelijk om eigen modellen te laten printen.

Materiaal	Techniek	Machine
Roestvrijstaal	3D printing / sintering	R2 Ex-one

#### - Oceanz

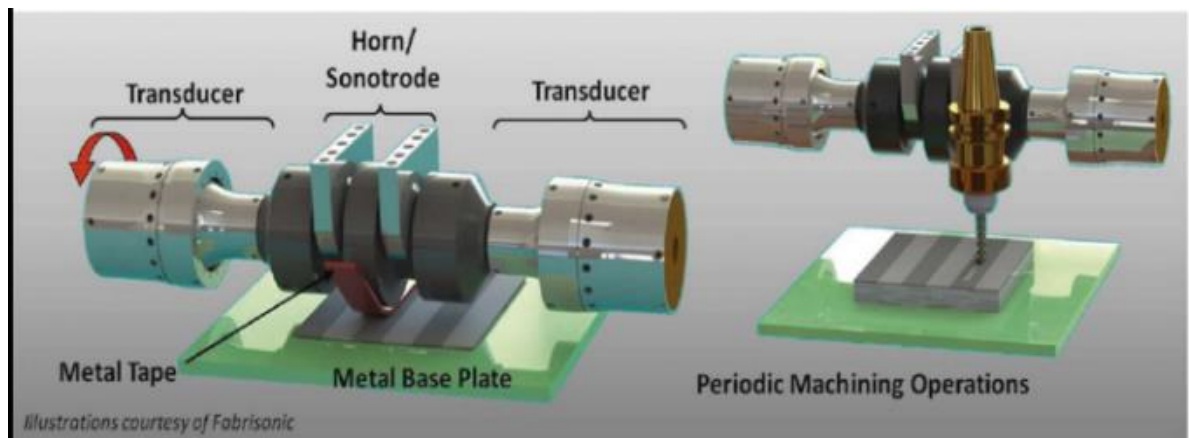
Op basis van persoonlijk contact bouwt Oceanz aan lange termijn relaties waarbij de klant gebruik kan maken van [YourOceanz](#), de online 3D printservice. Als [Supplier](#) werkt Oceanz aan efficiënte processen, optimale 'supply chain management' en korte levertijden (Oceanz Express) met een hoge leveringsbetrouwbaarheid.

### 1.3 Ultrasonic Additive Manufacturing

Ultrasonic additive manufacturing is een vorm van Sheet lamination. Bij Ultrasonic additive manufacturing (UAM) wordt het materiaal niet gesmolten, maar door ultrasoon lassen met elkaar verbonden (R.J.Friel R.A.Harris, 2013). Bij dit lassen worden hoogfrequente trillingen gebruikt om oppervlakken met elkaar te verbinden, terwijl het metaal solide blijft. Door op deze manier laag na laag te lassen, wordt er een product gemaakt. Normaliter wordt er bij UAM gebruikt gemaakt van dunne metaalstroken (Medraj, 2019).

Een draaiend wiel, de sonotrode genaamd, oefent druk en een ultrasone trilling uit op dunne stroken (geen platen) metaalfolie die op de voorgaande lagen zijn gelegd. De druk houdt het folie op zijn plaats en drukt op het product dat gemaakt wordt, maar de geluidsgolven worden veroorzaakt door het wiel dat links en rechts op het folie trilt. Als er genoeg van deze foliestroken zijn neergelegd, wordt er een "niveau" gevormd door enkele lagen folie. Op elk niveau wordt de Computer numerical control (CNC) gebruikt om materiaal te verwijderen. CNC staat voor is een computergestuurde techniek die gebruikt wordt om snel en nauwkeurig stukken te maken van metaal en andere materialen. De CNC maakt het detailwerk af en dan begint het proces weer met de sonotrode en het folie. In figuur 3 zijn deze machines visueel weergegeven (Asaf Levy, 2018).

In dit proces wordt er gebruik gemaakt van een ultrasone transducer om de lashoorn te laten trillen tijdens het plaatsen van nieuwe metaalstroken. Het oppervlak van de hoorn is gestructureerd, zodat hij het oppervlak van de metaalstroken kan vasthouden en de trillingsenergie over kan brengen. Het materiaal wordt zo in vaste toestand aan elkaar gemaakt tot een driedimensionaal product (Asaf Levy, 2018).

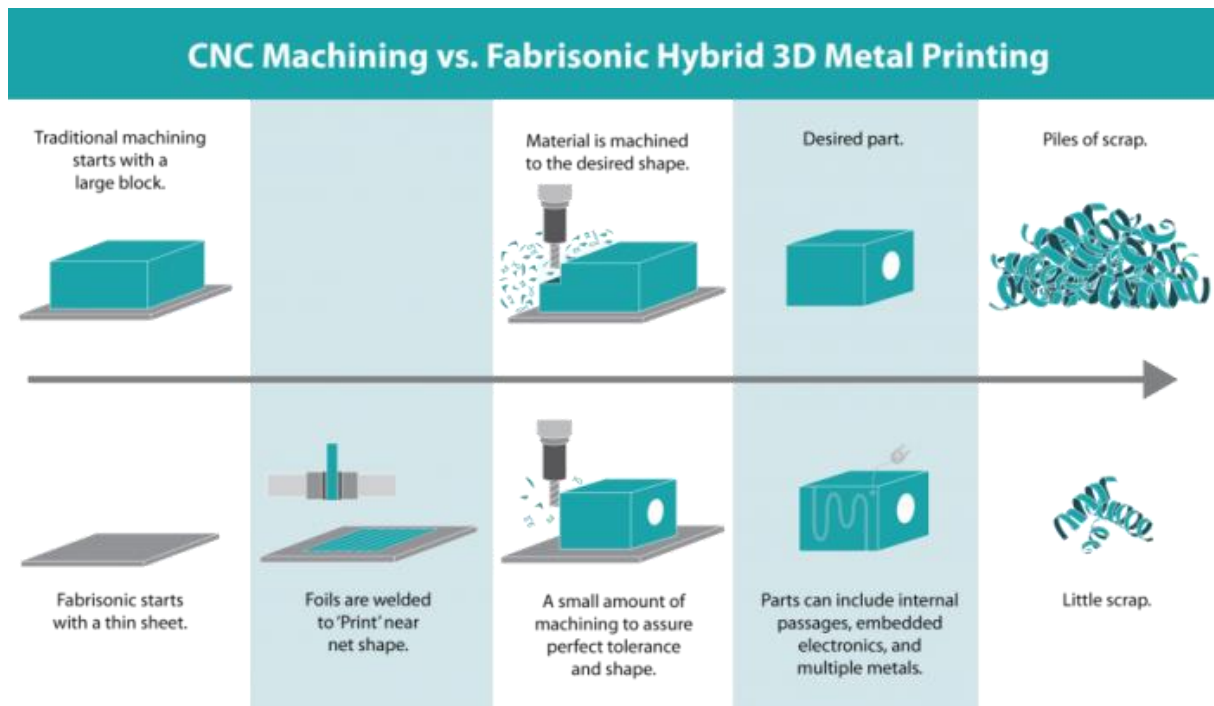


Figuur 5 UAM Proces (Asaf Levy, 2018)

Het proces vereist wel extra CNC-bewerking en verwijdering van het ongebonden metaal, vaak tijdens het lasproces. UAM is zeer geschikt voor het printen van grote componenten met meerdere metalen, ingebette sensoren en interne structuur. Er wordt gebruik gemaakt van veel kracht en zware trillingen om de metaalstroken te kunnen verbinden, daarom is UAM niet erg geschikt voor fijne structuren (Strömbergsson, 2020).

