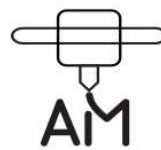


Lectoraat Kunststoftechnologie

AMBITION

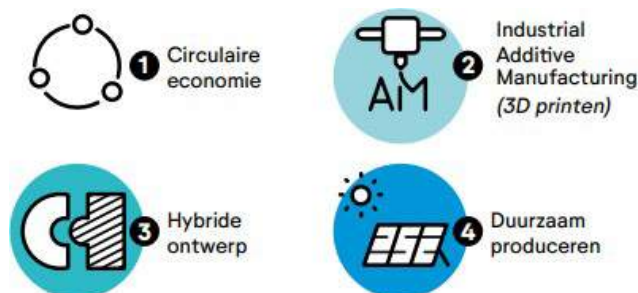
Deel 1: Business Case

**Hoe Nederlandse bedrijven gebruik maken van
3D-metaalprinten**



Colofon

Titel:	AMBITION Deel 1: Business Case
Ondertitel:	Hoe Nederlandse bedrijven gebruik maken van 3D-metaalprinten
Publicatie nummer:	LKT-AM-108685-22-01
Publicatiedatum:	Maart 2022
Auteurs:	E. Roetman, G. Heideman, T. Stobbe
Subsidieverstrekker:	GreenPAC Polymer Application Centre
Fotografie:	Hogeschool Windesheim
Onderzoekslijnen:	



Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL-niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.



Samenvatting

3D-metaalprinten is in opkomst en biedt nieuwe mogelijkheden voor Nederlandse bedrijven. Met 3D-metaalprinten kunnen unieke producten worden gemaakt die vaak niet geproduceerd kunnen worden met andere technieken. Ook kunnen nieuwe diensten worden ontwikkeld, zoals het printen van metalen vervangingsonderdelen in plaats van alle onderdelen in voorraad houden. De belangrijkste kansen liggen dan ook bij de nieuwe producten en diensten; niet bij het kopiëren van producten die nu met conventionele technieken vervaardigd worden. 3D-metaalprinten biedt hierdoor veel kansen voor innovatie. Deze publicatie is tot stand gekomen door een onderzoek naar 3D-metaalprinten van 2019 tot 2021. Dit onderzoek is uitgevoerd door onderzoekers, docenten en studenten van Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven. Binnen dit project is ook onderzoek gedaan vanuit een bedrijfskundig perspectief waarbij de volgende drie onderwerpen zijn onderzocht:

- Verandermanagement binnen bedrijven om 3D-metaalprinten mogelijk te maken;
- De toegevoegde waarde van de verschillende 3D-metaalprinttechnieken;
- Kostenberekeningen van 3D-metaalprinten.

Voor het onderzoek naar deze onderwerpen zijn kwalitatieve interviews afgenomen, aangevuld met bevindingen uit de literatuur.

Uit het deelonderzoek naar verandermanagement kwam duidelijk naar voren dat de 3D-printtechniek slechts één onderdeel is van de business case. Om deze reden zijn in de praktijk niet alleen de ingenieurs betrokken bij het 3D-printen maar vaak meerdere afdelingen in een organisatie. Dit vraagt dan ook om een grotere inzet dan het éénmalig 'inrichten' of klaarstomen van een organisatie. Vaak is een langdurig veranderproces nodig om de business case tot een succes te maken. Tegelijk werd dit door de geïnterviewde bedrijven ook gezien als een kans om medewerkers te betrekken bij de ontwikkeling. Dit leidde soms tot een andere invulling van de businesscase en inzet van de techniek doordat er nieuwe inzichten kwamen vanuit de organisatie.

Het deelonderzoek naar de verschillende 3D-metaalprinttechnieken maakte inzichtelijk dat de technieken specifieke voordelen hebben. De technieken zijn daarom geschikt voor verschillende toepassingen en markten. Als een bedrijf begint met 3D-metaalprinten kan het lastig zijn om de juiste keuze te maken voor een 3D-metaalprinter. Dat komt mede doordat de business case van veel zaken (en aannames) afhankelijk is. Zeker als de techniek voor bedrijven nog relatief onbekend is dan is het advies om eerst producten te laten printen bij een 3D-printservice. Zo kan een bedrijf experimenteren met de techniek, een business case ontwikkelen en de organisatie meer geleidelijk voorbereiden op het 3D-metaalprinten. Als meer kennis en ervaring is opgedaan over het 3D-metaalprinten kan er ook een beter overwogen keuze worden gemaakt voor een bepaalde 3D-metaal printtechniek, de benodigde print capaciteit en de meest geschikte leverancier.

Het deelonderzoek naar kostenberekeningen liet zien dat het belangrijk is om het complete bedrijfsproces in kaart te brengen om de verschillende directe en indirecte kosten te identificeren. De hoogte van de verschillende proceskosten is vaak niet direct te berekenen en hiervoor moeten diverse aannames worden genomen. Een voorbeeld is de prognose van het aantal uren dat een 3D-printer jaarlijks wordt gebruikt om producten te printen voor klanten. Een advies aan bedrijven is om dit soort kostenposten nauwgezet te monitoren om zo goed zicht te houden op de werkelijke kosten.



Inhoudsopgave

1. Bedrijfskundige perspectieven op 3D- metaalprinten	5
Deelonderzoeken voor beantwoorden praktijkvragen.....	6
2. Technische en managementvraagstukken over 3D-metaalprinten	8
Altijd investeren in 3D-metaalprinten?	10
Conclusie: de noodzaak van een management perspectief op 3D-metaalprinten.....	11
3. Innovatieprocessen en verandermanagementvoor 3D-metaalprinten	12
Veranderprocessen in organisaties	13
Stap één: urgentie creëren	14
Stap twee: organisatie van het veranderproces	14
Stap drie: ontwikkeling van een visie en strategie	15
Stap vier: draagvlak creëren en de visie communiceren: oud versus nieuw vakmanschap	15
Stap vijf: creëren van een Leeromgeving	16
Conclusies over verandermanagement	17
4. Toegevoegde waarde van de diverse 3D-metaalprint technieken	18
3D-metaalprinten is een verzamelwoord	18
Toepassingsmogelijkheden.....	22
Printtechnieken en markten.....	23
Belangrijkste kosten van printtechnieken	24
Risico's en kansen van printtechnieken in vijf tot tien jaar	26
Conclusie en aanbevelingen	27
5. Effectief kostprijzen berekenen voor 3D-metaalprinten.....	28
Doelstellingen voor kostprijsberekeningen	29
Voorbeeld Screw Cap - MOBA	30
Veelvoorkomende kosten bij 3D-metaalprinten.....	31
Type kosten en verdeelsleutels	32
Methodes voor kostprijsberekeningen.....	33
Equivalentiemethode	33
Opslagmethode	34
Activity based costing	35
(On)nauwkeurigheid van kostprijsberekeningen	37
Verdeelsleutels bij 3D-metaalprinten	38
Schijnbaar directe kosten: materiaalkosten, energiekosten en personeelskosten	41
De grootste indirecte kostenpost: printerkosten	42
Conclusie	43
Nawoord	44
Referenties	45
In samenwerking met	49



1. Bedrijfskundige perspectieven op 3D-metaalprinten

3D-printen in opkomst

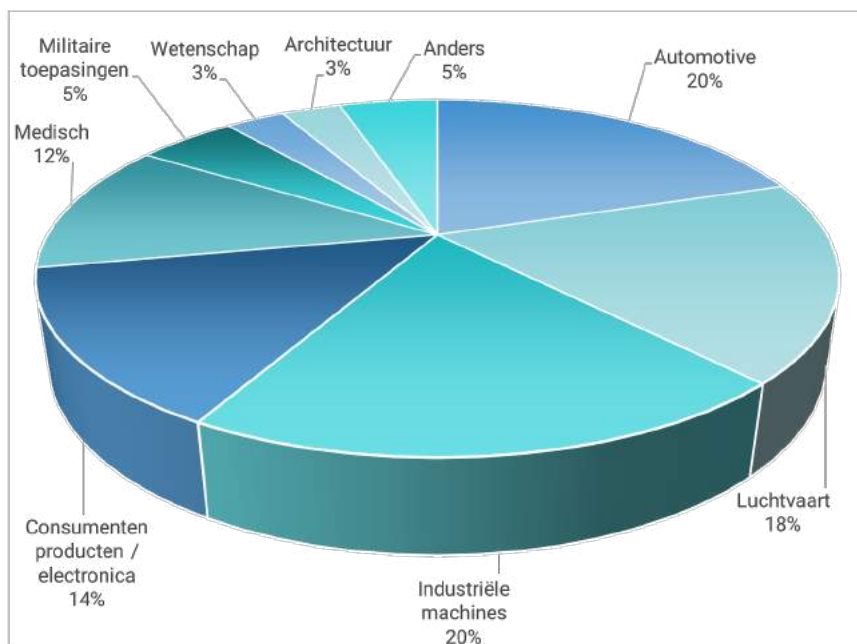
In de afgelopen decennia is 3D-printen opgekomen als een bepalende technologische ontwikkeling. Aanvankelijk was deze techniek vooral gericht op het maken van prototypes en kleine series, maar inmiddels is de technologie volwassen geworden. Door middel van 3D-printen kunnen producten worden geprint met unieke eigenschappen die met geen enkele andere techniek te maken zijn. De technologie van het 3D-metaalprinten is dan ook wereldwijd in opkomst. Dit blijkt onder andere op basis van een marktonderzoek van AMPower. In 2016 werd de mondiale 3D-metaalprint markt geschat op 880 miljoen euro. In 2019 was deze markt ruim verdubbeld tot 2,02 miljard euro. De verwachting is dat de markt tot 2024 met gemiddeld 27,9% per jaar zal blijven groeien (AMPower 2020).

3D-printen staat centraal in zoveel nieuwe ontwikkelingen dat de techniek niet meer weg te denken is in de industrie. De technologie wordt steeds vaker toegepast in hightech markten, zoals de lucht- en ruimtevaarttechniek en de automobiellindustrie voor het vervaardigen van geavanceerde, vaak lichtgewicht onderdelen. Zo heeft de Formule 1 racewagen van Alfa Romeo al 150 onderdelen die zijn vervaardigd met een 3D-metaalprinter (AM 2022). Ook wordt de techniek gebruikt in de medische sector om bijvoorbeeld unieke protheses te maken die precies passen in het lichaam van een patiënt. In de maakindustrie wordt de techniek steeds vaker ingezet voor diverse toepassingen, zoals geoptimaliseerde machineonderdelen of zeer duurzame lichtgewicht grippers op robotarmen. Door 3D-printen kan het aantal onderdelen (en dus ook verbindingen) worden geminimaliseerd waardoor deze steeds betere en energiezuinige machineonderdelen gefabriceerd worden (Duda and Venkat Raghavan 2016).

De ontwikkeling van het 3D-printen staat ondertussen niet stil. Nog ieder jaar worden nieuwe industriële printers gelanceerd die sneller, nauwkeuriger of goedkoper zijn. Ook de software om producten te ontwerpen en printers aan te sturen wordt steeds verder ontwikkeld, waardoor de mogelijkheden steeds verder worden vergroot. Daarnaast wordt het ook mogelijk om te printen met steeds meer verschillende materialen. Naast thermoplastische kunststoffen wordt er onder andere geprint met verschillende composieten, keramiek, glas en legeringen. De ontwikkeling wordt ook versneld doordat 3D-printen steeds dieper is ingebed in de industrie en samenleving; er zijn een groot aantal dienstverleners die in opdracht producten printen, de gangbare software om producten te ontwerpen is ook geschikt voor 3D-printen, en leren steeds meer studenten tijdens hun studie hoe producten met industriële 3D-printers worden vervaardigd (Alhamad, Ahmed et al. 2019).

Een belangrijke ontwikkeling in de afgelopen jaren is de opkomst van het 3D-metaalprinten; dat is een ontwikkeling van verschillende nieuwe 3D-printtechnieken die het mogelijk maken om met verschillende metalen en legeringen te printen. De verwachtingen van deze techniek zijn hooggespannen omdat dit, net als bij de kunststoffen, bedrijven vele nieuwe mogelijkheden biedt voor het maken van nieuw ontworpen en geoptimaliseerde producten. Daarnaast kan het ook de bedrijfsmodellen transformeren, door nieuwe vormen van dienstverlening, pasklare producten en geoptimaliseerde bedrijfsprocessen. Zo zijn er bedrijven die niet meer alle reserveproducten op de plank hebben liggen maar experimenteren met 3D-printen van deze onderdelen op verzoek (Nichols 2019), (Shahrubudina, Lee et al. 2019).





Figuur 1.1 Gebruik van 3D-metaalprinten in diverse markten (Vafadar, Guzzomi et al. 2021)

Ondanks dat 3D-printen enorm in opkomst is, loopt het Nederlandse MKB op basis van de nationale cijfers niet voorop in deze ontwikkeling. Uit onderzoek van het CBS blijkt dat slechts 11% van de Nederlandse industriële bedrijven gebruik maakte van 3D-printen (CBS 2017). Dat aandeel is de afgelopen jaren sterk aan het toenemen. Dit is echter vooral het printen van kunststoffen, want 3D-metaalprinten is minder gangbaar in Nederland dan het printen met kunststoffen (ReicheltElektronik 2020). 3D-metaalprinten wordt in Nederland dus nog maar beperkt toegepast; dat biedt kansen maar daardoor liggen er ook nog belangrijke praktijkvragen.

Deelonderzoeken voor beantwoorden praktijkvragen

Bij bedrijven spelen nog verschillende vragen over hoe zij de potentie van 3D-metaalprinten effectief kunnen benutten. Dit zijn niet alleen technische vragen maar juist ook bedrijfskundige vragen, waaronder ook veel vragen over bedrijfsculturen en verandermanagement. Om dit soort vragen te kunnen beantwoorden, zijn binnen dit onderzoeksproject over 3D-metaalprinten ook deelonderzoeken uitgevoerd naar de meer bedrijfskundige aspecten van dit onderwerp.

Dit hoofdstuk beschrijft het onderzoek naar de bedrijven die 3D-metaalprinten hebben geïntroduceerd voordat het een mainstream-technologie is geworden. Het belicht dit onderwerp vanuit een meer bedrijfskundige benadering. Het is gebaseerd op een onderzoek naar de wijze waarop verschillende bedrijven hun organisatie klaarmaken voor 3D-metaalprinten en de kansen en uitdagingen die hierbij kwamen kijken.

Allereerst zijn de bedrijfskundige vragen van bedrijven geïnventariseerd tijdens enkele bijeenkomsten. Enkele vaak terugkomende praktijkvragen waren:

- Hoe betrekken we medewerkers en afdelingen binnen ons bedrijf bij het 3D- metaalprinten?
- Hoe brengen we de directe en indirecte activiteiten en kosten rondom 3D-metaalprinten duidelijk in beeld?
- Hoe kunnen we de meerwaarde van de verschillende 3D-metaaltechnieken inzichtelijk maken?

Deze vragen zijn beantwoord door verschillende deelonderzoeken, waarvan de belangrijkste uitkomsten kort zijn beschreven in dit hoofdstuk. Het gaat hierbij om de volgende deelonderzoeken:

- Verandermanagement in bedrijven om 3D-metaalprinten mogelijk te maken;
- Kostprijsberekeningen van 3D-metaalprinten;
- De toegevoegde waarde van de verschillende 3D-metaalprinttechnieken.

Deze deelonderzoeken zijn gebaseerd op literatuuronderzoek en interviews met bedrijven in Nederland over 3D-metaalprinten. Dit hoofdstuk heeft als doel om een toegankelijke tekst te presenteren voor een breed publiek en is daarom niet geschreven als een wetenschappelijke publicatie. In de tekst wordt ingegaan op de resultaten die relevant zijn voor het Nederlandse bedrijfsleven en (andere) organisaties die betrokken zijn bij 3D-metaalprinten. De theoretische onderbouwing en methodologie is daarom niet in detail beschreven, zoals dat gedaan is in deelrapporten waarop deze publicatie is gebaseerd.

Doordat de oorspronkelijke interviews soms ook over bedrijfsspecifieke zaken zijn gegaan, is dit rapport zo geschreven dat informatie in geen geval herleidbaar is tot een specifiek bedrijf of persoon, tenzij hiervoor nadrukkelijk toestemming is gevraagd aan de respondent. Er worden om die reden geen cases gepresenteerd van hoe bedrijven in de praktijk omgaan met 3D-metaalprinten maar wordt een meer algemeen beeld gegeven van de zaken die spelen bij verschillende Nederlandse bedrijven.



2. Technische en managementvraagstukken over 3D-metaalprinten

3D-(metaal)printen is meer dan alleen een technische ontwikkeling binnen een bedrijf; het is een ontwikkeling die ook invloed zal hebben op de dienstverlening en de organisatie van de interne processen in een bedrijf. Een simpel voorbeeld is een bedrijf dat niet langer reserveonderdelen op voorraad heeft maar deze gaat printen. Er is dan minder opslagruimte nodig zolang er directe beschikking heeft over een 3D-printer van het bedrijf of een 'print on demand' dienstverlener. Het totale voorraadbeheer wordt dus anders georganiseerd; iets waar de meeste afdelingen binnen een bedrijf mee te maken krijgen. Tegelijk maakt dit voorbeeld duidelijk dat 3D-printen een ontwikkeling mogelijk maakt, maar ook dat de techniek nog steeds een onderdeel is van het businessmodel van een bedrijf.