Het grootste verschil tussen UAM en de rest van de 3D-printtechnieken is dat UAM een hybride proces is van ultrasonic layer manufacturing en CNC-machinemateriaalverwijdering. Ultrasonic additive manufacturing. In het figuur hieronder staat een visuele weergave van een normaal CNC machining proces in vergelijking met UAM.





Figuur 6: CNC machining vs. UAM (Asaf Levy, 2018)

### Samengevat

UAM is een bijzonder proces door de combinatie van additive manufacturing en CNC. Er kunnen tijdens dit proces ook meerdere materialen gebruikt worden zonder problemen. Daarnaast wordt er een relatief lage temperatuur gebruikt in vergelijking met de andere technieken, daarom is het mogelijk om sensoren of andere delicate componenten in onderdelen te verwerken. Ook vindt er door deze relatief lage temperatuur weinig verandering plaats aan de materiaaleigenschappen. De materiaaleigenschappen waarmee het proces begint, daar eindigt hij ook mee.

UAM wordt vooral gebruikt voor complexe producten met meerdere materialen, waarbij er componenten geïntegreerd moeten worden in het eindproduct. (Asaf Levy, 2018)

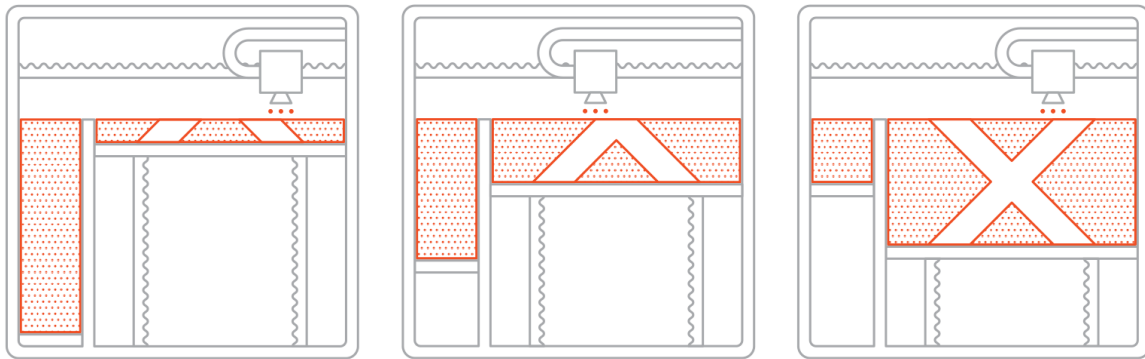
Tabel 4 Voor- en nadelen UAM

Voordelen	Nadelen
<b>Materiaal wordt niet gesmolten</b>	Nog CNC nodig
<b>Kan grote componenten met sensoren goed verwerken</b>	Niet goed te gebruiken voor fijne structuren of componenten met veel details
<b>Kunnen meerdere metalen in een product gebruikt worden</b>	
<b>Weinig tot geen verandering in grootte of sterkte na het printen.</b>	

## 1.4 Binder Jetting

Binder jetting (BJT) is een vorm van additive manufacturing. Bij BJT wordt een bindmiddel selectief op het poederbed aangebracht, waarbij deze gebieden aan elkaar worden gebonden tot een vast onderdeel, één laag per keer. De materialen die vaak worden gebruikt in BJT zijn metalen, kunststof, zand en keramiek die in een korrelvorm worden geleverd.

BJT wordt gebruikt in verschillende toepassingen, waaronder het maken van full-color prototypes kunststof (zoals beeldjes), het maken van grote zandgietkernen en -mallen en het maken van goedkope 3D geprinte metalen onderdelen.



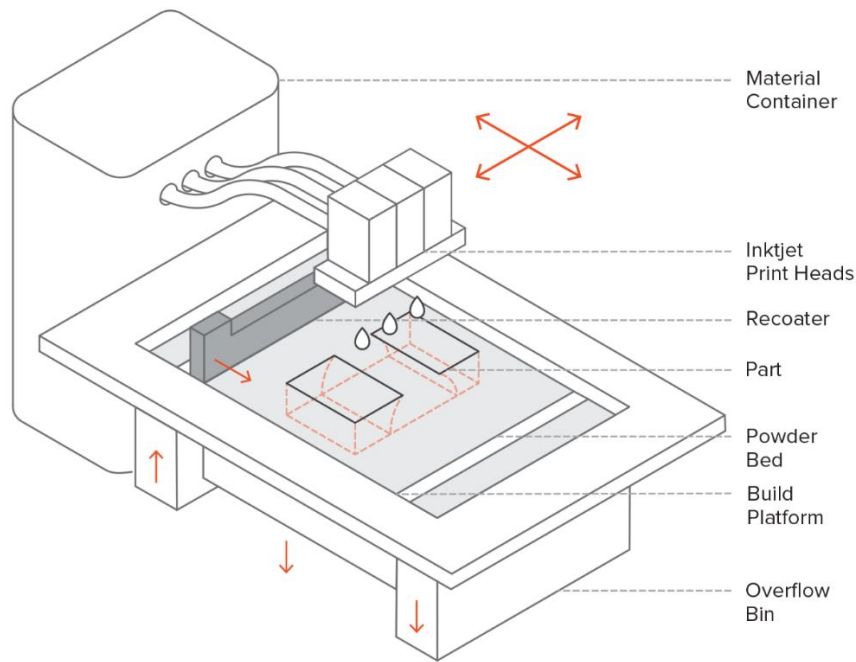
Figuur 7 Het BJT proces (Varotsis, Introduction to binder jetting 3D printing)

### Het BJT bestaat uit vier processtappen:

- I. Eerst verspreidt een recoatingsblad een dun laagje poeder over het bouwplatform.
- II. Vervolgens gaat een slede met inksproeiers (die lijken op de mondstukken die in desktop 2D-printers worden gebruikt) over het bed, waarbij selectief druppels van een bindmiddel (lijm) worden afgezet die de poederdeeltjes aan elkaar plakken. In full-color BJT wordt tijdens deze stap ook de gekleurde inkt afgezet. De grootte van elke druppel is ongeveer 80  $\mu\text{m}$  in diameter, dus een goede resolutie kan worden bereikt.
- III. Wanneer de laag is voltooid, gaat het bouwplatform naar beneden en het blad bedekt het oppervlak opnieuw. Het proces herhaalt zich dan totdat het hele onderdeel is voltooid.
- IV. Na het drukken wordt het onderdeel ingekapseld in het poeder en wordt het achtergelaten om uit te harden en aan kracht te winnen. Vervolgens wordt het onderdeel uit de poederbak gehaald en wordt het overtollige poeder via perslucht gereinigd.

Afhankelijk van het materiaal is meestal een nabewerking nodig. Bijvoorbeeld, metalen BJT onderdelen moeten worden gesinterd (of op een andere manier een warmtebehandeling ondergaan) of geïnfiltreerd worden met een metaal met een lage smeltemperatuur (meestal brons). Full-color prototypes worden ook geïnfiltreerd met acryl en gecoat om de levendigheid van de kleuren te verbeteren.

Dit komt omdat de onderdelen in een "groene" staat zijn wanneer ze de printer verlaten. BJT-onderdelen in de groene staat hebben slechte mechanische eigenschappen (ze zijn zeer broos) en zijn zeer poreus (Varotsis, Introduction to binder jetting 3D printing, 2020). Dit slaat eigenlijk alleen op keramische en metaal BJT. Kunststof BJT wordt niet gesinterd en dus is er ook geen sprake van een groene staat.