Een van de deelonderzoeken binnen het onderzoeksproject over 3D-metaalprinten richtte zich op de vraag wanneer 3D-metaalprinttechnieken geschikt zijn voor bedrijven als productietechniek.

Er zijn bij de interviews zowel vragen gesteld over de technische kansen en uitdagingen als de meer bedrijfskundige aspecten van 3D-metaal printen die speelden binnen de bedrijven van de respondenten.

Op basis van dit onderzoek zijn een aantal duidelijke voordelen geïdentificeerd die 3D-metaalprinten biedt aan bedrijven. Deze voordelen zijn opgesomd in vier verschillende categorieën:

1. Voordelen voor het ontwerpproces
2. Voordelen voor productie en de producten die hieruit voortkomen
3. Voordelen voor klanten
4. Economische voordelen voor het bedrijf

In het onderstaande figuur zijn deze benoemde voordelen samengevat onder deze vier categorieën. Ook is de relatie tussen deze voordelen door middel van enkele pijlen weergegeven.



Figuur 2.1 Diverse voordelen van 3D-metaalprinten

Er zijn *voordelen voor het ontwerpproces*, waarbij de ontwerper nieuwe mogelijkheden heeft om een product te ontwerpen:

- *Ontwerpvrijheid/vormvrijheid*: Ontwerpers zijn minder gebonden aan de randvoorwaarden van conventionele metaalbewerkingstechnieken. Hierdoor zijn er nieuwe mogelijkheden voor niet of lastig produceerbare producten om maatwerk te leveren.
- *Materiaalkeuze*: Ontwerpers kunnen kiezen voor verschillende metalen voor het 3D-metaalprinten, die niet altijd mogelijk zijn met andere bewerkingstechnieken;

Dit resulteert in enkele *voordelen van geprinte producten* die alleen kunnen worden behaald dankzij het printproces:

- *Gewichtsreductie*: onderdelen kunnen geproduceerd worden met een licht gewicht door bijvoorbeeld gebruik te maken van bijvoorbeeld topologie-optimalisatie of lattice structuren;
- *Samenvoegen van onderdelen*: in de praktijk bestaan producten vaak uit meerdere onderdelen die geassembleerd moeten worden. Door gebruik te maken van 3D-metaalprinten kunnen losse onderdelen samengevoegd worden tot één onderdeel, waardoor geen verbindingen nodig zijn en producten niet geassembleerd hoeven te worden;
- *Complexe vormen*: doordat er in complexe vormen geprint kan worden, kunnen producten gemaakt worden die voorheen simpelweg niet mogelijk waren, doordat bijvoorbeeld bepaalde krommingen in het materiaal zijn aangebracht.
- *Doorlooptijd*: Bedrijven kunnen in een relatief korte tijd een product printen of, in sommige gevallen, het productieproces versimpelen. Dat kan bijvoorbeeld doordat gebruik van mallen niet langer nodig is.

Door het ontwerp- en printproces kan beter worden ingespeeld op de eisen en wensen van (interne en externe klanten:

- Door gebruik te maken van 3D-metaalprinten kunnen producten gemaakt worden die beter voldoen aan de eisen en wensen van klanten doordat de voordelen van het ontwerp- en printproces worden benut;
- Daarnaast is het mogelijk om een betere dienstverlening te bieden aan klanten. Dat kan bijvoorbeeld door het sneller leveren van producten of het bieden van maatwerkoplossingen.

Als laatste zijn er in het onderzoek nog verschillende *economische voordelen* geïdentificeerd voor bedrijven:

- De kosten van het productieproces kunnen in sommige situaties worden verminderd
- De financiële waarde van producten worden verhoogd
- Nieuwe klantsegmenten kunnen worden bereikt, waardoor bedrijven hun markt kunnen vergroten.

Een belangrijke kanttekening bij bovengenoemde economische voordelen kwam duidelijk naar voren bij een ander deelonderzoek over verandermanagement. Uit de interviews bleek dat bedrijven niet alleen investeren in 3D-metaalprinten om daarmee directe financiële doelen te behalen maar ze benoemden ook strategische doelen, waaronder:

- Marktaandeel kunnen vergroten door nieuwe markten te betreden;
- Het bedrijf meer aantrekkelijk maken voor studenten en potentiële medewerkers;
- Verminderen van de voorraad van reserveonderdelen door deze onderdelen te gaan printen;
- Onderdelen printen voor de productie binnen het eigen bedrijf, zodat bijvoorbeeld meer geavanceerde producten verkocht kunnen worden, of producten die moeilijker te kopiëren zijn voor concurrenten.

Er zijn dus door deze respondenten al meerdere verschillende strategische doelen en redenen genoemd waarom bedrijven investeren in 3D-metaalprinten. Het zijn soms zelf niet voor-de-hand-liggende doelen, zoals het aantrekken van studenten. Er is ook niet altijd direct een financieel doel; de techniek wordt in enkele gevallen vooral ontwikkeld voor het behalen van lange termijn doelen, of als ondersteuning van productieprocessen. Bedrijven kijken dus niet alleen naar het directe financiële rendement maar ook naar de rol die 3D-metaalprinten kan spelen binnen een bredere bedrijfsstrategie.



Altijd investeren in 3D-metaalprinten?

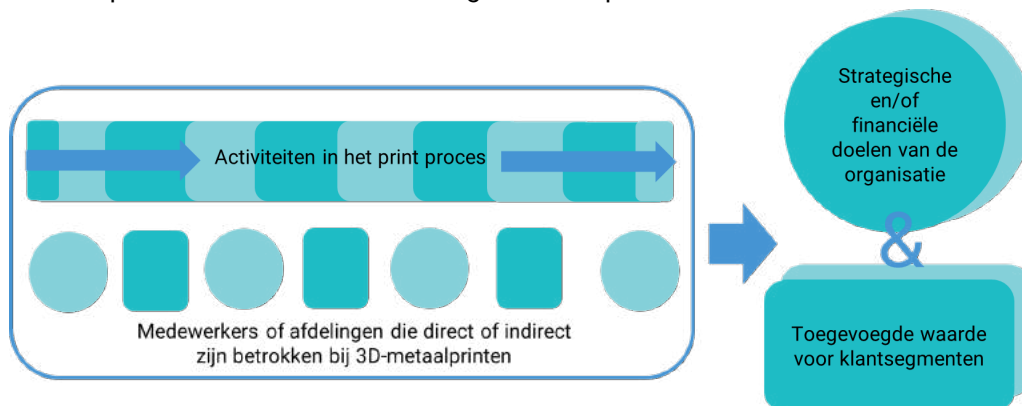
3D-metaalprinten biedt dus duidelijke voordelen voor bedrijven maar deze kunnen niet in alle situaties worden benut. Als bijvoorbeeld producten goedkoop en eenvoudig met conventionele technieken al gemaakt worden dan is 3D-metaalprinten snel een minder economisch alternatief. Het is dus belangrijk dat de voordelen benut kunnen worden. Daarnaast zijn er ook enkele zaken waar nadrukkelijk rekening mee moet worden gehouden bij 3D-metaalprinten:

- In sommige situaties moet er support worden aangebracht om het onderdeel te ondersteunen tijdens het printproces. Als dit nodig is, moet dit nadien worden verwijderd. Dit is een extra handeling en daarbij moet tijdens het printproces extra materiaal worden aangebracht voor het printen van de supportstructuur van het product.
- Het oppervlak van geprinte producten is in de regel ruwer dan wanneer producten worden gemaakt met conventionele technieken. Dit kan worden verholpen door (enkele vlakken van) het product na te bewerken, met bijvoorbeeld een CNC-frees. Als grote oppervlaktes zeer glad afgewerkt moeten worden kan dit leiden tot aanmerkelijke extra kosten. Dit maakt het 3D-metaalprinten minder geschikt voor bijvoorbeeld de productie van serie producten met een eenvoudige (niet-complexe) vormgeving.
- Doordat het een relatief nieuwe verwerkingstechniek is, zijn er nog verschillende zaken onbekend. Zo is bij verschillende materialen nog niet bekend wat slijtage-eigenschappen zijn;
- Andere kennis en vaardigheden zijn nodig in een bedrijf dat (ook) 3D-metaalprint dan bij bedrijven die alleen werken met conventionele metaalbewerkingstechnieken. Dit vraagt om andere competenties binnen een organisatie. Het opbouwen van deze competenties vraagt om een investering en vaak een langdurig veranderingsproces.
- 3D-metaalprinten is feitelijk een verzameling is van verschillende technieken. Het is belangrijk om de verschillen van deze technieken te kennen, zodat gewerkt kan worden met een techniek die het beste past bij een businesscase.

3D-metaalprinten is dus geen techniek die de al bestaande metaaltechnieken overbodig maakt. Het is voor de meeste bedrijven een techniek die een goede aanvulling is op de bestaande technieken doordat het nieuwe mogelijkheden biedt. Tegelijk kent ook deze techniek beperkingen. In sommige gevallen zijn producten goedkoper en sneller te produceren met de meer conventionele technieken.

Conclusie: de noodzaak van een management perspectief op 3D-metaalprinten

In dit deelonderzoek komt duidelijk naar voren dat er niet alleen technische vragen spelen bij het 3D-metaalprinten, maar juist ook organisatie-brede managementvraagstukken. Dit zijn kansen maar ook belangrijke uitdagingen voor organisaties die niet alleen een impact hebben op het werk van verkopers, kwaliteitscontroleurs of de financiële boekhouding. Uiteindelijk moet 3D-metaalprinten kunnen bijdragen aan de financiële doelen en/of strategische van de organisatie. De bedrijfsstrategie is dan leidend en 3D-metaalprinten zou binnen deze strategie moeten passen.



Figuur 2.2 Schematische weergave printproces vanuit een bedrijfskundig perspectief

Samengevat is het management van 3D-metaalprinten: het betrekken, organiseren, verbeteren en afstemmen van verschillende functies in een bedrijfsproces zodat producten worden geprint (1) met een meerwaarde voor klanten in geselecteerde marktsegmenten, en (2) zodat het bijdraagt aan de strategische en/of financiële doelen van de organisatie¹.

¹ Deze definitie is deels geïnspireerd vanuit de management discipline 'Business Process Management'. De management discipline business procesmanagement (BPM) gaat specifiek over het managen van processen. Een gangbare definitie van BPM is: "Business process management (BPM) is a discipline involving any combination of modeling, automation, execution, control, measurement, and optimization of business activity flows, in support of enterprise goals, spanning systems, employees, customers and partners within and beyond the enterprise boundaries". Palmer, N. (2018). "What is BPM?". from <https://bpm.com/what-is-bpm>.

3. Innovatieprocessen en verandermanagementvoor 3D-metaalprinten

Marktanalisten verwachten dat de mondiale markt voor 3D-metaalprinten groeit van \$ 147,2 miljoen Euro in 2018 naar \$ 796,3 miljoen euro in 2026 (Choudhary and Prasad 2020). Dit is een snelle marktontwikkeling die zakelijke kansen kan bieden aan bedrijven; een disruptive innovation (Beltagui 2020). Ook in Nederland wordt veel verwacht van deze techniek. Uit een onderzoek van de brancheorganisatie Flam3D blijkt dat het Nederlandse en Vlaamse bedrijfsleven de investeringen op de korte termijn met 23 procent wil opvoeren (Binon 2021).

3D-metaalprinten wordt dus een 'disruptive technology' genoemd, ofwel een technologie die drastisch verandert hoe bedrijven opereren en interactie hebben met klanten. Deze snelle verandering biedt nieuwe kansen aan innovatieve bedrijven. Echter, een disruptive technology wordt niet alleen door de technologie zelf een succes. Bedrijven moeten slim gebruik weten te maken van de technologie door dit te vertalen naar slimme oplossingen voor klanten met bijpassende verdienmodellen (Danneels 2004). Uit onderzoek naar 'disruptive innovation' is gebleken dat zo'n innovatie geen gelukstreffer is maar veelal een innovatieproces van vele jaren. Het is in het begin vaak gericht op niche markten, waarna een bedrijf geleidelijk de marktomvang laat groeien (Christensen, Raynor et al. 2015). Deze benadering is echter geen garantie voor succes; laat staan dat innovatieve bedrijven altijd marktleider worden in hun industrie (Lepore 2014). Het innovatieproces is dan ook geen opschaalproces maar een intensief proces waarin bedrijven steeds opnieuw moeten inspelen op allerlei ontwikkelingen.

Een dergelijk innovatieproces vraagt binnen een bestaande organisatie niet alleen om een betrokkenheid van de directie en enkele technische ingenieurs uit de organisatie maar juist ook van de verschillende andere afdelingen, zoals een verkoopafdeling. Het betrekken en organiseren van de verschillende afdelingen is een belangrijke eerste stap in een innovatieproces. Binnen verschillende bedrijven was dit tegelijk ook al de eerste grote uitdaging. Niet iedereen binnen een organisatie ziet de kansen die een innovatie kan brengen voor de toekomst, wat direct al kan leiden tot tegenwerking.

Bij een bijeenkomst over dit onderzoeksproject met verschillende bedrijven in januari 2020 werd het onderwerp van verandermanagement en cultuurverandering binnen bedrijven als belangrijk onderwerp gepositioneerd door de aanwezige bedrijven. Verschillende aanwezigen zeiden zelfs dat het betrekken en organiseren van de organisatie rondom 3D-metaalprinten de meest belangrijkste bedrijfskundige uitdaging was van dat moment.

In de daaropvolgende maanden is een onderzoek uitgevoerd door verschillende bedrijven te interviewen die vooropliepen bij de introductie van 3D-metaalprinten. Managers en ingenieurs van verschillende Nederlandse bedrijven zijn gevraagd hoe zij samen met hun collega's de introductie van 3D-metaalprinten hebben aangepakt. Hen werd onder andere gevraagd wat de belangrijkste successen waren, maar ook welke weerstanden er waren in hun organisatie en wat ze gedaan hebben met deze weerstanden. Het doel van het onderzoek was niet om de organisaties of de innovatieprocessen te evalueren. Het doel was bovenal om de verschillende ervaringen te inventariseren die zijn opgedaan tijdens dit proces zodat bedrijven kunnen leren van elkaars ervaringen.

Veranderprocessen in organisaties

Er zijn geen succesformules voor het leiden van veranderingsprocessen in organisaties. Marco de Witte en Jan Jonker beschreven verandermanagement daarom zelfs als 'fietsen in mul zand'; een intensief en vaak langdurig proces dat een grote inspanning vraagt van mensen in een organisatie (de Witte and Jonker 2013). Ondanks dat er geen blauwdrukken bestaan voor veranderingsprocessen, zijn er wel een aantal elementen die veelal terugkomen in dit soort processen (de Witte and Jonker 2013). Een bekend, veel gebruikt model voor verandermanagement dat een aantal van deze elementen duidelijk omschrijft is het 'Change Management Model' van John Kotter. In dit model worden een aantal fases beschreven die een organisatie doorloopt als een ingrijpende verandering wordt doorgevoerd. Dit model is geen vast stappenplan maar een iteratief proces; in andere woorden: regelmatig moet er worden teruggekeerd naar een eerdere fase om verder te kunnen (Kotter 1995). De acht fases uit het model staan in het onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 3.1 Verschillende fases van verandermanagement in het model van Kotter

Voor het onderzoek naar verandermanagement zijn respondenten van verschillende bedrijven geïnterviewd. 3D-metaalprinten was voor al deze bedrijven een nieuwe ontwikkeling. Dat betekent dat er een verandering werd ingezet maar dat er ook bij het management en de betrokken ingenieurs ook nog verschillende vragen speelden over de techniek en de toepassing. Het was dus nergens een uitgestippelde route maar eerder een leerproces dat soms soepel verliep maar in andere gevallen met vallen en opstaan werd doorlopen. 3D-metaalprinten was voor de meeste bedrijven nog een relatief nieuwe techniek en zij zaten midden in het veranderproces toen de interviews plaatsvonden. Om deze reden, lag de focus van het onderzoek in het bijzonder op de zes eerste fases van het model van Kotter. In dit hoofdstuk worden daarom de stappen van het model beschreven en is er per stap opgeschreven wat de belangrijkste bevindingen zijn geweest tijdens het onderzoek.

Stap één: urgentie creëren

Volgens het model van Kotter is de eerste belangrijke stap bij verandermanagement het creëren van een urgentie in de organisatie. Als er geen urgentie is, ervaren mensen ook niet de noodzaak om te veranderen; het kan bij business-as-usual blijven. Op het moment dat er een noodzaak is volgens het management van een bedrijf, betekent het niet dat er ook een duidelijk besef van urgentie is bij alle andere betrokken medewerkers in de organisatie. Volgens Kotter moet overal in de organisatie een zeker gevoel van urgentie zijn, wil een innovatie kunnen slagen.

Het creëren van een urgentie betekent ook dat de huidige gang van zaken niet onbesproken kan blijven. Dit kan direct al leiden tot forse weerstand in de organisatie en volgens onderzoek van Kotter faalt daardoor de helft van alle organisaties bij het creëren van een urgentie. De urgentie wordt meestal niet alleen bereikt door het laten zien van de harde data maar ook door het laten zien van een ander perspectief op de organisatie, zoals het perspectief van klanten, concurrerende bedrijven of een vergelijkbare situatie in een andere industrie (Kotter 1995).