Figuur 8 Schema van een BJT 3D-printer (Varotsis, Introduction to binder jetting 3D printing)

### Kenmerken van BJT

Een belangrijk voordeel van BJT ten opzichte van andere 3D-printprocessen is dat de verlijming bij kamertemperatuur plaatsvindt. Dit betekent dat dimensionale vervormingen in verband met thermische effecten tijdens het printen (zoals kromtrekken in FDM, SLS, DMSL/SLM of curling in SLA/DLP) niet voorkomen bij BJT. Na het printen komt het saneringsproces die wel voor degelijke thermische effecten kan zorgen.

Hierdoor behoort het bouwvolume van BJT machines tot de grootste in vergelijking met alle 3D printtechnologieën (tot 2200 x 1200 x 600 mm). Deze grote machines worden over het algemeen gebruikt om zandgietmallen te produceren. Metalen BJT systemen hebben meestal grotere bouwvolumes dan DMSL/SLM systemen, waardoor het mogelijk is om meerdere onderdelen tegelijk te produceren. De maximale productgrootte is echter beperkt tot een aanbevolen lengte van maximaal 50 mm, vanwege de nabewerking.

(amcm.com, 2020) DMSL/SLM grootste bouwvolume (tot 450 x 450 x 1,000 mm) wordt met name gebruikt voor het printen van raketmotoren.

Bovendien heeft BJT geen ondersteunende structuren nodig: het omringende poeder geeft het onderdeel alle benodigde ondersteuning (vergelijkbaar met SLS). Dit is een belangrijk verschil tussen metalen BJT en andere metalen 3D printprocessen, die meestal een uitgebreid gebruik van ondersteunende structuren vereisen, en maakt het mogelijk om vrije-vorm metalen structuren te creëren met zeer weinig geometrische beperkingen. Geometrische onnauwkeurigheden in metaal BJT komen voornamelijk voort uit de nabewerkingsstappen.

De onderdelen in BJT hoeven niet aan het bouwplatform te worden bevestigd, dit houdt in dat het hele bouwvolume kan worden benut. BJT is geschikt voor lage tot middelhoge serieproductie. Om gebruik te maken van de volledige mogelijkheden van BJT is het belangrijk om na te denken over het effectief vullen van het gehele bouwvolume van de machine (Konda Gokuldoss, Kolla, & Eckert, 2020).

Het is ook mogelijk met BJT om 3D-printen in full color. Het wordt vaak gebruikt voor het 3D printen van beeldjes en topografische kaarten, vanwege de lage kosten. Full color modellen worden geprint met behulp van zandsteenpoeder of PMMA-poeder.

### **Metalen BJT**

Metal BJT kan tot 10 x zuiniger zijn met de huidige stand van de techniek. Bovendien is de bouwmaat van BJT aanzienlijk groot en hebben de geproduceerde onderdelen geen ondersteunende structuren nodig tijdens het printen, waardoor complexe geometrieën kunnen worden gecreëerd. Dit maakt van BJT een zeer aantrekkelijke technologie voor de productie van klein tot middelgroot metaal.

Het grootste nadeel van metalen BJT onderdelen zijn hun mechanische eigenschappen, die niet geschikt zijn voor high-end toepassingen. Echter zijn de materiaaleigenschappen van de geproduceerde onderdelen gelijkwaardig aan metalen onderdelen die met Metal Injection Molding worden geproduceerd, wat een van de meest gebruikte productiemethoden is voor de massaproductie van metalen onderdelen.

### **Infiltration & Sintering**

Metalen BJT onderdelen vereisen een secundair proces na het printen, zoals infiltratie of sinteren, om hun goede mechanische eigenschappen te bereiken, aangezien de as-gedrukte onderdelen in principe bestaan uit metaaldeeltjes die met een polymeerlijm aan elkaar zijn gebonden.

Infiltratie wordt minder toegepast zoals bij machines als ExOne, daarentegen is sinteren een onvermijdelijke productiestap bij metaal BJT (Cremer, 2020).

- **Infiltratie:** Na het printen wordt het onderdeel in een oven geplaatst, waar het bindmiddel wordt uitgebrand en holtes achterblijft. Op dit punt is het onderdeel ongeveer 60% poreus. Brons wordt dan gebruikt om de holten te infiltreren via capillaire werking, wat resulteert in delen met een hoge dichtheid en een goede sterkte.
- **Sinteren:** Na het printen worden de onderdelen in een hoge temperatuur oven geplaatst, waar het bindmiddel wordt uitgebrand en de resterende metaaldeeltjes aan elkaar worden gesinterd (verlijmd), wat resulteert in onderdelen met een zeer lage poreusheid.

De onderstaande figuur weergeeft een voorbeeld van geprinte rvs met infiltratie nadering.



Figuur 9 Een olie- en gasstator geprint uit RVSen geïnfiltrerd met brons (Varotsis, Introduction to binder jetting 3D printing)

## Kenmerken van metaal BJT

Nauwkeurigheid en tolerantie kunnen sterk variëren afhankelijk van het model en zijn moeilijk te voorspellen, omdat ze sterk afhankelijk zijn van de geometrie. Zo krimpen onderdelen met een lengte tot 25 - 75 mm na infiltratie tussen 0,8 en 2%, terwijl grotere onderdelen een geschatte gemiddelde krimp van 3% hebben. Bij sinteren bedraagt de krimp ongeveer 20%. Om deze krimp te compenseren worden tijdens de ontwerpfase de afmetingen hierop afgesteld door de software van de machine, maar een afwijkende krimp kan een probleem zijn en moet worden verantwoord tijdens de ontwerpfase.

De nabewerking kan ook onnauwkeurigheden met zich meebrengen. Zo wordt het onderdeel tijdens het sinteren verwarmd tot een hoge temperatuur en wordt het onderdeel zachter. In deze zachtere toestand kunnen niet-ondersteunde delen onder hun eigen gewicht vervormen. Bovendien krimpt het onderdeel tijdens het sinteren, waardoor er wrijving ontstaat tussen de plaat van de oven en de onderkant van het onderdeel, wat kan leiden tot kromtrekken. Ook hier is het belangrijk om dit goed af te stemmen tijdens de ontwerpfase.

Gesinterde of geïnfiltreerde BJT metalen onderdelen zullen een interne porositeit hebben (sinteren produceert 97% dichte delen, terwijl infiltratie ongeveer 90% is). Dit beïnvloedt de mechanische eigenschappen van metalen BJT onderdelen, omdat de holtes kunnen leiden tot scheurinitiatie. In het algemeen porositeit kunnen dingen als vervorming, breuksterkte en uitrekking de mechanische eigenschappen nadelig beïnvloeden.

Geavanceerde metaalkundige processen kunnen worden toegepast om onderdelen te produceren die bijna geen interne porositeit hebben. Het is ook mogelijk om een HIP behandeling worden toegepast om de porositeit te verminderen. Voor toepassingen waarbij de mechanische prestaties van cruciaal belang zijn, zijn DMLS of SLM technieken een betere oplossing.

Een voordeel van metalen BJT ten opzichte van DMLS/SLM, is de oppervlakteruwheid van de geproduceerde onderdelen. Kenmerkend is dat metalen Binder Jetted onderdelen na de nabewerking een oppervlakteruwheid hebben van Ra 6  $\mu\text{m}$ , die kan worden gereduceerd tot Ra 3  $\mu\text{m}$  als er een kraalvormige stap wordt toegepast. Ter vergelijking, de as-printed oppervlakteruwheid van DMLS/SLM onderdelen is ongeveer Ra 12-16  $\mu\text{m}$ . Dit is vooral gunstig voor onderdelen met een interne geometrie.