In dit onderzoeksproject hadden de geïnterviewde bedrijven uiteenlopende redenen om te gaan werken met 3D-metaalprinten. Er werd ook een andere urgentie ervaren. De aanleiding kon zijn dat een bestaande markt moest worden verbreed, de kosten van reserve-onderdelen moesten worden verlaagd, of dat het bedrijf aantrekkelijk moest worden voor nieuwe, jonge medewerkers. Er was dus een grote diversiteit aan redenen waarom deze techniek urgent was voor het bedrijf.

Volgens de geïnterviewde medewerkers probeerden zij niet alleen de urgentie te creëren door grote problemen aan te wijzen. Ze probeerden juist ook collega's te overtuigen door het tonen van veel enthousiasme en de kansen van de techniek te belichten.

Er was soms weerstand bij medewerkers die al een groot deel van hun werkzame leven met conventionele metaaltechnieken hadden gewerkt. Zij zagen niet de meerwaarde van een nieuwe techniek en in enkele gevallen ervoeren zij dit zelfs als een bedreiging voor hun eigen baan. In enkele gevallen kon de weerstand worden weggehaald door te luisteren naar de argumenten van deze medewerkers en bijvoorbeeld duidelijk te maken dat 3D-printen geen vervanging maar een aanvulling was op de conventionele metaalbewerkingstechnieken. Daarnaast werd er in een geval waardering uitgesproken voor de mensen die werken met conventionele technieken mede om zo nog extra te benadrukken dat het niet de bedoeling was om ze te vervangen. Ook werd 3D-metaalprinten met verschillende afdelingen besproken om samen te kijken wat de techniek deze mensen te bieden had.

In de praktijk werd er dus binnen deze bedrijven meer gedaan dan alleen een urgentie gecreëerd. Het was vaak een aanleiding voor gesprekken over de toekomst van de organisaties en de rol van medewerkers binnen deze organisaties.

Stap twee: organisatie van het veranderproces

De tweede fase in het model van Kotter is het organiseren van een veranderproces in een organisatie. Dat begint door het vormen van een groep mensen die (formeel of informeel) een grote invloed hebben binnen de organisatie. Met deze groep mensen kunnen plannen worden gemaakt om mensen in de organisatie in beweging te krijgen.

Het veranderproces van 3D-metaalprinten was op verschillende manieren georganiseerd binnen de geïnterviewde bedrijven: bij één bedrijf was eerst een aparte business unit opgezet maar bij de andere bedrijven was het 3D-printproces georganiseerd binnen het bedrijf. In enkele gevallen was het georganiseerd als een apart project waarvoor een projectleider was aangesteld. In andere gevallen werd het binnen de bestaande structuur georganiseerd. Respondenten in dit onderzoek gaven aan dat het introduceren van 3D-metaalprinten in hun bedrijf veel tijd en energie vroeg. Eén respondent gaf zelfs aan dat het soms voelde als een tweede baan om zo'n veranderproces te helpen organiseren binnen zijn bedrijf.

In veel gevallen was het een uitdaging dat bedrijven zowel de organisatie bij het 3D-printen wilden betrekken maar dat soms het kernteam zelf de techniek nog moest leren beheersen. Doordat er tijdens dit leerproces ook nog geëxperimenteerd werd en fouten werden gemaakt, leidde dit soms tot een negatieve perceptie over de mogelijkheden van 3D-metaalprinten in de organisatie. Om deze reden werd het innovatieproces soms anders georganiseerd. Er werd dan eerst een projectgroep opgericht die ging experimenteren met de technologie voordat de rest van de organisatie erbij werd betrokken. Een kanttekening hierbij was dat deze aanpak vooral gevolgd werd door bedrijven die toegang hadden tot een 3D-metaalprinter op een andere locatie. Deze aanpak werkt minder goed werkt als er al een 3D-printer is aangeschaft omdat het plaatsen van een industriële printer al gelijk verwachtingen wekt binnen een bedrijf.

Stap drie: ontwikkeling van een visie en strategie

De derde fase is het ontwikkelen van een duidelijke visie en strategie; een duidelijk plan om de verschillende mensen te betrekken in de verandering van de organisatie. Bij de meeste bedrijven werd er al een strategie ontwikkeld voordat er daadwerkelijk met de techniek werd gewerkt. Maar bij de interviews met bedrijven kwam naar voren dat er een groot verschil was tussen de verkennende gesprekken voordat deze nieuwe techniek werd omarmd en de daadwerkelijke implementatie. Bij vrijwel alle bedrijven werd tijdens de verkennende gesprekken veelal positief gesproken over 'het idee' 3D- metaalprinten maar zodra er gewerkt werd met de techniek ontstond er vaak weerstand in bedrijven. Dat kwam mede doordat op dat moment bleek dat het 3D-metaalprinten vaak veel ingrijpender was dan vooraf was gedacht en hierover was gecommuniceerd. Mede daardoor werd soms de urgentie van het 3D-metaalprinten en de daarbij horende strategische doelen in twijfel getrokken. Tijdens interviews gaven verschillende respondenten dan ook aan dat de strategie om mensen te betrekken moest worden aangepast. In het begin werd vooral het algemene belang gecommuniceerd maar zodra er meer ervaring werd opgedaan, werd de communicatie gericht op specifieke groepen in de organisatie. Ook werd soms naar manieren gezocht om medewerkers actief te betrekken bij het 3D-printen. Een duidelijk voorbeeld is dat medewerkers bij één bedrijf gratis een klein ontwerp mochten laten printen op een 3D-printer. Zo hadden ze een persoonlijk voordeel én ervoeren ze het printproces.

Stap vier: draagvlak creëren en de visie communiceren: oud versus nieuw vakmanschap

De vierde fase is het creëren van duidelijke visie om zo draagvlak te krijgen binnen de organisatie. In het geval van 3D-metaalprinten gaat het er niet alleen om dat gecommuniceerd wordt wat het doel is met het printen maar ook de rol van andere metaalbewerkingstechnieken.

De bestaande metaalbewerkingstechnieken, zoals frezen en verspanen, worden in de meeste bedrijven gezien als een gewaardeerd vakmanschap. Voor 3D-metaalprinten zijn echter compleet andere vaardigheden nodig. Vooral onder medewerkers die al lang in het bedrijf of de metaalsector hadden gewerkt was er soms weinig urgentie om deze hele nieuwe techniek nog te gaan leren. Sterker nog, ze zagen het in enkele gevallen als een bedreiging van het vakmanschap. Een ander bezwaar vanuit de productie was dat medewerkers al hun werktijd nodig hadden om productie te draaien en geen tijd extra beschikbaar hadden om daarnaast deze nieuwe techniek te leren.

De weerstand vanuit medewerkers in de bedrijven liet dus zien dat als de techniek urgent was voor het bedrijf dat niet noodzakelijk een urgentie was voor de medewerkers in de bedrijven. Vanuit verschillende bedrijven werd dan ook de visie gedeeld dat 3D-metaalprinten een nieuwe, aanvullende techniek was op de bestaande metaalbewerking en geen vervanging.



Stap vijf: creëren van een Leeromgeving

De vijfde fase in het model van Kotter is het creëren van een leeromgeving binnen het bedrijf; een omgeving waarin mensen kunnen leren en zichtbare korte-termijn resultaten en successen kunnen worden behaald.

De bedrijven in dit onderzoek creëerden hiervoor een soort experimenteerplek waar medewerkers op vrijwillige basis met de techniek konden werken, zodat ze zelf ook de voordelen konden ervaren. Ook was het belangrijk dat medewerkers de geprinte producten met elkaar konden bespreken aan de hand van duidelijke vragen, zoals:

- Wat zijn de verschillen in de kwaliteit en gewicht? Wat is het verschil in productietijd?
- Wat voor producten kunnen gemaakt worden en waarvoor kunnen deze producten dienen?

Deze soort vragen moesten op een duidelijke en intuïtieve wijze beantwoord kunnen worden zodat iedereen ook zelf de verschillen kon zien en ervaren. Vanuit ander onderzoek naar verandermanagement is bekend dat dit niet éénmalig moet worden georganiseerd maar een aantal bijeenkomsten over een langere periode met tussendoor praktische opdrachten om het gevoel van urgentie vast te houden en ervoor te zorgen dat nieuwe kennis beklijft (Derwar and Keller 2009).

In plaats van het creëren van een standaard boodschap over de urgentie, gingen verschillende bedrijven juist op zoek met medewerkers naar de meerwaarde van 3D-metaalprinten voor het bedrijf.

Er was dus eerder sprake van een dialoog over de mogelijkheden van het 3D-metaalprinten dan een overtuigingsstrategie. Het was dus een communicatieproces waarbij de kansen en mogelijkheden maar ook de tekortkomingen werden besproken.

Diverse bedrijven probeerden ook de drempels te verlagen voor medewerkers om betrokken te worden bij 3D-metaalprinten. Dat gebeurde op verschillende manieren bij de geïnterviewde bedrijven:

- Medewerkers faciliteren bij het maken van producten door gebruik van 3D-metaalprinten
- Organiseren van trainingen voor medewerkers. Bij één bedrijf waren deze trainingen voor alle medewerkers toegankelijk om een zo breed mogelijk draagvlak te creëren;
- Het delen van informatie met medewerkers op verschillende manieren, zoals het regelmatig plaatsen van berichten en updates in nieuwsbrieven;
- Persoonlijke voordelen bieden aan medewerkers om ze aan te moedigen hun tijd en energie te investeren in 3D-metaalprinten. Zo mochten bij één bedrijf medewerkers (kleine) producten laten 3D-printen voor persoonlijk gebruik.

Het betrekken van medewerkers was dus duidelijk maatwerk, waarbij niet alleen werd gekeken naar de bedrijfsbelangen maar ook naar de specifieke belangen van medewerkers en afdelingen. De bedrijven kozen geen van allen voor een overtuigingsstrategie maar ze gebruiken verschillende methodes om medewerkers te motiveren en met ze te communiceren over de mogelijkheden.

Conclusies over verandermanagement

Uit alle interviews in het onderzoek bleek dat het verandermanagement voor 3D- metaalprinten een intensief proces was dat vaak moeilijk vooraf tot in de details is te plannen. Op het moment dat de techniek nog nieuw was, werd vaak eerst een kleine groep experts uit de organisatie betrokken. Als duidelijker werd wat de techniek kon betekenen voor de organisatie, werd het belangrijk om intensiever te werken aan een breder draagvlak. In het begin van het proces werd vaak nog verwezen naar een meer algemene urgentie voor het bedrijf, zoals ontwikkelingen in de markt.

Nadat de bedrijven ervaring hadden opgedaan met 3D- metaalprinten, werd er steeds meer verwezen naar specifieke situaties en werden voorbeelden gebruikt uit de praktijk van het bedrijf. De geïnterviewde bedrijven zagen dit ook als een leerproces waarbij medewerkers actief betrokken werden, rekening werd gehouden met de verschillende belangen die speelden binnen de organisatie, en waarbij open werd gecommuniceerd over de kansen en de beperkingen van 3D-metaalprinten. Er waren geen duidelijke voorbeelden van een eenzijdige 'push strategie'; de respondenten gaven aan dat zij ook probeerden te begrijpen waar de weerstanden vandaan kwamen en gingen hierover in gesprek met collega's en probeerden tot gezamenlijke oplossingen te komen. Er werden vooral voorbeelden genoemd van een meer participatieve aanpak. Niet alle bedrijven hebben dan ook vastgehouden aan hun oorspronkelijke doelen tijdens het veranderproces en sommige bedrijven hebben hun doelen aangepast.



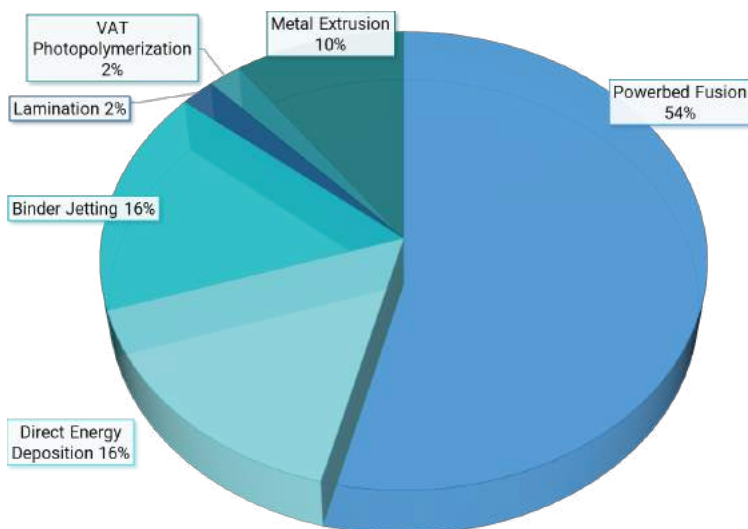
4. Toegevoegde waarde van de diverse 3D-metaalprint technieken

3D-metaalprinten is een verzamelwoord

In de praktijk is 3D-metaalprinten een verzamelwoord voor verschillende printtechnieken. Deze diverse technieken beschikken allemaal over unieke eigenschappen en zijn daarom ook geschikt voor verschillende toepassingen (Binon 2017). Voor 3D-metaalprinten zijn veel casestudies gedaan of studies over één specifieke techniek. Maar er is nog weinig informatie te vinden die bedrijven in staat stelt om een vergelijking te maken tussen deze verscheidene technieken². Uiteindelijk zijn daarbij niet alleen de technische maar juist ook de bedrijfskundige aspecten bepalend of een specifieke printtechniek geschikt is voor een bedrijf. Om deze reden is er een deelonderzoek gedaan waarin de verschillende technieken zijn vergeleken met daarin ook aandacht voor de meer bedrijfskundige aspecten.

3D-metaalprint technieken zijn vaak ontwikkeld voor specifieke toepassingen en hebben daardoor unieke voordelen. Tijdens dit onderzoek is daarom aan bedrijven gevraagd wat de toegevoegde waarde is van de techniek waarmee zij werken. De technieken zijn daarbij verdeeld in de volgende vier categorieën: Powderbed Fusion, Directed Energy Deposition, Metal Extrusion en Metal Binder Jetting.

Dit zijn de vier meest toegepaste technieken op dit moment, zoals blijkt uit onderzoek (Vafadar, Guzzomi et al. 2021)



Figuur 4.1 Gebruik van 3D-printtechnieken in 2018 (Vafadar, Guzzomi et al. 2021)

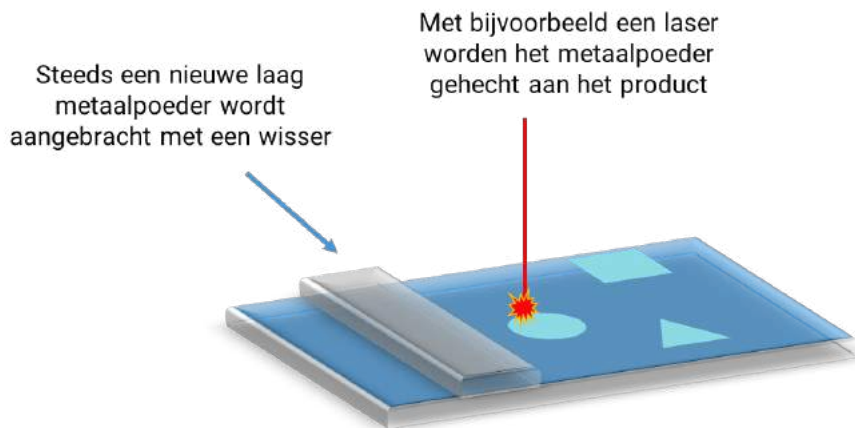
Door het afnemen van interviews en het doornemen van literatuur is inzicht gegekregen in deze technieken. In de volgende alinea's worden deze technieken kort toegelicht.

Powderbed Fusion technieken werken met metaalpoeder dat laag-voor-laag wordt aangebracht door middel van een soort wisser of veger. Zodra een nieuwe laag is aangebracht wordt dit lokaal gesmolten door middel van een laser of een elektronenstraal, zodat het gehecht wordt aan het product³ (Sun, Brandt et al. 2017).

² Er is zijn verschillende vergelijkingen van de technieken vanuit een meer technisch perspectief, zoals: Gadagi, B. and R. Lekurwale (2021). "A review on advances in 3D metal printing." *Materials Today: proceedings* Volume 45: 277-283. Maar er is nog geen overzicht voor metaalprinten zoals Douglas *et al.* algemene overzichten 3D-printen Douglas, C., et al.

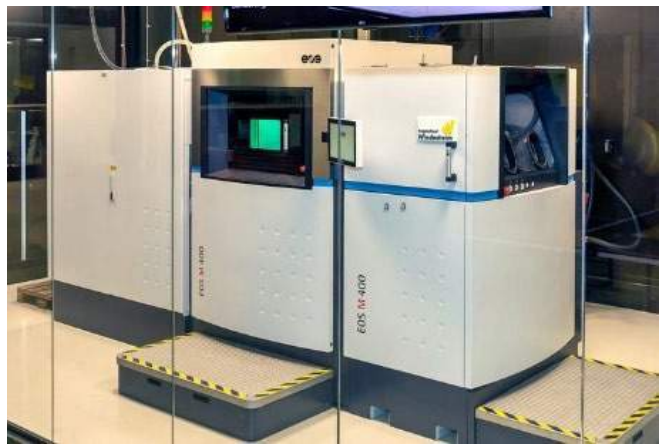
(2020). "Selection of additive manufacturing technologies in productive systems: a decision support model." *Rafael Gestão & Produção: Digital Transformation, Intelligent Manufacturing and Supply Chain Management* 4.0 27(3).

³ Producenten proberen de printsnelheid fors te verhogen door het aantal wissers en lasers te verhogen.



Figuur 4.2 Eenvoudige weergave van Powderbed Fusion

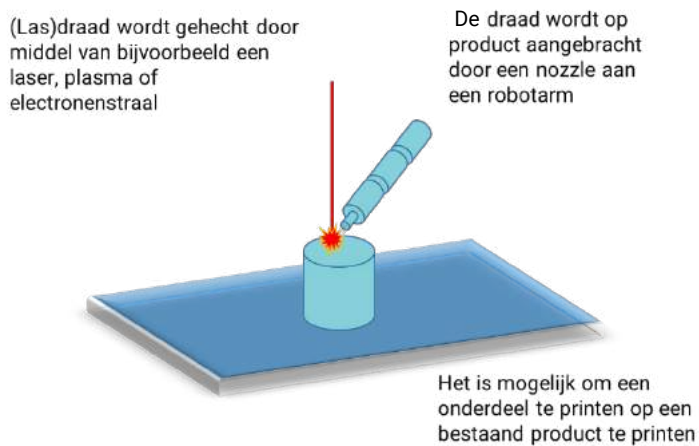
Voordelen van deze techniek zijn de mogelijkheden om te printen met een hoge dichtheid en precisie. Daarnaast zijn er veel soorten metaalpoeder beschikbaar en kunnen complexe vormen worden geprint. In andere woorden: producten worden geprint met hoge geometrische complexiteit. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk om verschillende onderdelen in één keer te printen waardoor er geen verbindingen nodig zijn en ook assemblage niet nodig is. Een voorbeeld is een snijmes voor industriële deegmachines die is ontwikkeld door K3D. In dit mes zijn de verschillende onderdelen geïntegreerd in één product waardoor K3D claimt dat het totale gewicht met 90% is gereduceerd. De draaiende delen van de machine worden hierdoor minder zwaar belast en hebben zo een langere levensduur (K3D 2022).



Figuur 4.3 Powderbed Fusion toegepast bij Hogeschool Windesheim

Een ander voordeel van deze techniek is dat het mogelijk is om in een korte tijd verschillende unieke onderdelen te printen. De techniek is zeer relevant voor bijvoorbeeld de hightechindustrie, waar gewichtsbesparing en de integratie van onderdelen bijdragen aan de productie van hoogwaardige producten.

Bij *Directed Energy Deposition* (DED) wordt lasdraad door middel van een nozzle (spuitstuk) aangebracht op een bestaand oppervlak waar het wordt gehecht door middel van een laser, elektronenstraal of een plasmaboog. De nozzle wordt meestal gericht op de juiste plek door middel van een robotarm.



Figuur 4.4 eenvoudige weergave van DED

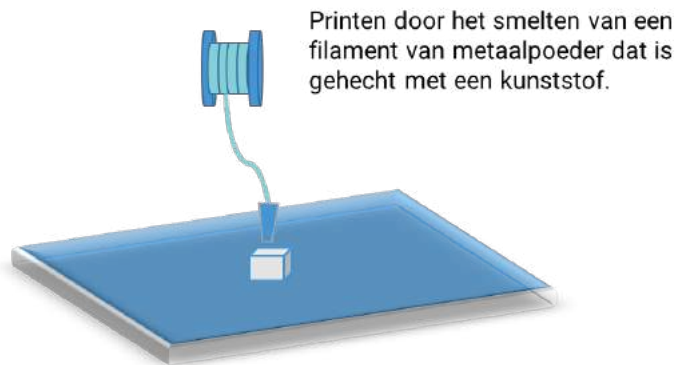
Belangrijke voordelen zijn dat er gewerkt kan worden met veel verschillende soorten draad die relatief snel gewisseld kunnen worden – er kan hierdoor dus goed worden ingespeeld op klantwensen. Daarnaast kunnen door middel van deze techniek grote objecten geprint worden. Doordat geprint kan worden op bestaande oppervlaktes kan de techniek goed gebruikt worden in aanvulling op andere productiemethodes en zelfs om bijvoorbeeld beschadigde oppervlaktes te repareren of te voorzien van een coating (Dass and Mordt 2019).



Figuur 4.5 Gebruik van DED bij het printen van een raketkop (NASA 2020)

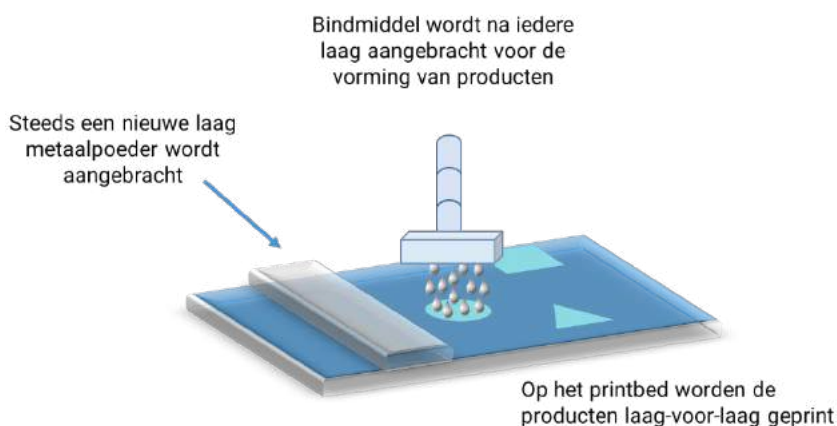
Bij een *Metal Extrusion* 3D- printer wordt het metaalpoeder gebonden door een bindmiddel. Via een nozzle op de printer wordt het bindmiddel gesmolten en laag-voor-laag aangebracht tot het product is gevormd. Daarna wordt het bindmiddel verwijderd door het te sinteren in een oven (debinding) (Velling 2021). Tijdens het debinden krimpt het onderdeel zo'n twintig procent waardoor het uiteindelijke product kleiner wordt. Door producten groter te ontwerpen en printen wordt het product ongeveer de juiste grootte. Dit maakt de methode minder nauwkeurig dan de meeste Powderbed Fusion technieken. De techniek is erop gericht om 3D-metaalprinten goedkoper en eenvoudiger te maken en het zo toegankelijke te maken voor bedrijven.

Door de gebruiksvriendelijkheid en de mogelijkheid om de printer in een 'kantooromgeving' te plaatsen onderscheidt deze techniek zich van de andere 3D-metaalprint technieken. Metal Extrusion is in de praktijk bijvoorbeeld vaak geschikt voor het maken van functionele prototypes. De mechanische eigenschappen van de Metal Extrusion techniek zijn echter minder goed; over het algemeen zijn producten uit deze 3D-metaalprint techniek minder sterk en minder nauwkeurig dan diegene die zijn geprint met Powderbed Fusion.



Figuur 4.6 Eenvoudige weergave van Metal Extrusion

In een *Metal Binder Jetting* systeem wordt het metaalpoeder laag -voor-laag op het printbed aangebracht. Op iedere laag wordt op de juiste plaats bindmiddel aangebracht zodat het metaalpoeder op die plek gaat hechten. Op deze wijze wordt laag-voor-laag een product gevormd. Doordat het aanbrengen van een laag poeder en het aanbrengen van het bindmiddel op hoge snelheid kan gebeuren, kunnen producten in series worden geprint. Als de producten zijn geprint wordt het bindmiddel verwijderd (debinding) door de producten te sinteren in een oven (Zianne and Crane 2019).



Figuur 4.7 Eenvoudige weergave van Metal Binder Jetting

De geprinte onderdelen hebben een lage oppervlakte ruwheid in vergelijking met Powderbed Fusion, wat belangrijk kan zijn voor de structuur aan de binnenzijde van producten. De binnenzijde is namelijk moeilijk na te bewerken met andere technieken en een lage oppervlakte ruwheid is dan ook een belangrijk voordeel van deze techniek. De mechanische eigenschappen van producten zijn iets lager dan alternatieven die geprint zijn met Powderbed Fusion (ANIWAA 2021). De precisie van Metal Binder Jetting is wel vergelijkbaar met de Powderbed Fusion technieken waardoor het geschikt is om complex vormgegeven producten te printen. Daarnaast is de techniek goedkoper dan de Powderbed Fusion techniek omdat er geen kostbare lasers in de machine nodig zijn om het metaalpoeder te binden. Een leverancier van de Metal Binder Jetting systemen stelde zelfs dat Metal Binder Jetting het economisch mogelijk maakt om kunststof onderdelen in de toekomst van metaal te maken om zo de levensduur en prestatie van deze producten te verhogen.

Toepassingsmogelijkheden

De verschillende 3D-metaalprinttechnieken bieden nieuwe toepassingsmogelijkheden voor de maakindustrie. Door deze technieken kan worden ingespeeld op de specifieke eisen die worden gesteld in verschillende sectoren, zoals de medische markt of in de scheepsbouw. De volgende factoren zijn vaak bepalende factoren:

Materialen: er kan worden geprint met diverse materialen (metaalsoorten) zoals titanium dat erg licht en sterk is, of wolfram dat zeer hittebestendig is. Niet alle materialen zijn echter beschikbaar voor de verschillende 3D-printtechnieken. Daarbij is het wisselen van soort materiaal(poeder) bij sommige printers en printtechnieken eenvoudiger dan bij andere technieken.

Printgrootte: de grootte van producten die kunnen worden geprint verschilt per techniek (en type printer). De maximale en minimale groottes hebben een effect op de toepasbaarheid van de techniek in verschillende markten. Zo vraagt het printen van een schroef om een andere printtechniek dan het printen van onderdelen voor de fijnmechanische industrie.

Oppervlakte ruwheid: de uiteindelijke oppervlakte ruwheid van geprinte producten heeft een duidelijke invloed op de toepassingsmogelijkheden. Zo heeft de oppervlakte ruwheid invloed op de mate waarin materialen kunnen worden gereinigd, omdat in een ruwer oppervlak bijvoorbeeld corroderende stoffen kunnen achterblijven met roestvorming als gevolg. Ook dit heeft effect op de mogelijke toepassingen van de geprinte producten. Zo is in de farmaceutische- & voedingsindustrie een lage oppervlakte ruwheid vereist vanwege de hoge eisen voor hygiëne.

Maatnauwkeurigheid: De verschillende markten zullen elk andere eisen stellen aan de maatnauwkeurigheid. Bedrijven in de hightechindustrie vragen over het algemeen om een (veel) hogere maatnauwkeurigheid dan een bedrijf dat enkel functionele prototypes wil maken.

Geometrische complexiteit: het kunnen printen van complexe vormen is één van de grote voordelen van 3D-metaalprinten. Voor sommige markten is dit een belangrijk voordeel, zoals in de luchtvaart en automobielenindustrie waar zoveel mogelijk gewicht moet worden bespaard. In andere markten, zoals de utiliteitsbouw speelt dit aspect een minder grote rol.

Productieschaal en maatwerk: sommige markten zijn gericht op het leveren van maatwerk. Een voorbeeld is de medische markt waar prothesen worden geprint met titanium. Sommige van deze prothesen moeten precies passen in het lichaam. Andere markten vragen juist om meer gestandaardiseerde producten waardoor de techniek toepasbaar moet zijn voor serie en batch productie, zoals bijvoorbeeld de automobielenindustrie.

Productietijd: Sommige markten vragen om een uiterst snelle productietijd zodat de 'time to market' zo kort mogelijk is. Zo is het voor reparatie of vervangingsonderdelen van belang dat die zo snel mogelijk geleverd kunnen worden. In andere markten speelt deze snelheid een minder grote rol, zoals vaak het geval is bij research & development activiteiten, waarvoor juist prototypes moeten worden geprint als een proof-of-concept.

Printtechnieken en markten

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de geschiktheid van de printtechnieken voor diverse toepassingen aan de hand van de hierboven beschreven factoren.

Powderbed Fusion: Een toegevoegde waarde van de Powderbed Fusion techniek zit in de brede toepasbaarheid in verschillende markten, wat mede komt door de goede mechanische eigenschappen. Deze techniek is echter één van de duurste printtechnieken door de hoge aanschaffkosten van de printer, de benodigde opleiding(en), en de nabewerkingskosten. Ook zijn er extra kosten om veilig met het fijne metaalpoeder te kunnen werken. Er zijn al relatief veel materialen te printen, zoals verschillende staalsoorten, nikkel legeringen, kobalt chroom legeringen, koper, titanium, aluminium en wolfram (EOS 2020). Doordat er geprint wordt met een heel fijn poeder is de maatnauwkeurigheid hoog en de oppervlakte ruwheid relatief laag waardoor het met enige nabewerking geschikt is voor de voedings- en medische industrie. Daarnaast kunnen er met deze techniek complex vormgegeven producten worden geprint. De techniek is tot op zekere hoogte geschikt voor kleine serie- en batch productie, waarbij het dan mogelijk is om binnen een dag onderdelen op te leveren. De maximale print grootte is afhankelijk van de specifieke printer. Deze zijn er in maten van 100x100x100mm tot 800x400x500mm (ANIWAA 2021).

Directed Energy Deposition: Deze techniek vindt zijn toegevoegde waarde in de grootte van de 3D-metaalprints en de snelheid waarmee geproduceerd kan worden. Dit is de enige techniek waarmee relatief grote producten gemaakt kunnen worden, zoals zware machineonderdelen. Met de techniek kan worden geprint met vrijwel alle lasbare materialen. De maatnauwkeurigheid is echter laag en ook is het oppervlak nog ruw na het printen, waardoor vrijwel altijd nabewerking nodig is met andere bewerkingstechnieken, zoals CNC frezen. Er zijn minder mogelijkheden om met deze techniek complexe vormen te printen omdat vaak geen extra support (tijdelijke ondersteuning tijdens het printproces) kan worden aangebracht. De printmethode is ook minder geschikt voor serieproductie omdat de geprinte producten in de regel nog moeten worden bewerkt nadat deze zijn geprint (TWI 2021).

Metal Extrusion: Duidelijke voordelen van Metal Extrusion zijn de gebruiksvriendelijkheid, de plaatsingsmogelijkheden en de relatief korte opleidingstijd van operators van de printer. Daarnaast zijn de printers (en aanvullende apparatuur, zoals een sinter-oven) minder kostbaar dan bij de andere technieken. Deze techniek wordt in de toekomst waarschijnlijk nog goedkoper doordat het benodigde gebonden metaalpoeder nog steeds verder wordt ontwikkeld. Metal Extrusion is vooral geschikt voor prototyping en de productie van enkel stuks. Doordat de techniek nog relatief nieuw is, zijn er nog maar een beperkt aantal printbare materialen beschikbaar. Dit zijn vooral verschillende soorten gereedschapsstaal en koper. Door de redelijk grote laagdiktes tijdens het printen, krijgen geprinte producten een hogere oppervlakte ruwheid dan bij Powderbed Fusion. De aangeraden maximale printbare onderdeel grootte is 150x150x110mm, omdat er bij grotere onderdelen een hogere kans is op scheuren of afwijkingen doordat producten krimpen tijdens het sinterproces.

Metal Binder Jetting: De toegevoegde waarde van het Metal Binder Jetting is het snel kunnen produceren van kleine onderdelen met een complexe vormgeving. Daarnaast is dit de enige techniek waarmee op industriële schaal producten kunnen worden geprint. Door het fijne poeder is een goede maatnauwkeurigheid en een lage oppervlakte ruwheid mogelijk. Het sinter proces zorgt ervoor dat maatnauwkeurigheid iets afneemt en dat de geprinte producten niet groter kunnen zijn dan 150x100x50mm. Dit komt doordat er ook bij deze techniek bij grotere onderdelen een hogere kans is op scheuren of afwijkingen tijdens het sinter proces (ANIWAA 2021).



De hierboven beschreven eigenschappen van de verschillende technieken zijn in de onderstaande tabel opnieuw weergegeven en aangevuld om een zo een compleet overzicht te bieden.

	Powderbed Fusion Technology	Directed Energy Deposition	Metal Extrusion	Metal Binder Jetting
Beschikbare materialen	Staal, Nickel legeringen, kobalt chroomlegeringen, Koper, Titanium, aluminium en Wolfram	Meeste lasbare metalen	Verschillende stalen en koper	Staal, inconel, en wolframcarbide
Maximale print grootte	100x100x100mm tot 800x400x500mm	Groot	150x150x110 mm	150x100x50
Oppervlakteruwheid	Hoog veilig te maken voor medische en voedingsindustrie	Zeer Hoog	Zeer hoog	Hoog
Maatnauwkeurigheid	± 0.1mm	± 0,3 tot 1+ mm	± 0,5 mm	± 0.1 mm
Geometrische complexiteit	Hoog	Laag	Middel	Hoog
Schaalbaarheid	Kleine Serie- en batch productie	Stukproductie	Stukproductie	Serie- en batch productie
Productietijd	1 dag	1 dag	3 tot 7 dagen	3 tot 7 dagen

Tabel 4.1: De eigenschappen van de verschillende 3D-metaalprint technieken die effect hebben op de inzetbaarheid in verschillende markten

Belangrijkste kosten van printtechnieken

De kosten van 3D-metaalprinten verschillen duidelijk per techniek. Zo zijn er duidelijk verschillen in de benodigde faciliteiten, de nabewerking en de opleiding om de printer goed en veilig te kunnen gebruiken. Ook heeft het materiaal dat wordt gebruikt een duidelijk invloed op de kosten, zo is metaalpoeder in de regel duurder om aan te schaffen dan lasdraad (dat gebruikt wordt bij DED).