BJT poeders zijn er in verschillende materialen. De uiteindelijke toepassing van het onderdeel bepaalt het meest geschikte poeder. Metaalpoeders (zoals MIM-poeders) zijn in vergelijking tot DMSL/SLM-materialen zuiniger. Het overgebleven poeder kan tot boven de 90% worden gerecycled, wat leidt tot een grotere materiaalbesparing.

BJT kan goedkoper zijn voor het produceren van relatief grote hoeveelheden van kleine delen, in vergelijking met PBF. Vooral bij gebruik van laser gebaseerde PBF kunnen onderdelen niet gemakkelijk worden gestapeld of genest, wat wel mogelijk is met BJT. Op deze wijze is het mogelijk het volledige bouwvolume van een machine te gebruiken door de onderdelen in verticale richting te stapelen. Dit levert bouwvoordelen, de valkuilen en de design overwegingen op. Beide vereisen gedegen kennis van het proces en het materiaal om tot een optimaal eindresultaat te komen (amfg.ai, 2020).

BJT bestaat sinds twee jaar en is vrij nieuw voor productietoepassingen in vergelijking met andere 3D-print technieken

## Voordelen & Grenzen van BJT

De belangrijkste voor- en nadelen van de BJT technologie zijn hieronder samengevat:

- ✓ BJT produceert metalen onderdelen en full-color prototypes tegen een fractie van de kosten in vergelijking met respectievelijk DMLS/SLM en Material Jetting.
- ✓ BJT kan grote onderdelen en complexe metaalgeometrieën produceren.
- ✓ BJT voor kleine onderdelen geeft het minst vervorming en thermische effecten (bijv. kromtrekken) in vergelijking met LPBF en EPBF.
- ✓ De productiemogelijkheden van BJT zijn uitstekend voor de productie van lage tot middelgrote series.
- ✓ BJT kan met dezelfde machine configuratie meerdere soorten metalen tegelijk printen.
- Metalen BJT onderdelen hebben lagere mechanische eigenschappen dan DMLS/SLM onderdelen, vanwege hun hogere poreusheid.
- Alleen ruwe details kunnen met BJT worden geprint, omdat de onderdelen zeer broos zijn in hun groene staat en kunnen breken tijdens de nabewerking.
- Vergeleken met andere 3D printprocessen biedt BJT een beperkte materiaalkeuze op dit moment.

### Samengevat

BJT 3D-printen heeft lage kosten voor metalen onderdelen, voor toepassingen die zeer hoge prestaties vereisen is deze techniek niet geschikt. Voor metalen 3D geprinte onderdelen biedt BJT een grotere ontwerp vrijheid dan DMLS/SLM. Thermische effecten zijn met simulaties heel goed voorspelbaar, het ontwerp kan hierop aangepast worden.

“Ten opzichte van LPBF/EBPBF is de aanschafprijs van de ExOne Metal BJT machine (160Pro) ligt nl ook boven 1000K, dit is een stuk lager (in de orde van 100/200K), productiviteit ligt veel hoger (theoretisch kan dit oplopen tot een factor 100 x sneller), gebruikte poeders zijn MIM-poeders en goedkoper dan de hoge kwaliteit poeders voor LPBF/EBPBF, De recyclebaarheid van de poeders is > 90% (vergelijkbaar met LPBF)” (Cremer, 2020).

De belangrijkste kenmerken van BJT zijn samengevat in onderstaande tabel:

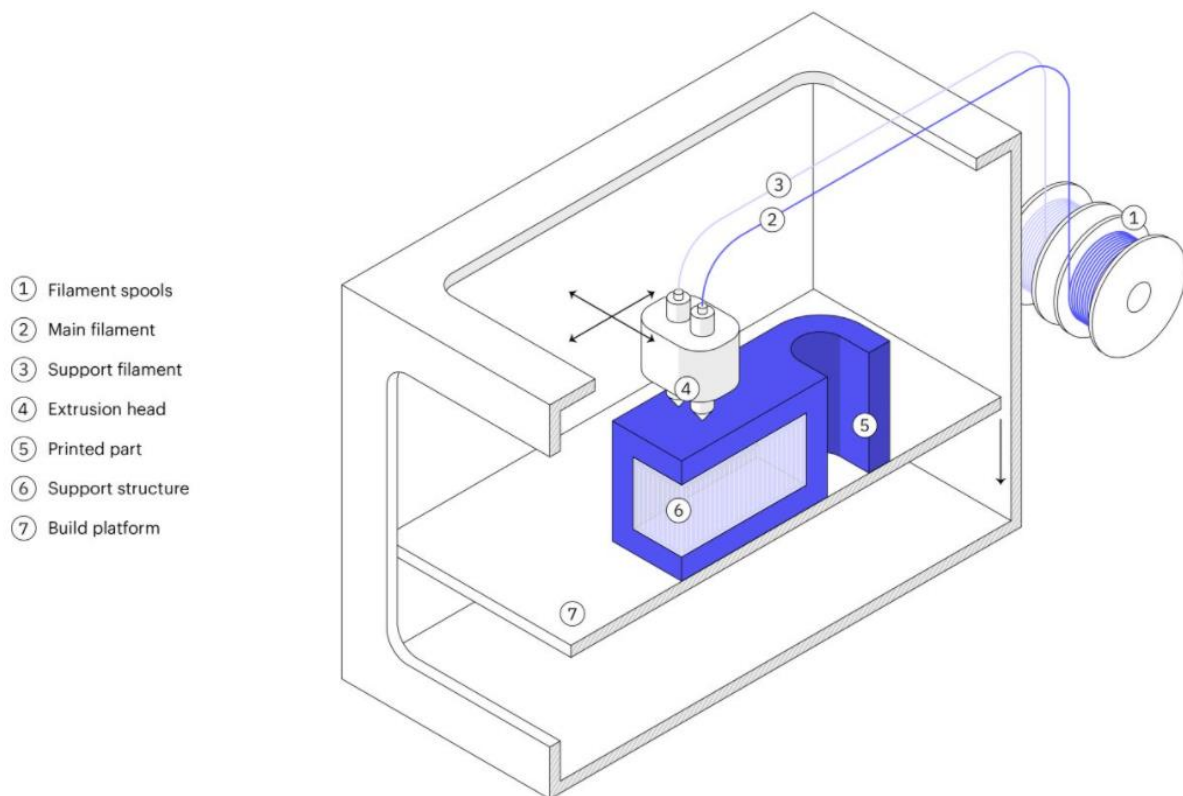
Tabel 5 Kenmerken BJT techniek

Kenmerken	BJT
<b>Materialen</b>	Metalen, Keramiek & zand
<b>Dimensionale nauwkeurigheid</b>	Metaal: $\pm 2\%$ of 0,2 mm (tot $\pm 0,5\%$ of $\pm 0,05$ ) Full color: $\pm 0,3$ mm Zand: $\pm 0,3$ mm
<b>Typische bouwgrootte</b>	Metaal: 400 x 250 x 250 mm (tot 800 x 500 x 400 mm) Full color: 200 x 250 x 200 mm (tot 500 x 380 x 230 mm) Zand: 800 x 500 x 400 (tot 2200 x 1200 x 600 mm)
<b>Gebruikelijke laagdikte</b>	Metaal: 35 - 50 $\mu\text{m}$ Full color: 100 $\mu\text{m}$ Zand: 200 - 400 $\mu\text{m}$
<b>Support</b>	Niet nodig

## 1.5 Metal Material Extrusion

Metal Extrusion is geschikt voor prototyping-doeleinden of voor losse onderdelen (op maat). Metal Extrusion staat bekend als voordelig 3D-printen voor metaal. Metal Extrusion is een variant die voort komt uit het klassieke FDM-proces voor kunststoffen. Deze techniek is al sinds 2018 op de markt. Een andere benaming voor deze technologie is Bound Metal Deposition (BMD) of Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM).