Van de vier 3D-metaalprint technieken die in dit onderzoek zijn meegenomen is Powderbed Fusion vaak de duurste techniek vanwege de hoge vaste kosten. Deze machines zijn duur in aanschaf, al lopen de prijzen sterk uiteen. De goedkoopste printers waren €100.000 en de duurste printers hadden een prijs van €2,5 miljoen in 2021 (TWI 2021) Vervolgens vereist deze techniek de meeste facilitaire aanpassingen, zo moeten de printers in een explosie-veilige ruimte worden geplaatst omdat er gewerkt wordt met gassen en metaalpoeders. Daarnaast moet een ruimte soms voorzien worden van een verstevigde vloer vanwege het hoge gewicht van de machines. Verder vereist de techniek speciaal opgeleide operators om veilig met de printer te kunnen werken. Als laatste moet extra apparatuur worden aangeschaft om de supportstructuren te verwijderen en moet een poederbehandelingsstation worden geplaatst.

Bij Directed Energy Deposition wordt gewerkt met lasdraad en daarom moet een gasaansluiting worden aangesloten op de machine en is een geventileerde werkplaats nodig. Voor deze techniek is een kortere opleiding nodig dan voor Powderbed Fusion techniek en de operators moeten een opleidingstraject van ongeveer een maand doorlopen. Door het ruwe oppervlak van geprinte producten zijn er altijd hoge nabewerkingskosten. Een voordeel is dat er geprint wordt met lasbare materialen en minder fijne poeders waardoor de materiaalkosten lager uitvalt dan bij de Powderbed Fusion techniek.

Metal Extrusion 3D-metaalprinters zijn het goedkoopste in aanschaf en zijn verkrijgbaar voor ongeveer €120.000 (BMD i.o.). Er zijn minimale facilitaire aanpassingen nodig doordat de machines in een goed geventileerde kantoorruimte kunnen staan. De sinterovens kunnen op een gasleiding worden aangesloten zodat er niet meer met gasflessen gewerkt hoeft te worden, maar dit is niet vereist. Werknemers kunnen snel en gemakkelijk gebruik maken van deze techniek. De software is ontworpen op gebruikersvriendelijkheid en zorgt onder andere voor dat compensatie van de krimp tijdens het sinterproces door een correctie in het ontwerp.

Voor de techniek is een debinder vloeistof nodig. Dit is een dure vloeistof op een constante temperatuur bewaard worden. Het probleem is dat de vloeistof bij kamertemperatuur verdampt en dus verdwijnt, ook als de machine niet gebruikt wordt. De techniek heeft als voordeel dat de supportstructuren geprint worden met een ceramische scheidelag waardoor ze makkelijk te verwijderen zijn met minimale nabewerking. Toch kan het wel nodig zijn om onderdelen na te bewerken om de gewenste maatnauwkeurigheid te behalen.

Metal Binder Jetting printers kosten rond de €150.000 tot ruim €700.000 (BMD i.o.). Doordat de printer het metaalpoeder aan elkaar lijmt zonder warmtebron zijn er minder facilitaire aanpassingen nodig. Deze printers kunnen bijvoorbeeld geplaatst worden in een geventileerde productiehal. Voor de sinteroven is een gasaansluiting nodig en voor het debinder-station een goede ventilatie. Supportstructuren zijn nodig om tijdens het sinter proces vervorming tegen te gaan maar deze supportstructuren zijn nadien snel te verwijderen. Door de lage oppervlakte ruwheid is nabewerking niet altijd nodig. De opleidingsduur voor de operators is korter dan voor de Powderbed Fusion en de Directed Energy Deposition technieken.

Belangrijke kosten die dus komen kijken bij de verschillende 3D-metaalprint technieken zijn de machineprijzen, opleidingsvereisten, facilitaire aanpassingen, benodigde nabewerking en grondstofvorm. De kosten per 3D-metaalprint techniek zijn in tabel 5.2 weergegeven.

	Powderbed Fusion	Directed Energy Deposition	Metal Extrusion	Metal Binder Jetting
Machineprijs	€100.000 tot €2.500.000	€90.000 tot €200.000 +	€100.000 tot €250.000	€150.000 tot €700.000 +
Opleiding vereisten	Hoog	Hoog	Laag	Middel
Facilitaire aanpassingen	Explosie veilige ruimte, verstevigde vloer, gasaansluiting	Geventileerde productiehal, gasaansluiting	Ventilatie naar buiten en gasaansluiting gewenst	Productiehal met ventilatie naar buiten, gasaansluiting
Benodigde nabewerking	Hoog tot middel	Hoog	Laag	Laag
Grondstofvorm	Fijn metaalpoeder	Lasdraad of grof metaalpoeder	Gebonden metaalpoeder	Fijn metaalpoeder
Grondstofkosten	Hoog	Laag	Middel	Hoog

Tabel 4.2 De kosten van de verschillende 3D-metaalprint technieken

Risico's en kansen van printtechnieken in vijf tot tien jaar

De verschillende 3D-metaalprint technieken hebben door hun verschillende eigenschappen andere toekomstige risico's en kansen.

Powderbed Fusion heeft als voordeel dat het de meest toegepaste techniek is op dit moment. De meeste bedrijven die financieel succesvol 3D-metaalprinten, maken gebruik van deze techniek. Dit voordeel creëert ook een aantal kansen voor de toekomst. Zo wordt er veel onderzoek gedaan vanuit bedrijven, leveranciers en kennisinstellingen (Gunasekaran, Sevvell et al. 2021, Papazoglou, Karkalos et al. 2022). Hierdoor is de kans groter dat het verder wordt doorontwikkeld en verbeterd. De verwachting van de leveranciers van deze techniek is dat het in de toekomst grotere onderdelen kan printen en vooral sneller. Daarnaast zijn er verschillende onderzoeken die erop zijn gericht om de benodigde supportstructuren te verminderen waardoor er minder grondstoffen worden verbruikt en er minder nabewerking nodig is.

Toch zijn er ook een aantal eigenschappen van de techniek uit de interviews naar voren gekomen die een mogelijk risico kunnen vormen in de toekomst. Het is één van de duurste technieken om te 3D-metaalprinten, op dit moment is dit nog geen bepalende factor omdat het beschikt over betere mechanische eigenschappen en precisie. Maar als de andere technieken in de toekomst op deze punten verbeteren zal dit leiden tot sterkere concurrentie, wat deze techniek financieel buitenspel kan zetten.

Producten die gemaakt zijn met *Directed Energy Deposition* hebben nu nog een zeer ruw oppervlak. Een leverancier van DED-metaalprinters gaf aan dat de techniek in de toekomst een hogere precisie en daarbij lagere oppervlakte ruwheid kan behalen. Dit maakt het ook mogelijk om nog complexere vormen te printen. Hierdoor kan de techniek in de toekomst meer ingezet worden voor nieuwe toepassingen. Deze techniek beschikt verder over een aantal unieke mogelijkheden die niet worden geboden met andere technieken. Zo zullen de andere 3D-printtechnieken niet groter kunnen printen dan Directed Energy Deposition. De grootste bedreiging voor Directed Energy Deposition is dat het aantal geschikte toepassingen in de markt niet toeneemt en de eindgebruikersmarkt beperkt blijft. Dit kan worden verbeterd als er meer geometrieën geprint kunnen worden en de nabewerking minder kostbaar wordt.

De kans voor *Metal Extrusion* is dat de techniek nog verder ontwikkeld en verbeterd kan worden. Nu duurt het totale print- en sinterproces lang doordat verschillende handelingen nodig zijn om een 3D-metaalprint te maken. Daarnaast zijn de beschikbare printbare materialen nog beperkt. Een leverancier van de Metal Extrusion systemen gaf aan dat meer materialen beschikbaar komen en dat in de toekomst voor het debinden geen speciale vloeistof meer nodig is. Verder zijn er ook bedrijven die metalen filamenten ontwikkelen die gebruikt kunnen worden op een SLS (kunststof) 3D-printer. Door deze ontwikkeling wordt het in de toekomst mogelijk om goedkoper te 3D-metaalprinten met deze techniek. Mogelijke risico's voor deze techniek zijn dat er te weinig business cases zijn voor bedrijven door de mindere mechanische eigenschappen en de beperkte(re) mogelijkheden om producten te printen. Verder zal de print grootte niet veel toenemen doordat er sprake is van krimp in het proces. Ook worden de meeste normeringen ontwikkeld voor Powderbed Fusion print technieken en niet voor Metal Extrusion.

Metal Binder Jetting is een relatief nieuwe techniek maar de geïnterviewde bedrijven zien veel mogelijkheden en kansen voor de toekomst. Nu is er nog een beperkt aanbod van materialen maar dit neemt in de komende jaren toe. Daarnaast lijkt het proces op hoofdlijnen op Metal Injection Molding (MIM). Voor de Metal Injection Molding bestaat al een ISO-norm, ISO 22068 en deze norm zou de basis kunnen zijn voor een vergelijkbare kwaliteitsnorm voor Binder Jetting. Ook kunnen de poeders die al zijn ontwikkeld voor MIM (met enige modificaties) gebruikt worden voor Metal Binder Jetting, waardoor het aanbod van beschikbare materialen nog verder toeneemt (ANIWAA 2021). Maar doordat de hightechindustrie vooral investeert in de Powderbed Fusion blijven de investeringen in deze techniek achter. Dit heeft als gevolg dat ontwikkeling met betrekking tot normering en certificering kan stagneren en daarmee de toepasbaarheid in de hightechindustrie beperkt blijft (AMPower 2020).

Conclusie en aanbevelingen

De verschillende 3D-metaalprint technieken hebben specifieke eigenschappen en zijn daardoor geschikt voor verschillende toepassingen. De Powderbed Fusion technologie is bijvoorbeeld geschikt voor verschillende toepassingen in de hightechindustrie. Directed Energy Deposition is toepasbaar voor het printen van grote onderdelen die binnen een korte tijd moeten worden geproduceerd of gerepareerd.

Metal Extrusion is onder andere geschikt voor het produceren van functionele prototypes. Metal Binder Jetting is geschikt voor serieproductie van producten met een complexe vormgeving. Powderbed Fusion wordt nu het meest toegepast en het meeste geld wordt geïnvesteerd in de verdere ontwikkeling van deze techniek. De verwachting is daarom dat deze techniek ook in de komende jaren leidend blijft.

Voor 3D-metaalprinten moet veel kennis en ervaring worden opgedaan. Ook is er een breed aanbod van technieken en merken. Een risico is dat een net aangeschafte 3D-printer niet optimaal wordt benut. Bedrijven kunnen deze onnodige kosten vermijden door eerst producten te laten printen bij 3D-metaalprint service en zo praktijkervaring op te doen. Het is dan een belangrijke voorwaarde dat de ontwerpers van de bedrijven in het ontwerpproces meedenken en ontwerpen; ze moeten ervaring opdoen met 'Design for Additive Manufacturing' (DfAM). Als er gekozen wordt voor de aanschaf van een printer, is het advies om ook dan samen te werken met andere bedrijven. Door samenwerking kan de techniek gericht worden ingezet en optimaal worden benut.



5. Effectief kostprijzen berekenen voor 3D-metaalprinten

Inleiding

3D-metaalprinten brengt als nieuwe technologie verschillende innovaties naar de Nederlandse maakindustrie. De meest bekende metaalprinttechniek is Laser Powderbed Fusion maar er zijn daarnaast diverse andere technieken ontwikkeld. De overeenkomst tussen deze technieken is dat producten compleet anders ontworpen en geproduceerd kunnen worden dan voor conventionele metaalbewerking. Dat komt doordat producten laag-voor-laag worden opgebouwd. Hierdoor is er een grote ontwerpvrijheid waardoor producten worden gemaakt die onmogelijk met andere technieken te maken zijn. Zo kunnen zeer complexe metaalproducten vervaardigd worden. Daarnaast is het bijvoorbeeld mogelijk kortere levertijden te realiseren of kleinere series te produceren. 3D-metaalprinten gaat dus verder dan alleen de techniek en kan gezien worden als een 'disruptive innovation'; het is geen verbetering van een bestaande techniek maar een technologie waardoor compleet nieuwe producten en diensten mogelijk zijn.

Doordat het printproces compleet anders wordt georganiseerd dan conventionele bedrijfsprocessen is het lastig om de kosten van deze technologie goed in te schatten. Er wordt op een andere manier ontworpen, er worden andere type activiteiten ondernomen en de productie wordt anders geoptimaliseerd. Vanuit het bedrijfsleven rijst daarom de vraag: hoe kunnen we goed inzicht krijgen in de totale kosten van 3D- metaalprinten door middel van kostprijsberekeningen?

Kostprijsberekeningen zijn ontwikkeld om ondernemers heldere inzichten te geven over de verschillende aspecten van de bedrijfsvoering. Maar het opstellen van een inzichtelijke kostprijsberekening is al snel een tijdrovend proces voor een nieuwe techniek zoals 3D-metaalprinten. Dat komt mede doordat er veel bedrijfsinformatie moet worden verzameld. Er zijn namelijk veel verschillen tussen bedrijven en dus factoren die de kostprijs beïnvloeden. Technische verschillen bestaan tussen de printers doordat fabrikanten in de afgelopen jaren meerdere printtechnieken hebben ontwikkeld (ISO/ASTM i.o.), zoals WAAM of SLM. Ook is het printproces in de praktijk anders georganiseerd. Verschillende processen zijn nodig want het ene bedrijf produceert seriematig roestvrijstalen auto-onderdelen en een ander bedrijf print medische implantaten van titanium. Bedrijven kunnen hierdoor geen algemeen toepasbaar rekenmodel gebruiken voor kostprijsberekeningen en daarom is specifieke kennis nodig voor kostprijsberekeningen.

In deze tekst wordt dieper ingegaan op kostprijsberekeningen ('cost accounting', 'cost price' of 'costing systems') van 3D-metaalprinten. De nadruk ligt hierbij op de integrale kostprijsberekening: een methode die zowel de vaste als de variabele kosten meeneemt in de berekening. Het is gebaseerd op een literatuurstudie van wetenschappelijke artikelen en vakbladen over 3D-printen.

Doelstellingen voor kostprijsberekeningen

In de praktijk maken bedrijven kostprijsberekeningen voor 3D-metaalprinten met verschillende doelstellingen. Ondernemers noemden tijdens een serie interviews over 3D-metaalprinten de volgende redenen waarom zij de kostprijs van geprinte producten willen berekenen:

- Vergelijken van de kosten van 3D-metaalprinten met andere metaalbewerkingstechnieken zoals CNC frezen;
- Vergelijken van de kosten van een eigen productielijn met de kosten van het inkopen van metaalprints bij daarvoor gespecialiseerde bedrijven;
- Bijdragen aan een investeringsplan voor een nieuwe metaalprinter (waarbij ook andere financiële overzichten nodig zijn);
- Optimaliseren van het totale printproces doordat er een beter inzicht is in de kostenopbouw van de geprinte producten.

Het is belangrijk om te benadrukken dat de kostprijs niet de waarde van een product of dienst laat zien. In 3D Print Magazine staat een interview met Luuk Wissink, de directeur van K3D, één van de eerste bedrijven in Nederland die door middel van een industriële 3D-metaalprinter producten leverde (Wissink 2019). Hij benoemt in dat artikel een praktisch probleem, dat speelt bij het maken van beslissingen op basis van kostprijzen. Producten die geprint worden met een metaalprinter worden door inkopers vaak direct vergeleken met producten die worden geproduceerd door middel van gangbare technieken. Er wordt dan te weinig gekeken naar de totale meerwaarde die geprinte producten kunnen bieden als oplossing voor een klant, aldus Wissink. Dit interview benadrukt dat het bij klantcontact belangrijk is om niet op de kostprijs, maar op de waarde te concentreren die wordt gecreëerd voor een klant. Door te werken met 3D-metaalprinten kunnen producten anders worden ontworpen zodat producten bijvoorbeeld nieuwe functionaliteiten krijgen of lichter worden, wat direct voordelen kan bieden aan klanten.

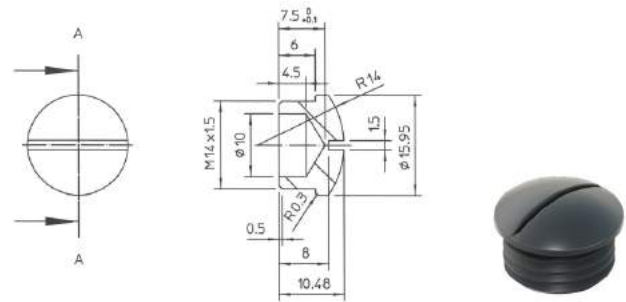
Daarnaast is het bijvoorbeeld mogelijk om kleine series te leveren en zelfs eenmalige series waardoor direct geleverd kan worden aan klanten. Er is een kortere doorlooptijd en dat biedt onder andere de mogelijkheid om (reserve) onderdelen snel te kunnen leveren als hier vraag naar is. Samengevat: 3D-metaalprinten heeft zin als er producten worden geprint die een meerwaarde bieden voor klanten ten opzichte van bestaande producten.

Een kostprijsberekening geeft dus alleen inzicht in de kosten van een organisatie. In de praktijk is het raadzaam om naast kostprijsberekeningen ook andere methodes te gebruiken voor financiële vraagstukken. Maar ondanks het feit dat alleen de kosten worden belicht bij een kostprijsberekening, biedt een kostprijsberekening belangrijke financiële inzichten, die kunnen bijdragen aan een goed overwogen bedrijfsvoering.



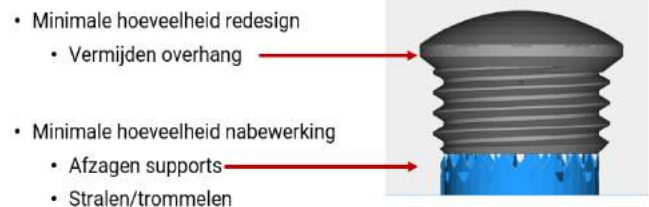
Voorbeeld screw cap - MOBA

Onderzoekers van Hogeschool Windesheim hebben onder andere samengewerkt met het productiebedrijf MOBA. Samen met MOBA is een product gekozen dat nu wordt geproduceerd door middel van conventionele methodes en dat geschikt voor 3D-metaalprinten. Het gekozen product is een screw cap die is weergegeven in figuur 5.1. Moba produceert momenteel deze Screw caps zelf en hiervoor zijn verschillende handelingen nodig. Hierdoor hebben deze onderdelen een kostprijs van €4,19 per stuk, op basis van een behoefte van ongeveer 220 stuks per jaar.



Figuur 5.1 – het originele ontwerp van de screw cap

Een casestudy is uitgevoerd om te verkennen of dit kleine product goedkoper geproduceerd kan worden door middel van SLM. Om het gebruik van supportmateriaal te vermijden, is het ontwerp lichtelijk aangepast, zoals te zien is in figuur 5.2. De M14 schroefdraad kan zonder problemen worden geproduceerd in de 3D-printer.



Figuur 5.2 - Met een kleine aanpassing aan het ontwerp wordt de hoeveelheid nabewerking tot een minimum beperkt

Een geprinte schroefdraad is vanwege de ruwheid echter minder sterk dan een getapte draad. In deze toepassing is dit geen belemmering doordat de schroefdraad nauwelijks wordt belast. Voor het behalen van de juiste toleranties moet er nog wel onderzocht worden wat de ideale *beam offset is* – hiermee wordt de positie van het laserpad van de contour bepaald – die in de printer gebruikt wordt. Als alternatief kan de binnendraad, waar dit product mee wordt bevestigd, worden aangepast om te voldoen aan de benodigde toleranties.

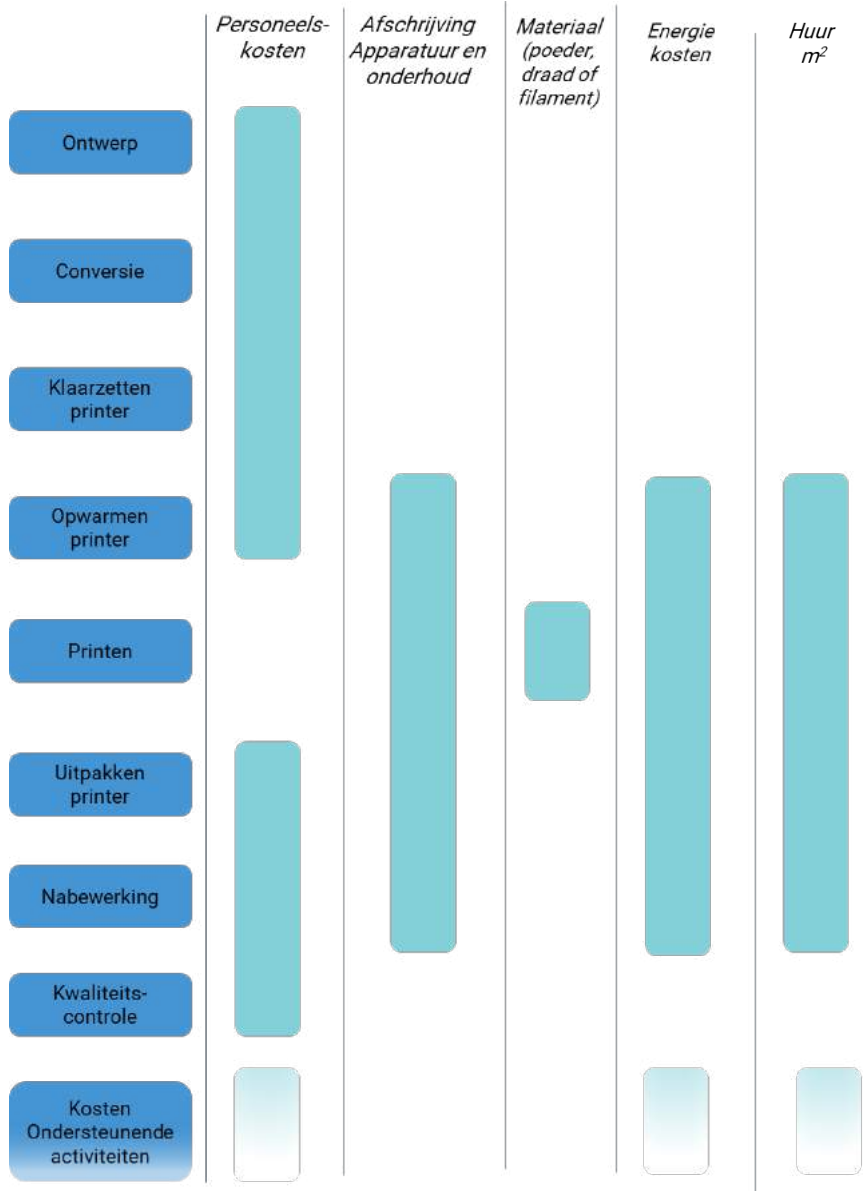
Op het bouwplatform (Figuur 5.3) van de EOS M400 kunnen 528 van deze schroefdopjes in één keer worden geproduceerd, met een totale printtijd van ongeveer 10 uur. De volgende nabewerkingen zijn nodig: glasparelstralen en het loszagen van het bouwplatform. De kostprijs van deze producten wordt geschat op een bedrag tussen de € 1,50 en €2,50 -.



Figuur 5.3 - Productie van 528 screw caps op één bouwplatform met een minimale hoeveelheid nabewerking

Veelvoorkomende kosten bij 3D-metaalprinten

In het onderstaande figuur staan de activiteiten en kosten die in de praktijk vaak worden berekend bij een kostprijsberekening (Baumers, Dickens et al. 2016), (Nagulpelli, King et al. 2019), (Feldmann 2016), (Hopkinson 2003), (Thomas and Gilbert 2014). Naast deze kosten zijn er nog aanvullende kosten mogelijk, zoals bijvoorbeeld de kosten voor advies of administratie.



Figuur 5.4 Veel voorkomende activiteiten (en kosten) in printproces

Type kosten en verdeelsleutels

In de komende paragrafen wordt in meer detail uitgelegd hoe kostprijsberekeningen worden uitgevoerd. Deze paragraaf heeft als doel om de belangrijkste begrippen te beschrijven, die nodig zijn voor het uitvoeren van een kostprijsberekening. Om deze berekeningen te begrijpen, is het belangrijk om eerst een onderscheid te maken in de type kosten die gemaakt worden in een organisatie:

- Variabele kosten (directe kosten). Deze kosten kunnen rechtstreeks worden toegewezen aan het product, zoals het gebruik van het materiaal;
- Vaste (indirecte) kosten voor productie. Voorbeelden zijn de gebruikte machines of de betrokken vaste productiemedewerkers;
- Vaste kosten voor de overhead van de organisatie (indirecte kosten). Dat zijn bijvoorbeeld de algemene kosten voor huisvesting of het salaris van de directeur.

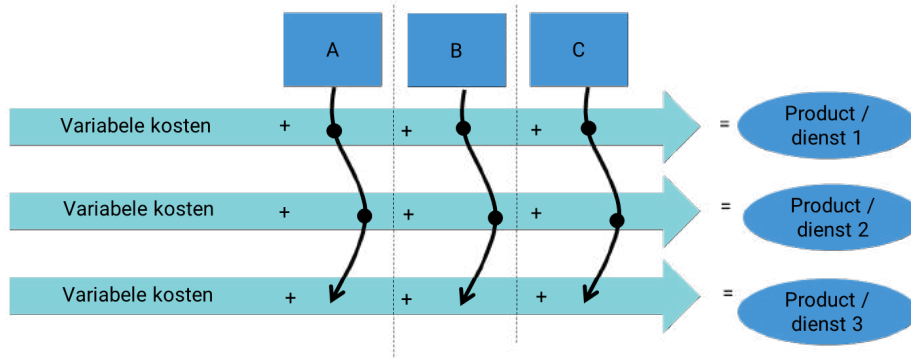
Ook al zijn in de bovenstaande opsomming voorbeelden gegeven van vaste of variabele kosten, een bepaalde kostenpost is niet per definitie een vaste of variabele kostenpost. Bijvoorbeeld energie kan gerekend worden als een vaste kostenpost. Maar als de energiegegevens worden gemeten voor machines in het productieproces, dan kunnen deze kosten beschouwd worden als variabele kosten in plaats van vaste kosten.



Figuur 5.4 Verdeling van kosten met verdeelsleutels

Indirecte kosten kunnen dus niet zomaar worden toegewezen aan een product of dienst bij een kostprijsberekening. Daarom worden deze vaste kosten verdeeld over de verschillende producten en diensten door middel van een verdeelsleutel. Bij integrale kostprijsberekeningen zijn deze verdeelsleutels de spil waar alles om draait. Het Engelse begrip voor verdeelsleutel is 'cost driver' en wordt gebruikt als algemeen begrip om een activiteit te duiden die leidt tot toenemende kosten in een bedrijf. Maar in het kader van kostprijsberekeningen zijn de 'cost drivers' of 'activity cost drivers' de eenheden die worden gebruikt om de indirecte kosten van bedrijfsactiviteiten te kunnen verdelen over producten, diensten of klanten (Kaplan and Cooper 1998). De verdeelsleutels kunnen heel divers zijn: bij productie kan het gaan om het aantal producten of het aantal machine uren; bij een financiële afdeling kan het gaan om het aantal facturen of het aantal offertes; bij een verkoopafdeling kan dit het aantal klantcontacten zijn. Een verdeelsleutel is in essentie niet meer dan een afspraak binnen een bedrijf, ofwel een overeenstemming hoe de vaste kosten van activiteiten binnen een bedrijf worden verdeeld over producten en diensten.

Vaste kosten van activiteit A t/m C worden met verdeelsleutels verdeeld over de bedrijfsprocessen alsof het variabele kosten zijn.



Figuur 5.6 Verdeling van de vaste kosten over verschillende product-dienst combinaties

Door gebruik te maken van verdeelsleutels kunnen dus indirecte kosten verdeeld worden over verschillende producten en diensten alsof het directe, variabele kosten zijn. Het verdelen van de kosten door middel van verdeelsleutels is geen harde wetenschap; zodra er een andere verdeelsleutel wordt gekozen, bijvoorbeeld volume in de plaats van gewicht, dan worden de kosten anders verdeeld. De uitkomst van een kostprijsberekening is daarom altijd een benadering, een goed geïnformeerde inschatting van de kosten en geen exacte uitkomst. De onderbouwing van een kostprijsberekening is daarom cruciaal om de uitkomst te kunnen begrijpen.

Methodes voor kostprijsberekeningen

De kostprijs van producten kan door middel van verschillende methodes worden berekend. Deze methodes geven niet altijd dezelfde uitkomsten en daarom is het belangrijk om de overeenkomsten en verschillen van deze methodes te begrijpen, voordat een kostprijsberekening wordt gemaakt. In dit hoofdstuk worden de drie methodes beschreven die het meest gangbaar zijn voor 3D-printen. Er zijn in de theorie dus nog andere methodes beschreven, die bijvoorbeeld veel gebruikt worden bij onderwijsinstellingen of in de zorg, zoals de kostenplaatsmethode. Voor 3D-printen worden vooral de volgende methodes toegepast in de praktijk: equivalentiemethode, opslagmethode en activity-based costing (en diverse varianten op deze methodes)⁴. Nadat deze verschillende methodes zijn beschreven in de komende paragrafen volgt een algemene reflectie op kostprijsberekeningen.

Equivalentiemethode

De equivalentiemethode is vooral geschikt voor massaproductie van gelijksoortige producten (Bruggeman 2016). Het is dus minder geschikt voor maatwerk of dienstverlening. Vergeleken met de andere methoden is de kostprijs relatief eenvoudig en snel te berekenen.

De kostprijs wordt bij deze methode berekend op de volgende wijze:

$$\text{Kostprijs / eenheid} = \frac{\text{Directe kosten} + \text{Indirecte kosten}}{\text{geproduceerde eenheden}}$$

$$\text{Kostprijs product} = \text{aantal benodigde eenheden} * \text{kostprijs / eenheid}$$

Fictief voorbeeld:

Kosten metaalprinter: € 500.000

Kosten vaste medewerker: €40.000

Kosten metaalpoeder: 75 €/kg

Aantal kg geproduceerd: 3000 kg

$$\frac{\text{Kostprijs}}{\text{eenheid}} = \frac{(75 * 3000) + 500.000 + 40.000}{3000} = 255 \text{ €/kg}$$

In de formule staat onder de noemer de 'geproduceerde eenheden' nadrukkelijk vermeld. Dit is de verdeelsleutel in de formule en bij deze methode wordt meestal een aantal (#), gewicht (kg) of volume-eenheid (cm³) gebruikt.

Als een bedrijf dus kiest voor de equivalentiemethode is het zaak om eerst te bepalen wat de grootste kosten zijn. Op basis van deze informatie kunnen de meest geschikte 'geproduceerde eenheden' worden gekozen. De methode is vooral geschikt voor gelijksoortige producten die op dezelfde wijze worden bewerkt, omdat er met slechts één eenheid wordt gerekend om de indirecte kosten te verdelen. Als er een verscheidenheid is van producten, dan zijn de Opslag Methode en de Activity Based Costing Methode in de praktijk meer nauwkeurige methodes.

Opslagmethode

De kostprijs wordt anders berekend bij de opslagmethode⁵ dan bij de equivalentiemethode. Bij deze methode worden de indirecte kosten (vaste kosten) vergeleken met de directe kosten (variabele kosten). Dit wordt meestal in een percentage uitgedrukt en dan wordt de volgende formule gebruikt:

$$\text{Opslagpercentage} = \frac{\text{Indirecte kosten}}{\text{Directe kosten}} * 100\%$$

Nadat het opslagpercentage is berekend kunnen de totale kosten van een product worden berekend door de variabele kosten te berekenen en deze te vermenigvuldigen met het berekende opslagpercentage.

$$\text{Kostprijs product of dienst} = \text{Directe kosten} * \frac{100\% + \text{Opslagpercentage}}{100}$$

Fictief voorbeeld:

Vaste kosten metaalprinter: € 500.000

Kosten vaste medewerker: € 40.000

Variabele kosten metaalpoeder: 75 €/kg

Totaal aantal kg geproduceerd: 3000 kg

Kosten flexwerker: € 50 /uur

Totaal aantal uur: 200 uur

$$\text{Opslagpercentage} = \frac{500.000 + 40.000}{(3000 * 75) + (200 * 50)} * 100\% = 230\%$$

Wanneer de kostprijs van een productie van een kilogram als variabele kosten € 100 bedragen, zijn volgens deze methode:

$$\text{Kostprijs productie} = €100 * \frac{100\% + 230\%}{100} = € 330$$

Als deze berekeningsmethode wordt gebruikt om één opslagpercentage te berekenen over alle indirecte kosten dan wordt het de primitieve opslagmethode genoemd. Op het moment dat er voor de verschillende type kosten in een bedrijf een ander opslagpercentage wordt berekend, dan wordt de methode de verfijnde opslagmethode genoemd. Er komt dan een apart opslagpercentage voor bijvoorbeeld de arbeidskosten of machinekosten.