De werking van Metal Extrusion is hetzelfde als FDM waarbij het onderdeel laag-voor-laag geprint wordt door materiaal afkomstig van de sproeistuk. Het materiaal is een metaalpoeder dat met een polymeer bindmiddel bij elkaar wordt gehouden, net als BJT. Het resultaat van de printfase is een "groen" deel van dat ontbonden en gesinterd moet worden om volledig metaal te worden (3dhubs.com, 2020).



Figuur 10 Het Metal Material Extrusion proces (3dhubs.com, 2020)

Metaal extrusie is een 3-fasen proces. Het proces bestaat uit een printfase, een ontbindingsfase en een sinterfase. Dit is hoe de printfase werkt:

- I. De ruwe grondstof wordt geleverd in een filament of staafvorm die typisch bestaat uit metaaldeeltjes die met behulp van polymeer en/of was aan elkaar zijn gebonden.
- II. Deze staaf of filament wordt geëxtrudeerd door een verhitte spuitkop en wordt laag voor laag aangebracht, waarbij een onderdeel wordt opgebouwd op basis van het CAD-model.
- III. Tegelijkertijd worden er eventueel ondersteuningsconstructies gebouwd. De interface tussen de steun en het onderdeel wordt bedrukt met een keramisch steunmateriaal, dat later eenvoudig kan worden verwijderd.



Wanneer de print-fase is voltooid, moet het resulterende "groene" gedeelte na bewerkt worden om metaal te worden met behulp van dezelfde stappen als in BJT. Het "groene" deel wordt eerst een paar uur in een oplossing gewassen om het grootste deel van het bindmiddel te verwijderen. Daarna wordt het gesinterd in een oven om de metaaldeeltjes aan elkaar te binden en een volledig metalen deel te vormen. De onderstaande figuur weergeeft de print.



Figuur 11 Metal Extrusion na bewerk proces (3dhubs.com, 2020)

Tijdens het sinteren worden de afmetingen van de onderdelen met ongeveer 20% gereduceerd. Om dit te compenseren worden de onderdelen groter geprint. Net als bij BJT is deze krimp niet gelijkmatig. Dit betekent dat er enige probeersels nodig zijn om nauwkeurige resultaten te verkrijgen voor een bepaald ontwerp.

De manier waarop Metaal Extrusion en kunststof FDM-printers werken is zeer gelijkwaardig. Beide processen printen bijvoorbeeld holle delen, met behulp van een cel omtrek en vulling.

Naast het materiaal zijn er nog twee belangrijke praktische verschillen tussen Metal Extrusion en FDM waar men rekening mee moet houden. Beide zijn gebonden aan de werkwijze van het ontbinden en sinterproces.

**Wanddikte:** Bij Metal Extrusion moeten de onderdelen altijd een consistente wanddikte hebben (bij voorkeur kleiner dan 10 mm). Is dit niet het geval, dan kan de tijd die nodig is om de onderdelen volledig te ontbinden en te sinteren met een aantal uren toenemen.

**Steunconstructies:** Net als bij FDM is bij Metal Extrusion vaak ondersteuning nodig tijdens het printen. In Metaal Extrusion is echter ook ondersteuning nodig voor de sinterfase. Bij deze zeer hoge temperaturen wordt het metaalmateriaal slap en buigzaam en kan het onder zijn eigen gewicht instorten.

#### **Voordelen & Grenzen van Metal Material Extrusion**

- ✓ Goedkoop 3D-printen van metaal
- ✓ Functionele metalen prototypes
- ✓ Systemen zijn makkelijk in gebruik
- Hogere kosten dan CNC voor niet complexe onderdelen
- Nabewerkingsfase is langdurig



De belangrijkste kenmerken van Metal Material Extrusion zijn samengevat in onderstaande tabel:

Tabel 6 Kenmerken Metal Material Extrusion

Kenmerken	Metal Material Extrusion
<b>Materiaalkeuze</b>	Momenteel zeer beperkt RVS
<b>Dimensionale nauwkeurigheid</b>	$\pm 0,5\%$ met een ondergrens van $\pm 0,5$ mm ( $\pm 0,020''$ )
<b>Gebruikelijk bouwformaat</b>	300 x 200 x 200 mm (-20% effectief bouwformaat na sinteren)
<b>Gebruikelijke laagdikte</b>	50 - 200 $\mu$ m
<b>Support</b>	Vereist voor printen en sinteren
<b>Interne porositeit</b>	Tussen 2,0 - 4,0%

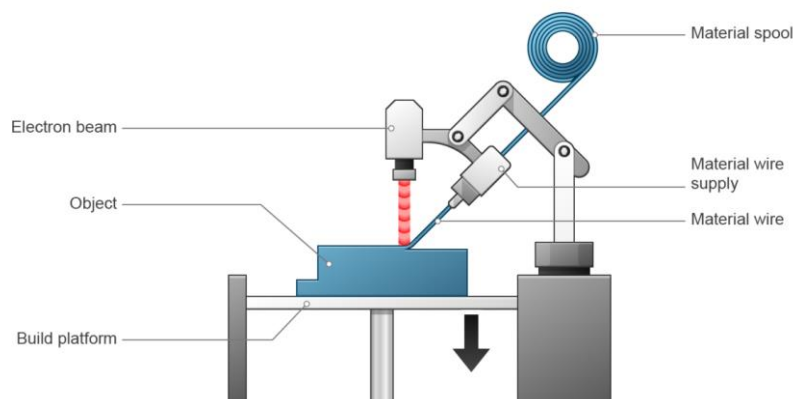
### Samengevat

Metal Material Extrusion 3D-printen is ideaal voor prototyping-doeleinden of voor losse onderdelen. Deze techniek brengt net als BJT lage kosten met zich mee. Een nadeel voor deze techniek is de nawerking (sinteren) en de onderdelen krimpen met 20%. Dit moet gecompenseerd worden tijdens het ontwerp en vraagt om meerdere trials om een goed product te krijgen.

## 1.6 Direct Energy Deposition

Direct Energy Deposition (DED) creëert onderdelen door het smelten van poeder materiaal terwijl het wordt afgezet. Het wordt voornamelijk gebruikt met metaalpoeder of -draad en wordt vaak aangeduid als Metal Deposition (zie onderstaande figuur) (Redwood, n.d.).

In het DED-proces wordt het basismateriaal, dat in metaalpoeder of draadvorm wordt geleverd, door een mondstuk aangevoerd waarna het wordt gesmolten door een gerichte warmtebron (meestal een laser, maar het kan ook een elektronenstraal of boog zijn) en achtereenvolgens toegevoegd aan het bouwplatform. Zowel de warmtebron als het toevoer mondstuk zijn gemonteerd op een robotarm. Het proces vindt in veel gevallen plaats in een hermetisch afgesloten kamer gevuld met inert gas om de materiaaleigenschappen beter te beheersen en het materiaal te beschermen tegen ongewenste oxidatie.



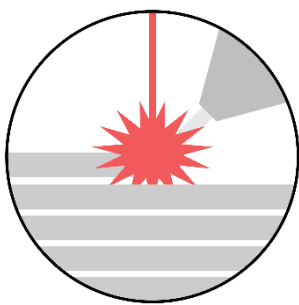
Figuur 12 - DED proces (Dassault Systèmes, n.d.)

DED ondersteunt een breed scala aan metalen, waaronder:

- Titaniumlegeringen
- Roestvrijstaal
- Maraging-staalsoorten
- Gereedschapsstaal
- Aluminiumlegeringen
- Vuurvaste metalen (tantaal, wolfram, niobium)
- Superlegeringen (Inconel, Hastelloy)
- Nikkel koper

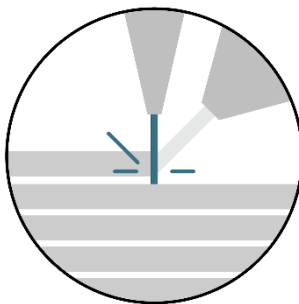
Met name de materialen die in DED worden gebruikt, zijn aanzienlijk goedkoper dan metaalpoeders die worden gebruikt in poederbed metaal AM (AMFG, 2018).

### Technologieën



Figuur 13 – LENS (Redwood, n.d.)

**Laser Engineered Net Shape (LENS)** maakt gebruik van een depositiekop, die bestaat uit een laserkop, poederdoseringspijpjes en een inert gasbuisje, om poeder te smelten terwijl het uit de poederdoseringspijpjes wordt gespoten om een vast onderdeel laag voor laag op te bouwen. De laser creëert een smeltpunt op het object en het poeder wordt in het smeltpunt gespoten, waar het wordt gesmolten en vervolgens gestold. Het substraat is meestal een vlakke metalen plaat of een bestaand onderdeel waarop materiaal wordt toegevoegd (bijvoorbeeld voor reparatie). (Zie Figuur 18 – LENS)



Figuur 14 - EBAM (Redwood, n.d.)

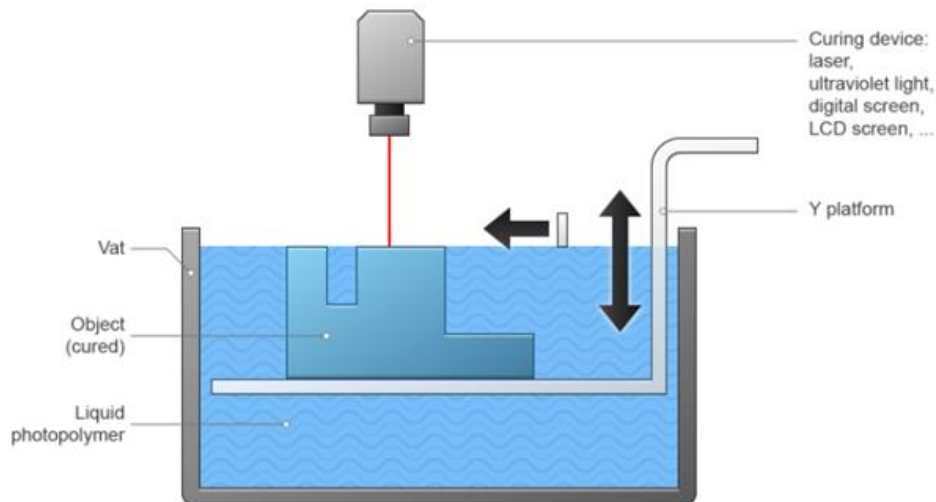
**Electron Beam Additive Manufacture (EBAM)** wordt gebruikt om metalen onderdelen te maken met behulp van metaalpoeder of -draad, aan elkaar gelast met een elektronenbundel als warmtebron. Bij het produceren van onderdelen op een vergelijkbare manier als bij LENS zijn elektronenbundels efficiënter dan lasers en werken ze onder vacuüm, waarbij de technologie oorspronkelijk is ontworpen voor gebruik in de ruimte. (Zie Figuur 19 - EBAM)

### Nadelen voor de casus van ATAG:

DED-technologieën worden uitsluitend gebruikt bij de productie van metaal additieven. Door de aard van het proces zijn ze bij uitstek geschikt voor het repareren of toevoegen van materiaal aan bestaande componenten. De afhankelijkheid van dichte draagconstructies maakt DED een moeilijke techniek bij het produceren van onderdelen vanaf nul. Dit is echter wel mogelijk, SpaceX maakt haar raketonderdelen namelijk vanaf nul. (Redwood, n.d.)

## 1.7 VAT Photopolymerization

De fotopolymerisatie 3D-printtechnologie omvat verschillende processen die gebaseerd zijn op dezelfde basisstrategie: een vloeibaar-fotopolymeer in een vat (of tank) wordt selectief uitgehard door middel van een warmtebron. Laag voor laag wordt een 3D object opgebouwd. Een van de voordelen van deze twee technieken is hun vermogen in één keer een volledige laag van het vloeibare fotopolymeer uit te harden (zie Figuur 15 - VAT polymerization proces).



Figuur 15 - VAT polymerization proces (Dassault Systèmes, n.d.)

Hieronder volgt een lijst met bekende fotopolymerisatie 3D-print methodes:

- **Stereolithografie (SLA)** SLA maakt gebruik van een gebouwd platform dat ondergedompeld is in een doorzichtige tank gevuld met vloeibare fotopolymeerhars. Zodra het bouwplatform is ondergedompeld, brengt een single-point-laser in de machine een doorsnede (laag) van een ontwerp in kaart door de bodem van de tank, waardoor het materiaal uithardt. Nadat de laag in kaart is gebracht en uitgehard is door de laser, gaat het platform omhoog en laat het een nieuwe laag hars onder het onderdeel stromen. Dit proces wordt laag voor laag herhaald om een vast onderdeel te produceren. De onderdelen worden dan meestal door Uv-licht na behandeld om hun mechanische eigenschappen te verbeteren
- **Direct Light Processing (DLP)** DLP volgt een vrijwel identieke methode om onderdelen te produceren in vergelijking met SLA. Het belangrijkste verschil is dat DLP gebruik maakt van een digitaal lichtprojectiescherm om een enkel beeld van elke laag in één keer op te lichtten. Omdat de projector een digitaal scherm is, bestaat het beeld van elke laag uit vierkante pixels, wat resulteert in een laag die wordt gevormd door kleine rechthoekige stenen die voxels worden genoemd. DLP kan voor sommige onderdelen een snellere printtijd bereiken dan SLA, omdat elke hele laag in één keer wordt belicht, in plaats van de dwarsdoorsnede te traceren met een laser.
- **Continuous DLP (CDLP)** Continuous Direct Light Processing (CDLP) (ook bekend als Continuous Liquid Interface Production of CLIP) produceert onderdelen op precies dezelfde manier als DLP. Het is echter afhankelijk van de continue beweging van de bouwplaat in de Z-richting (naar boven). Dit zorgt voor snellere bouw tijden omdat de printer niet hoeft te stoppen en het onderdeel van de bouwplaat hoeft te scheiden nadat elke laag is geproduceerd (Redwood, n.d.).

Fotopolymerisatie wordt met succes toegepast op medische modellering, wat het mogelijk maakt om nauwkeurige 3D-modellen te maken van verschillende anatomische gebieden van een patiënt, gebaseerd op gegevens van computerscans. De hoge resolutie van deze techniek maakt het ook ideaal voor alle soorten van prototyping, evenals voor massaproductie. Vat-polymerisatieprocessen zijn uitstekend geschikt voor het produceren van onderdelen met fijne details en een gladde afwerking van het oppervlak. Dit maakt ze ideaal voor juwelen, investeringsgieten en vele tandheelkundige en medische toepassingen. Materiaalontwikkelingen hebben ook het bedrukken van spuitgietsmatrijzen met een lage run mogelijk gemaakt. De belangrijkste beperkingen voor vat-polymerisatie zijn de bouwmaat en de sterkte van de onderdelen.