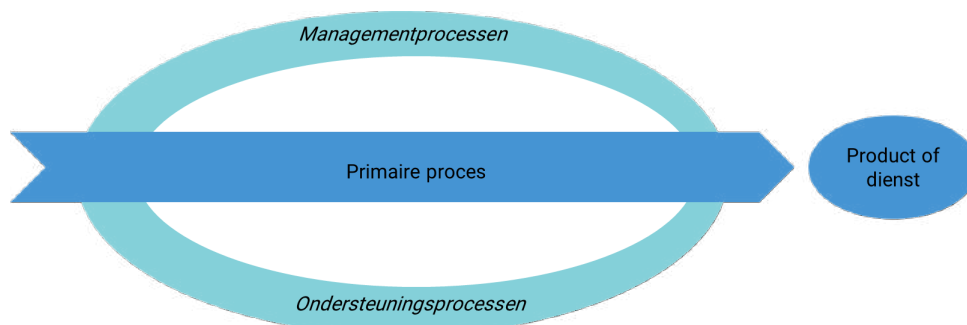
Bij de opslagmethode worden de indirecte kosten uitgedrukt als een percentage van de directe kosten. Het is dus een financiële verdeelsleutel zonder een duidelijke technische onderbouwing. Er is bijvoorbeeld geen lineair verband tussen het gewicht van het metaalpoeder en de printtijd die nodig is voor het printen van één product. Toch worden deze kosten volgens dezelfde ratio verdeeld. De opslagmethode kan dus een methode zijn om snel de kosten te berekenen van een product, waarbij geen technische berekeningen gemaakt hoeven te worden of veel data moet worden verzameld. Dat is tegelijk ook de grote tekortkoming van deze berekeningsmethode; het is niet gebaseerd op technische inzichten of inhoudelijke kennis van het bedrijfsproces.

⁴ De meeste literatuur over kostprijsberekeningen van 3D-printen is geschreven vanuit een duidelijk technisch en niet financieel perspectief. De gekozen methode voor kostprijsberekening wordt dan ook vaak niet genoemd maar is in de meeste gevallen een variatie op één van de drie hierboven genoemde methodes. Een overzicht van studies naar kostprijsberekeningen voor 3D- metaalprinten en de daarbij gekozen methodes staat in het artikel: Otta, K., Paschera and W. H. Sihh (2019). "Improving sustainability and cost efficiency for spare part allocation strategies by utilisation of additive manufacturing technologies." *Procedia Manufacturing* **33**: 123–130.

⁵ Een meer uitgebreide beschrijving van de opslagmethode staat in het boek: Koetzier, W. (2017). *Management accounting berekenen, beslissen, beheersen*, Noordhoff Uitgevers Groningen/Houten.

Activity based costing

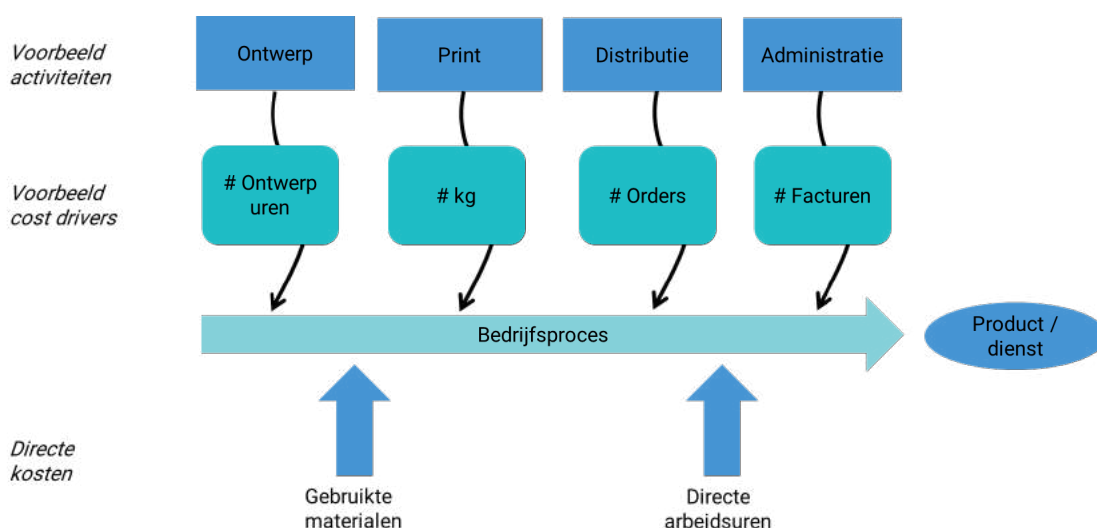
Activity based costing (ABC) is een methode om de kostprijs te berekenen, die ook kan worden toegepast in organisaties met meer complexe bedrijfsprocessen; organisaties waarbij bijvoorbeeld meerdere afdelingen bijdragen aan een product of dienst (Cooper and Kaplan 1991). De output van deze afdelingen zijn vaak indirecte kosten en zijn dus niet direct toe te rekenen aan de geleverde producten of diensten. Het kunnen bijvoorbeeld veel voorkomende managementactiviteiten zijn of ondersteunende activiteiten.



Figuur 5.7 Management en ondersteunende processen in een organisatie. Gebaseerd op: (Harmon 2007)

Bij een ABC wordt onderzocht hoe deze verschillende activiteiten in een organisatie bijdragen aan de kosten van producten en diensten. De eerste stap van een ABC is daarom het identificeren van de relevante activiteiten. Het gaat hierbij om de activiteiten in het bedrijfsproces, die gedaan worden om een product of dienst te kunnen leveren aan klanten. Een belangrijke toevoeging van deze methode is dat ook de activiteiten uit de overhead van een organisatie kunnen worden toegewezen.

In deze methode worden de verschillende kosten geclusterd in activiteiten. Een voorbeeld is het ontwerpproces voor een onderdeel. In plaats van de kosten van de computer, software en de salariskosten van de vaste medewerker afzonderlijk op te nemen als kosten, worden eerst alle kosten van de activiteit 'ontwerpen' berekend. De totale kosten van deze activiteit kunnen daarna aan de kosten van een product worden toegekend met een verdeelsleutel. Een voorbeeld van een verdeelsleutel is het aantal ontwerpturen. Het voordeel van deze methode is, dat als de kosten van verschillende activiteiten in de organisatie in kaart zijn gebracht, de kosten daarna relatief snel berekend kunnen worden voor verschillende producten en diensten.



Figuur 5.8 Verdeling van kosten met cost-drivers, gebaseerd op: (Horngren, Datar et al. 2015)

Nadat de activiteiten van de afdelingen zijn vastgesteld, wordt onderzocht hoeveel tijd en middelen een afdeling alloceert voor deze activiteiten. Dat gebeurt bijvoorbeeld door tijdsregistraties of door managers te interviewen, hoeveel tijd medewerkers kwijt zijn aan de verschillende activiteiten van een afdeling. In het voorbeeld van een financiële afdeling is dit bijvoorbeeld de tijd van medewerkers die nodig is voor het opstellen en versturen van de facturen, offertes en andere activiteiten^{6,7}. Op basis van deze informatie kan berekend worden hoeveel het bijvoorbeeld gemiddeld heeft gekost om één factuur te versturen.

Als laatste worden de verdeelsleutels bepaald zodat de kosten van deze activiteiten kunnen worden toegevoegd aan de kostprijzen van producten en diensten. In het voorbeeld van de financiële afdeling zouden 'aantal offertes' en 'aantal facturen' een logische keuze zijn. De kosten van deze activiteiten kunnen zo relatief eenvoudig worden toegevoegd aan de kostprijs van een product of dienst voor een klant.

Het opzetten van een ABC methode kan een tijdsintensief proces zijn omdat vaak informatie wordt verzameld vanuit de hele organisatie. Meestal wordt een uitgebreide ABC-analyse ook niet gedaan voor de kostprijs van één product, maar om de organisatie in kaart te brengen. Als deze methode (alleen) gebruikt wordt om de kostprijs van metaalprints te berekenen, is het daarom zaak om vooraf duidelijk te bepalen welke activiteiten in de organisatie wel en niet worden meegenomen. Een goede afbakening is dus cruciaal. Zo kan worden voorkomen dat de kostprijsanalyse een onnodig tijdrovend proces wordt. De meeste gepubliceerde studies over 3D-metaalprinten zijn daarom beperkt tot de activiteiten die gekoppeld zijn aan het printproces en dus niet alle activiteiten van de ondersteunende afdelingen. De ABC methode biedt dan nog steeds meerwaarde ten opzichte van de eerder beschreven methodes. Er wordt namelijk gewerkt met verschillende activiteiten en verdeelsleutels waardoor de kostprijsberekening van het printproces nauwkeuriger wordt, doordat het beter gebaseerd kan worden op technische inzichten. Om deze laatste reden wordt deze methode veel toegepast voor 3D-metaalprinten (Cunningham, Wikshåland et al. 2017), (Rickenbacher, Spierings et al. 2013), (Fera, Fruggiero et al. 2017), (C. Lindemann 2015), (Marshall 2001), (van der Merwe 2009).

Samengevat wordt de kostprijs dus bepaald via de ABC-methode door de volgende stappen te doorlopen:

- Vaststellen van het doel waarom de kostprijsberekening wordt uitgevoerd;
- In kaart brengen van het bedrijfsproces dat nodig is om het product of dienst te kunnen leveren;
- Bepalen waar in de organisatie activiteiten worden uitgevoerd voor het product of de dienst;
- Afspreken welke activiteiten wel en niet worden meegenomen (afbakening);
- De kosten bepalen per activiteit in de organisatie.
- Bepalen van verdeelsleutels (cost drivers), om te kunnen bepalen hoe deze vaste kosten in de organisatie opgedeeld worden, verdeeld over de producten en diensten.
- Berekenen van de kostprijs voor product op basis van de variabele en de relevante vaste kosten.

De ABC-methode heeft als voordeel dat er verschillende verdeelsleutels bepaald kunnen worden voor de kosten, zodat er een weloverwogen rekenmodel kan worden opgesteld. Deze methode kan daarom beter-overwogen uitkomsten bieden, dan de equivalentiemethode en de opslagmethode.

⁶ Bij het maken van een ABC is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen de totale capaciteit en de beschikbaarheid van een afdeling. Het verschil is uit te leggen aan de hand van de personeelskosten. Er zijn directe arbeidsuren, bijvoorbeeld de effectieve uren die de operator van de metaal-printer of de ontwerper hebben besteed aan het maken van de 3D-print. Hiernaast zijn er nog indirecte personeelskosten. Dit zijn de ondersteunende activiteiten, zoals overlegtijd, wettelijke pauzetijd, of taken zoals de werkplaats openen, schoonmaken, opruimen en afsluiten. Wat dit voorbeeld laat zien is dat niet alle capaciteit van werknemers en machines is altijd beschikbaar is. In de traditionele variant van ABC (1990) worden niet productieve-uren van mensen en machines meegerekend als kosten. Maar in de nieuwe time-driven ABC (2004) adviseren de auteurs om de niet-productieve uren niet mee te nemen in de berekening. De belangrijkste redenen hiervoor zijn: er hoeft minder data te worden verzameld en de efficiëntie van mensen en machines is makkelijker te berekenen als alleen de beschikbare uren worden berekend.

⁷ Een toelichting op de traditionele en time driven Activity Based Costing staat in uitgewerkt in het volgende artikel: Kaplan, R. S. and S. R. Anderson (2004). "Time-Driven Activity Based Costing." *Harvard Business Review*. Daarnaast staat het in de publicatie: Anderson, R. S. K. S. R. (2007). *Time-Driven Activity-Based Costing*, Harvard Business Review Press.

(On)nauwkeurigheid van kostprijsberekeningen

Er zijn diverse kanttekeningen geplaatst bij integrale kostprijsberekeningen door financiële experts (Marshall 2001). Een belangrijk punt van kritiek is, dat er bij alle methodes minimaal één verdeelsleutel wordt gebruikt om de kosten te verdelen. Meerdere verdeelsleutels zijn mogelijk en die leiden allemaal tot een andere uitkomst. Er is namelijk niet een (direct) causaal verband tussen de indirecte kosten in de organisatie (van der Merwe 2009) en het product of dienst. In de praktijk worden echter deze berekeningen dikwijls met twee cijfers achter de komma uitgedrukt, waardoor er een schijnnaauwkeurigheid ontstaat (Hiltermann 2019). Echter de uitkomst van een kostprijsberekening is in het beste geval een goed geïnformeerde schatting.

Een ander punt van aandacht is dat technische studies over 3D-printen hebben aangetoond dat er in de praktijk een zekere spreiding is van de kosten, als producten worden geprint. Het risico dat er een verkeerde inschatting wordt gemaakt van de kosten wordt groter als deze spreiding toeneemt. Deze spreiding in de gemaakte kosten kan ontstaan om verschillende redenen (Barsing 2018):

- In een uiterste geval worden producten afgekeurd doordat het eindproduct niet aan de specificaties voldoet;
- Er kunnen duidelijke variaties zijn in de procestijden van de belangrijkste activiteiten (voorbereidingen, printen, printplaat leeghalen en schoonmaken, nabewerking en de inspectie van de producten);
- Er zijn geen vaste prijzen afgesproken met de leverancier voor bijvoorbeeld metaalpoeder waardoor de materiaalkosten kunnen variëren.

Op het moment dat er seriematig producten worden geprint, is de tijd die nodig is voor deze activiteiten in de regel beter vooraf in te schatten, dan dat er sprake is van unieke producten, prototypes of eenmalige series. Ook zijn de risico's kleiner bij relatief eenvoudige producten dan bij producten met een complexe vormgeving of afwerking. Als er een grote spreiding in de kosten wordt verwacht is het belangrijk om over een langere periode de werkelijke kosten (en tijden) te meten, zodat er een beter inzicht wordt verkregen in deze spreiding van de kosten. Zo kan het risico worden verlaagd dat de kosten worden overschreden.

Voor het maken van een kostprijsberekening moeten dus diverse keuzes worden gemaakt en soms ook aannames worden gedaan. Het is daarom belangrijk om duidelijkheid te geven over de gemaakte keuzes bij het maken van de berekening. Hiernaast kan het zinvol zijn om de gebruikte informatie en de berekeningen, zoals de prognose voor de jaarlijkse productie, regelmatig te herzien en bij te stellen. Een kostprijsmodel is dan geen statisch document met 'harde cijfers' maar een 'living document'. Uiteindelijk is iedere vorm van kostenberekening in het beste geval een goede benadering van de totale kosten van een product of dienst, op basis van de meest recente cijfers en de te verwachten spreiding van de kosten van vergelijkbare product en diensten.

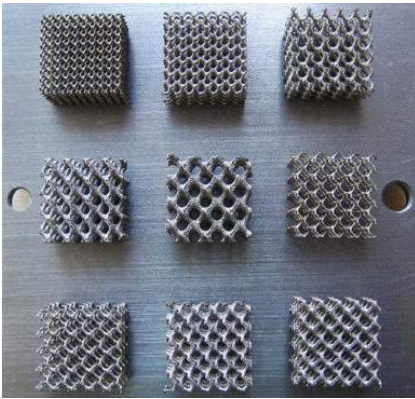
Het is daarom belangrijk om bij een kostprijsberekening altijd (eerst) duidelijkheid te krijgen over de volgende zaken:

- Wat is de doelstelling van de kostprijsberekening?
- Welke methode is gekozen om de kostprijs te berekenen?
- Welke verdeelsleutels zijn gebruikt en welke van deze verdeelsleutels hebben de grootste invloed op de uitkomsten?
- Tot in hoeverre is de informatie in de berekening gebaseerd op technisch en bedrijfsonderzoek?



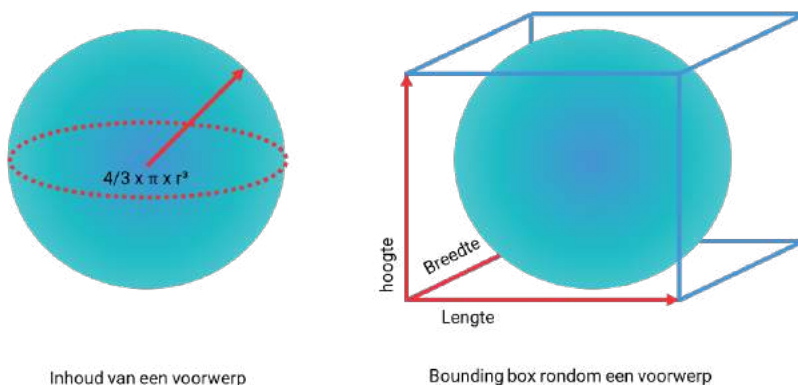
Verdeelsleutels bij 3D-metaalprinten

Kostprijsberekeningen voor 3D-metaalprinten zijn in de praktijk dus vaak complexe berekeningen. De productiemethode biedt veel mogelijkheden en juist hierdoor is de keuze voor een verdeelsleutel soms lastig. Zo wordt bij 3D-metaalprinten veel gewerkt met rasterstructuren (lattice structures) om het totale gewicht van een onderdeel te beperken (Helou 2017). Dat betekent dat een onderdeel niet massief wordt geprint, maar dat er aan de binnenkant een driedimensionaal raster wordt geprint. Dit is gunstig voor het gewicht en de eigenschappen van het eindproduct maar het heeft ook als voordeel dat de hoeveelheid energie tijdens het printproces wordt verminderd en dat de printtijd wordt verkort en materiaalgebruik verminderd. Daarnaast hebben sommige producten 'support' nodig tijdens het printproces. Dat betekent dat er extra materiaal wordt toegevoegd om de producten te ondersteunen tijdens het printproces. De hoeveelheid supportmateriaal is afhankelijk van het ontwerp van het product de positionering van het product op de bouwplaat in de printer. Een directe consequentie is dat de verhouding tussen gewicht en volume hierdoor niet altijd gelijk is waardoor het lastig wordt om een goede verdeelsleutel te kiezen⁸ (Nazir, Abate et al. 2019).