Fotopolymeerharsen zijn beschikbaar in verschillende kleuren en vertonen verschillende fysische eigenschappen, elk overeenkomend met een specifiek gebruik. Het gamma harsen omvat taaie harsen, harsen met een laag residugehalte, transparante harsen en flexibele polyurethaanharsen. (Introduction to 3D printing - additive processes)

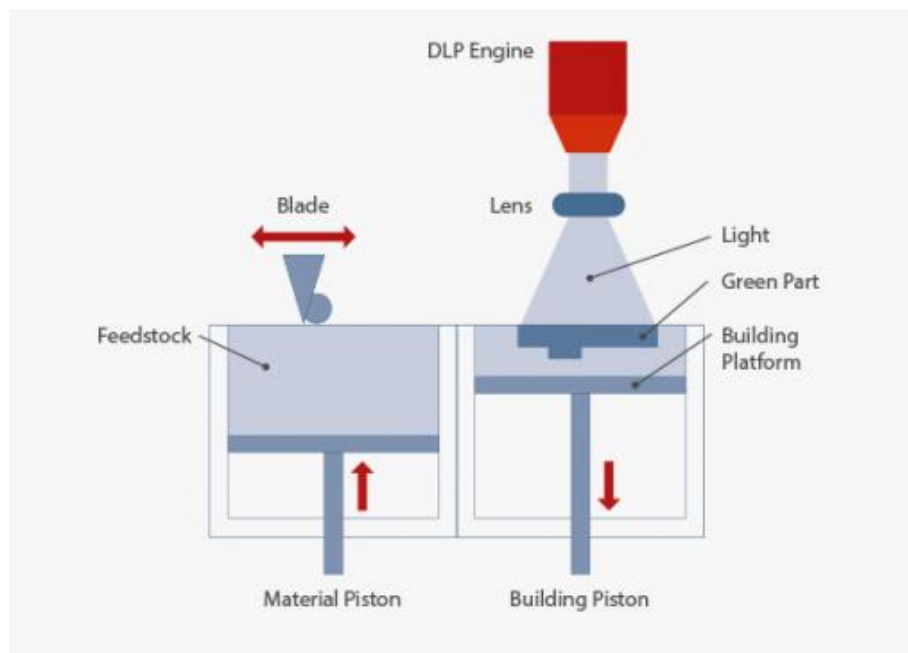
#### **Nadelen voor de casus van ATAG:**

Deze techniek wordt vrijwel uitsluitend gebruikt met polymeer materialen en niet met metaal.

### **1.8 Lithography-Based Metal Manufacturing**

Lithography-based metal manufacturing (LMM) is een vorm van 3D-printtechnologie voor het maken van geavanceerde metaalmodellen, prototypes en productieonderdelen volgens het principe van fotopolymerisatie, waarbij metaalpoeder homogeen wordt gedispergeerd in een lichtgevoelige hars en selectief wordt gepolymeriseerd door middel van belichting met licht. (zie Figuur 16 - LMM proces)

De LMM-technologie maakt de productie mogelijk van hoogwaardige onderdelen met dezelfde materiaaleigenschappen als onderdelen die worden geproduceerd door Metal Injection Molding (MIM), een massaproductiemethode. LMM kan eenvoudig worden geïmplementeerd in bestaande MIM-productieprocessen zonder dat er nabewerkingsmachines of extra expertise nodig is, waardoor de productiekosten en -tijd kunnen worden verlaagd.



Figuur 16 - LMM proces (Incus, n.d.)

### Geen ondersteunende structuren

De zelfdragende functie van de grondstof maakt de plaatsing van verschillende geometrieën op een enkel bouwplatform mogelijk, zonder dat er ondersteuningsconstructies moeten worden toegevoegd.

### Gesinterde onderdelen van 316L

Onder andere is MIM-kwaliteit 316L poeder beschikbaar als standaard materiaal voor LMM-verwerking, en de resulterende gesinterde delen zijn gekarakteriseerd in termen van oppervlakteruwheid, mechanische eigenschappen, en chemie. De resultaten bewijzen dat LMM met succes kan worden gebruikt om direct functionele onderdelen te produceren in een kleinschalige serie of voor het vervaardigen van prototypen voorafgaand aan massaproductie (Incus, n.d.).

## 1.9 Overzicht kenmerken 3D-print technieken

In de tabellen hieronder zijn van alle technieken een aantal kenmerken op een rijtje gezet, zodat de vergelijking makkelijk gemaakt kan worden.

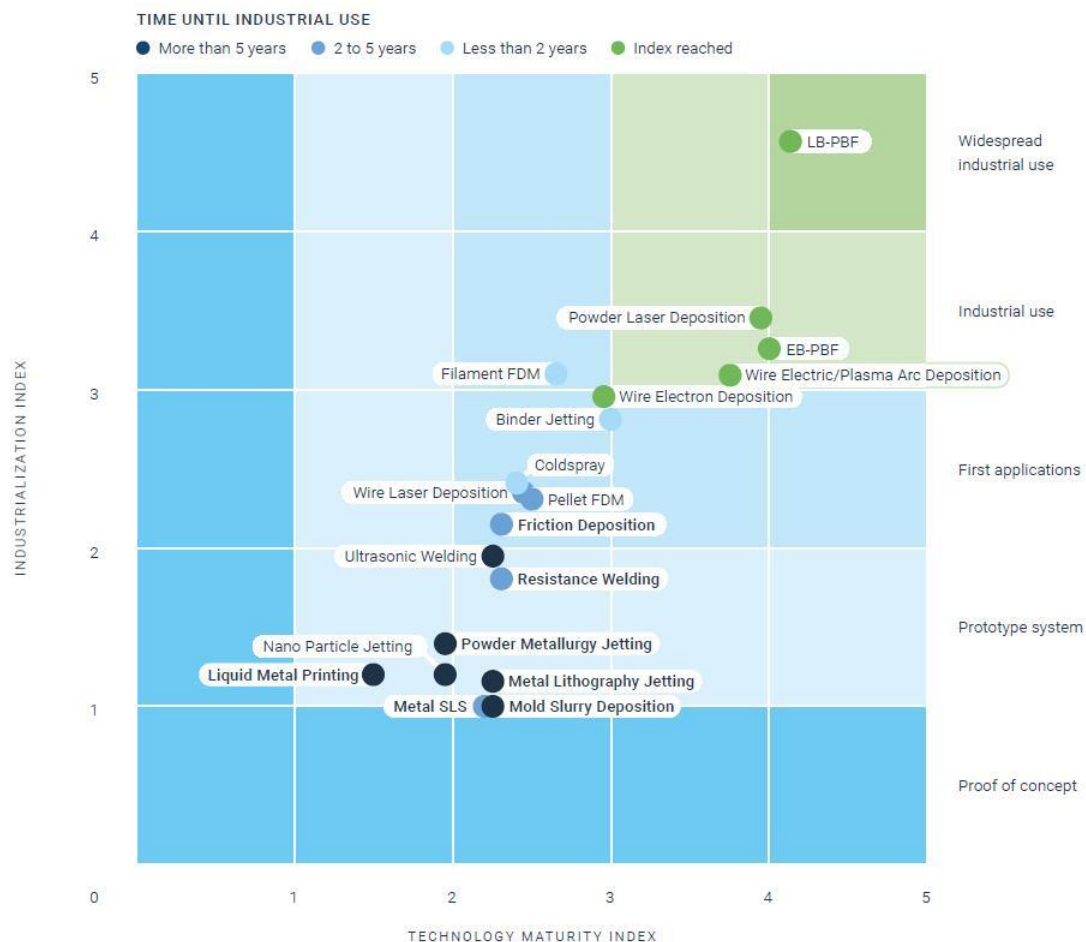
Tabel 7: Kenmerken 3D-technieken

Kenmerken	MME	DED	VAT Photopoly	EBPF
<b>Materialen</b>	Metalen,	Titaniumlegeringen; Verschillende staalsoorten; Aluminiumlegeringen; Vuurvaste metalen; Superlegeringen; Nikkel koper; Andere metalen;	Polymeren	Polymeren, metalen o.a.: titanium, aluminium, nikkel, staal
<b>Materiaalvorm</b>	Poeder	Poeder of draad	Vloeibaar	Poeder
<b>Dimensionale nauwkeurigheid</b>	$\pm 0,5\%$ met een ondergrens van $\pm 0,5 \text{ mm}$ ( $\pm 0,020''$ )			
<b>Minimale laagdikte</b>	50 - 200 $\mu\text{m}$			
<b>Support nodig</b>	Ja	Niet nodig	Ja	Nee, vanwege de powder cake
<b>Geschikt voor serie</b>	Nee	Nee	Klein- middel seriegrootte	Ja, mogelijkheid van nesting en in de hoogte werken
<b>Nabewerking</b>	Ontbinding en sinterfase		Support weghalen	Powder cake weghalen

Tabel 8: Kenmerken 3D-technieken

Kenmerken	LDPF	UAM	BJT	LMM
<b>Materialen</b>	Polymeren, metalen o.a.: titanium, aluminium, nikkel, staal	Metalen	Metalen, Keramiek & zand	Metaal
<b>Materiaalvorm</b>	Poeder	Vellen	Poeder	poeder
<b>Dimensionale nauwkeurigheid</b>	$\pm 0.1$ mm	-	$\pm 2\%$ of $0,2$ mm (tot $\pm 0,5\%$ of $\pm 0,05$ )	
<b>Minimale laagdikte</b>	100 - 120 microns	-	35 - 50 $\mu\text{m}$	
<b>Support</b>	Ja, bij metaal wel	Geen	Geen	Ja
<b>Geschikt voor serie</b>	Kleine series, beperkte tot de onderste laag van productieruimte	Nee	Ja	Nee
<b>Nabewerking</b>	Support weghalen	CNC	Infiltration & Sintering	Support weghalen

In figuur 17 is de volwassenheid van de technieken weergegeven.



Figuur 17: Volwassenheid 3D-technieken (Kashania, Tuan, Gabriele, & Et al, 2018)

## 2 Bibliografie

- (2020, 11 3). Opgehaald van 3dhubs: <https://www.3dhubs.com/nl/3d-print-service/dmls-slm/>
- 3dhubs.com. (2020, november 2). *3dhubs.com*. Opgehaald van [nl/handleiding/metaal-3d-printen/#design-for-metal-3d-printing](https://www.3dhubs.com/nl/handleiding/metaal-3d-printen/#design-for-metal-3d-printing): <https://www.3dhubs.com/nl/handleiding/metaal-3d-printen/#design-for-metal-3d-printing>
- 3dhubs.com. (2020, november 18). *At 3D Hubs, we empower engineers to create revolutionary products*. Opgehaald van 3dhubs.com: <https://www.3dhubs.com/about/>
- 3dhubs.com. (2020, november 7). *Metal 3D Printing*. Opgehaald van 3dhubs.com: <https://www.3dhubs.com/guides/metal-3d-printing/>
- AMFG. (2018, September 27). *Metal 3D Printing: What is Direct Energy Deposition?* Opgehaald van amfg: <https://amfg.ai/2018/09/27/metal-3d-printing-what-is-direct-energy-deposition/>
- amfg.ai. (2019, juni 18). *2019/06/18/titanium-3d-printing-guide/?cn-reloaded=1*. Opgehaald van amfg.ai: <https://amfg.ai/2019/06/18/titanium-3d-printing-guide/?cn-reloaded=1>.
- amfg.ai. (2020, november 17). *All You Need to Know About Metal Binder Jetting*. Opgehaald van amfg.ai: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>
- amfg.ai. (2020, juli 1). *The Evolution of HP's 3D Printing Technology: From Polymer to Metal AM*. Opgehaald van amfg.ai: <https://amfg.ai/2020/07/01/the-evolution-of-hps-3d-printing-technology-from-polymer-to-metal-am/>
- Asaf Levy, A. M. (2018). Ultrasonic additive manufacturing of steel: Method, post-processing treatments and properties. *Elsevier*.
- Carlota, V. (2019). *Electron beam melting*. Opgehaald van <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/#!>
- Cremer, H. (2020, november 19). Sparren 3D-print technieken. (T. Atag, Interviewer)
- Dassault Systèmes. (sd). *Introduction to 3D printing - additive processes*. Opgehaald van [make.3dexperience.3ds](https://make.3dexperience.3ds.com/processes/): <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/>
- digitalmetal.tech. (2020, december 16). *Introduction*. Opgehaald van digitalmetal.tech: <https://digitalmetal.tech/>
- Incus. (sd). *Technology*. Opgehaald van Incus3d: <https://www.incus3d.com/technology>
- Konda Gokuldoss, P., Kolla, S., & Eckert, J. (2020, november 5). *Additive Manufacturing Processes: Selective Laser*. Opgehaald van mdpi.com: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/672>
- Lee, H. L. (2017). *Lasers in additive manufacturing: A review*. Opgehaald van <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-017-0037-7>
- Medraj, M. (2019). Power Ultrasonic Additive Manufacturing: Process Parameters, Microstructure, and Mechanical Properties. *Hindawi*.
- Munsch, D.-I. M., Wycisk, E., & Schmidt-Lehr, M. (2017, oktober). *Additive Manufacturing Make or Buy?* Opgehaald van am-power.de: <http://am-power.de/insights/>

- P., A. (2019). Opgehaald van 3dnatives: <https://www.3dnatives.com/en/direct-metal-laser-sintering100420174-2/#!>
- Power bed fusion*. (2019). Opgehaald van <https://www.digitalalloys.com/blog/powder-bed-fusion/>
- R.J.Friel R.A.Harris. (2013). Ultrasonic Additive Manufacturing – A Hybrid Production Process for Novel Functional Products. *Elsevier*.
- Redwood, B. (sd). *Additive manufacturing technologies: An overview*. Opgehaald van 3dhubs: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- sculpteo.com. (2020, november 3). *en/materials/metal-casting-material/*. Opgehaald van sculpteo.com: <https://www.sculpteo.com/en/materials/metal-casting-material/>
- Strömbergsson, A. (2020). Opgehaald van 3dprintingmedia: <https://www.3dprintingmedia.network/hybrid-uam-pbf-ultrasonic-additive-manufacturing-meets-powder-bed-fusion/>
- Varotsis, A. B. (2020, november 4). *Introduction to binder jetting 3D printing*. Opgehaald van 3dhubs.com: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#characteristics>
- Varotsis, A. B. (sd). Introduction to binder jetting 3D printing. *Manufacturing Processes Explained*. 3dhubs.com, z.d.
- What is powder bed fusion*. (sd). Opgehaald van twi-global: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion>,
- Wohlers, T. (2019). *Wohlers report: 3D-printing and additive manufacturing*.