Figuur 5.9 Lattice structuren, bron: (Yan, Hao et al. 2012)

Zo kunnen verschillende verdeelsleutels worden gekozen om de totale kosten van een print te verdelen over meerdere producten op de bouwplaat. Bijvoorbeeld het aantal kilogrammen (kg) metaal dat wordt geprint, het volume van een onderdeel (cm³) of de 'bounding box' (cm³) (Yim and Rosen). De bounding box is de effectieve ruimte die moet worden gereserveerd voor de productie van een onderdeel op de bouwplaat van een metaalprinter, zoals te zien is op de onderstaande afbeelding. Een vierde mogelijkheid voor een verdeelsleutel is de hoogte van een product (z-richting). Doordat producten laag-voor-laag worden opgebouwd is de hoogte medebepalend voor de totale printtijd. Meerdere verdeelsleutels kunnen dus gekozen worden om de indirecte kosten te verdelen over de geprinte onderdelen.



Figuur 5.10 Inhoud en bounding box van een voorwerp

⁸ Dit geldt in het bijzonder als de topologie van de interne structuur is geoptimaliseerd.

Ook verdeelsleutels worden gecombineerd: bijvoorbeeld 50 procent gewicht en 50 procent hoogte. Maar de berekening is in alle gevallen enigszins arbitrair, omdat de uitkomst bepaald wordt door de keuze voor de verdeelsleutel; een keuze die ook anders gemaakt had kunnen worden. Als de kosten bijvoorbeeld verdeeld worden over het gewicht van de producten dan wordt geen rekening gehouden met de afmetingen en de hoeveelheid producten die op één bouwplaat geprint kunnen worden. Op het moment dat gerekend wordt met het volume van de 'bounding box', wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de hoeveelheid materiaal die wordt gebruikt. Geen enkele verdeelsleutel kan dus alle factoren mee laten wegen.

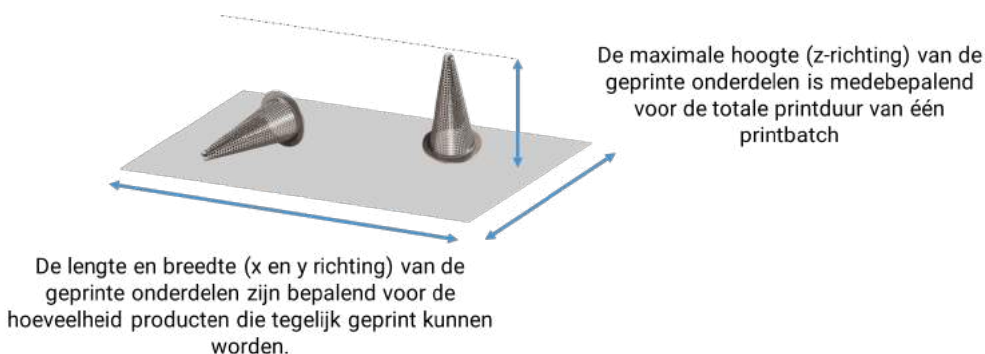
Het printproces maakt het in de praktijk ook vaak lastig om een verdeelsleutel op de juiste manier toe te passen. Zo kan in de praktijk één product soms meerdere keren worden geprint. Dat kan tegelijk maar ook verspreid over een periode. Ook kunnen meerdere onderdelen worden geprint voor het maken van één eindproduct. In praktijk wordt er daarom vaak voor gekozen om eerst de prijs van de verschillende onderdelen te berekenen en pas daarna de totale prijs van een product.



9

Figuur 5.11 Opdelen van printopdracht

Een tweede factor om rekening mee te houden is dat er meerdere onderdelen geprint kunnen worden op één bouwplaat in de 3D-metaalprinter; ofwel meerdere onderdelen kunnen tegelijk geprint worden in één print-batch. De beschikbare oppervlakte op de bouwplaat bepaalt dus hoeveel producten er tegelijk geprint kunnen worden. Maar doordat producten laag-voor-laag worden opgebouwd is de hoogte medebepalend voor de tijd die het kost om een print-batch te printen.¹⁰



Figuur 5.12 Verschillende print oriëntaties

Als een product dus rechtop wordt gezet, neemt het minder ruimte in op de bouwplaat waardoor meer producten tegelijk geprint kunnen worden. Hierdoor duurt het printproces langer. Er is daarom geen altijd-passende verdeelsleutel voor print-batches maar moet de meest geschikte verdeelsleutel worden gekozen.

⁹ Afbeelding zijn van www.3Dbench.com

¹⁰ Afbeeldingen zijn van www.3Dbench.com en www.k3D.nl

Niet alleen zijn er verdeelsleutels nodig voor vaste kosten maar ook voor printbatches. Robin Cooper, één van de grondleggers van activity-based costing, heeft drie type activiteiten beschreven voor ABC (Cooper 1990), (Cooper and Kaplan 1991). Zijn overzicht is bruikbaar voor kostprijsberekeningen van 3D- metaalprinten:

1. *Unit-level activities*: bedrijfsactiviteiten die worden uitgevoerd voor een individueel product of dienst;
2. *Batch-level activities*: bedrijfsactiviteiten die worden uitgevoerd voor productielijnen en of batches;
3. *Product and consumer sustaining activities*: dit zijn de ondersteunende activiteiten om de productie en dienstverlening mogelijk te maken.

Om een inzicht te geven in hoe deze drie types activiteiten gekoppeld zijn aan het 3D-printproces is een overzicht gemaakt. Dit activiteitenoverzicht staat hieronder afgebeeld. Dit uitgewerkte proces is bedoeld om een algemeen beeld te schetsen; in de praktijk zijn deze processen zelden op exact dezelfde wijze omschreven en ingericht.

Processtappen:	Software	Energie	Materiaal	Medewerker(s)	Machine	Overige apparatuur
Ontwerp	Units			Units		
Conversie	Units					
Klaarzetten printer				Units/Batch	Units/Batch	
Opwarmen printer					Units/Batch	
Printtijd		Batch/units	Units/batch		Units/Batch	
Afkoeltijd printer					Units/Batch	
Uitpakken printer				Units/Batch		
Nabewerking		Units/batch		Units/batch		Units/batch
Kwaliteitscontrole		Units/batch		Units/batch		Units/batch
Ondersteunende activiteiten:						
<i>Huur van de ruimte (3D-printer, opslag materialen, werkplek operator)</i>						
<i>Onderhoudskosten 3D-printer</i>						
<i>Materiaalverspilling door bijvoorbeeld mislukte prints</i>						
<i>Salaris indirect betrokken werknemers (administratie, management, verkoop)</i>						
<i>Investeringskosten metaalprinter (en overige apparatuur)</i>						
<i>Transportkosten</i>						

Tabel 5.1 Overzicht van veelvoorkomende kosten

In het overzicht staat ook nabewerking beschreven als activiteit. Als een product geprint is met een 3D-metaalprinter heeft het namelijk vrijwel nooit het juiste afwerkingsniveau. Zo kan het oppervlak te ruw zijn voor bepaalde toepassingen. Dat betekent dat er in de meeste gevallen nog nabewerkingen nodig kunnen zijn. Dit kan een relatief simpele handeling zijn maar het kan ook vragen om meer ingrijpende machine-handelingen, zoals het CNC frezen van de oppervlakte van het geprinte onderdeel.

Bij sommige printtechnieken wordt er tijdens het printen naast metaalpoeder ook een bindmiddel toegevoegd. Dit bindmiddel wordt na het printen verwijderd in een sinterproces¹¹. Er zijn dus nog diverse aanvullende activiteiten mogelijk nadat een onderdeel is geprint. Zeker als deze activiteiten hoge kosten meebrengen, worden deze kosten in de regel ook berekend bij een kostprijsberekening (Baumers, Dickens et al. 2016).

¹¹ Sinteren is het verhitten van het materiaal tot een temperatuur waarbij het net niet smelt. Dit heeft een positief effect op de hardheid van verschillende materialen.

In het bovenstaande overzicht staan bij verschillende activiteiten 'units/batch'. Daarmee wordt bedoeld dat deze kosten voor alle producten zowel afzonderlijk als per printbatch kunnen worden berekend. In de volgende twee paragrafen wordt er dieper op dit onderwerp ingegaan. In deze tekst wordt beschreven welke onderwerpen er spelen als de kosten worden berekend die horen bij 3D-printactiviteiten. In de eerstvolgende paragraaf wordt ingegaan op de directe kosten en in de daaropvolgende paragraaf wordt ingegaan op de indirecte kosten.

Schijnbaar directe kosten: materiaalkosten, energiekosten en personeelskosten

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op een aantal directe kosten: materiaalkosten, energiekosten en personeelskosten. Veel van deze kosten zijn variabele kosten maar toch moeten veel van deze kosten alsnog met verdeelsleutels worden verdeeld, om de kosten te kunnen berekenen voor een geprint onderdeel.

Materiaalkosten zijn variabele kosten en deze kosten zijn direct toe te wijzen aan een product. Er is echter ook altijd materiaalverlies en deze kosten kunnen ook worden toegewezen aan producten. Om een product te printen met een 3D-metaalprinter is metaalpoeder nodig, mogelijk in combinatie met een bindmiddel. Of, in het geval van WAAM, wordt er gewerkt met een lasdraad in de plaats van poeder. Dit poeder wordt tijdens het printproces laag-voor-laag toegevoegd zodat een product wordt opgebouwd. De prijs van het materiaal wordt bepaald door de marktprijs van het gebruikte metaalpoeder, zoals aluminium, titanium of gereedschapsstaal. Vaak is er sprake van materiaalverlies door verschillende oorzaken: de eerste reden is het verlies van metaalpoeder tijdens het printen. Doordat het niet-versmolten metaalpoeder kan worden hergebruikt, leidt dat in de praktijk tot zeer geringe verliezen. De tweede reden is dat er soms 'supportmateriaal' moet worden gebruikt. Dat is materiaal dat wordt toegevoegd tijdens het printproces om het product tijdelijk te ondersteunen. Dit supportmateriaal wordt verwijderd tijdens het nabewerkingsproces. De derde reden dat er materiaal verloren gaat, zijn mogelijke misprints. Dat kan komen door een verkeerde instelling, een technische storing of een ontwerpfout. Het is vooraf niet bekend of er iets fout gaat tijdens het printen. Er moet dus een aanname worden gedaan voor het aantal mislukte prints. Het is daarom belangrijk om bij te houden hoe vaak er prints mislukken ten opzichte van de totale productie. Daarna kunnen deze kosten door middel van een verdeelsleutel worden toegevoegd aan de kostprijs van een product.

Naast de materiaalkosten zijn er energiekosten die bijdragen aan de kostprijs. Dit is de energie die nodig is voor de printer tijdens het totale proces (Baumers, Dickens et al. 2016):

- Opwarmtijd machine;
- Printtijd;
- Afkoeltijd;
- Eventueel energiekosten van het nabewerkingsproces.

De benodigde energie kan worden gemeten door middel van verschillende methodes. De eerste methode is tijdens iedere printopdracht de gebruikte hoeveelheid energie te meten. De gebruikte energie is dan bekend voor één print batch. Deze energiekosten moeten daarna dus nog verdeeld worden over de geprinte onderdelen door middel van een verdeelsleutel, zoals bijvoorbeeld de verhouding van het gewicht of volume van de geprinte onderdelen. Een tweede methode om de energiekosten te berekenen is door te meten hoeveel energie de printer gebruikt in een langere periode. Bijvoorbeeld door te berekenen hoeveel energie de printer op jaarbasis gebruikt. Als daarnaast bekend is hoeveel gewicht of volume er is geprint, kunnen de kosten verdeeld worden over de producten met een verdeelsleutel. Het verschilt per bedrijf (en de beschikbare data) welke methode het meest geschikt is voor een kostprijsberekening. Beide uitkomsten leiden tot andere uitkomsten, omdat in de eerste methode alleen de directe kosten worden meegenomen. Bij de tweede methode wordt ook alle indirecte tijd meegenomen in de berekening voor bijvoorbeeld een mislukte printbatch.



De personeelskosten van de operator van de metaalprinter kunnen op een vergelijkbare wijze worden berekend (Hopkinson 2003). Volgens de eerste methode wordt de tijd exact bepaald die nodig is voor iedere printbatch, waarna de kosten worden verdeeld over de geprinte onderdelen in de batch. Volgens de tweede methode wordt de tijd berekend die de operator in een periode besteed aan het bedienen van de metaalprinter. Deze kosten kunnen daarna verdeeld worden aan de hand van een verdeelsleutel, zoals het aantal producten, het aantal kilogram of het geprinte volume.

Er zijn hiernaast nog verschillende indirecte personeelskosten. Zo is het bijvoorbeeld belangrijk om te benadrukken dat er nog weinig mensen gespecialiseerd zijn in 3D-metaalprinten in Nederland. Dat betekent dat er waarschijnlijk ook nog extra kosten gemaakt moeten worden om medewerkers op te leiden.

Ook al lijken de materiaal, energie en personeelskosten directe kosten, er zijn in de praktijk vaak toch nog verdeelsleutels nodig om deze kosten te kunnen verdelen. Dit komt doordat er aanvullende vaste kosten zijn, het printproces niet altijd efficiënt verloopt en er meerdere producten tegelijk worden geprint. Ook voor deze kosten zijn in de praktijk dus nog vaak verdeelsleutels nodig.

De grootste indirecte kostenpost: printerkosten

De grootste vaste kostenpost bij 3D-metaalprinten is de printer. De wijze waarop deze kosten worden verdeeld over de producten kan dus van grote invloed zijn op de uiteindelijke kostprijs (Nagulpelli, King et al. 2019).

Meestal wordt gerekend met de afschrijving van de printer. Dit zijn de kosten die jaarlijks worden afgeschreven voor de waardevermindering van de printer. Ieder jaar wordt dus een gelijk bedrag afgeschreven. Doordat er aanvullende installatiekosten zijn en extra kosten om de printer bedrijfsklaar te maken, worden deze kosten vaak opgeteld bij de aanschafwaarde. De totale kosten van de aanschaf en de installatie worden dan over dezelfde periode afgeschreven.

Als er een afschrijvingsperiode wordt gekozen van bijvoorbeeld vijf jaar dan kan er dus gerekend worden met een jaarlijks waardeverlies van twintig procent. Niet het totale bedrag hoeft te worden afgeschreven als de verwachting is dat de metaalprinter na die periode nog een restwaarde heeft, bijvoorbeeld voor de onderdelen of de materialen die zijn gebruikt. Dit leidt tot de onderstaande afschrijvingsformule.

$$\text{jaarlijkse afschrijving} = \frac{\text{aanschafwaarde} - \text{restwaarde}}{\text{gebruiksduur}}$$

Naast deze kosten wordt in sommige gevallen ook gerekend met de investeringskosten (Otta and H. Sihn 2019). Die kosten kunnen worden meegenomen in de berekening als het een lening of een financial leasecontract betreft voor de printer. Er wordt dan berekend wat er jaarlijks wordt betaald aan de bank voor deze financiële oplossing. Het is echter niet gebruikelijk dat de kosten van algemene bedrijfsinvesteringen worden meegenomen in een kostprijsberekening. Er is namelijk geen directe relatie tussen de metaalprinter en de investering waardoor de berekening arbitrair wordt¹².

De onderhoud en reparatiekosten kunnen, naast de jaarlijkse afschrijving, ook worden meegenomen in de berekening van de jaarlijkse kosten. Dat kan door de kosten te nemen van onderhoudscontracten en eventueel een bedrag in te schatten voor aanvullende jaarlijkse reparatiekosten.

Op het moment dat de jaarlijkse kosten van de metaalprinter zijn berekend, is de kostprijs nog niet bekend. De kostprijs is namelijk ook afhankelijk van de hoeveelheid producten die wordt geproduceerd. In de meeste gevallen wordt echter de kostprijsberekening gebruikt voor het lopende productiejaar en wordt gewerkt met een productieprognose. Hoeveel gaat de metaalprinter in het komende jaar produceren? Omdat de kosten van een metaalprinter relatief hoog zijn, heeft deze prognose een grote invloed op de uiteindelijke kostprijs. Het is daarom raadzaam om de prognose regelmatig te herzien op basis van de meest actuele cijfers en verwachtingen.

¹² Een reflectie op de spreiding van financieringskosten bij 3D-printen wordt beschreven in het artikel: Ruffo, M., et al. (2006). "Costestimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers," *Journal of Engineering Manufacture* 220(9): 1417–1427.

Als de uiteindelijke machinekosten worden bepaald, moet gewerkt worden met een verdeelsleutel. Dat kan bijvoorbeeld door het aantal printuren/jaar te berekenen maar ook het aantal kilogram per jaar of het geprinte volume per jaar. Bij het maken van een keuze is het vooral belangrijk dat een verdeelsleutel wordt gekozen, die past bij de gekozen printtechniek. Als er dan gerekend wordt met de verdeelsleutel 'printuren', dan is de consequentie dat niet de prijs per product maar de prijs per print-batch wordt berekend. Een extra verdeelsleutel is daarna nodig om de prijs per product te berekenen. Een extra berekening is dan nodig en ook meer data moet worden verzameld om de kostprijs te kunnen bepalen.

Een andere optie is dat de kosten verdeeld worden aan de hand van bijvoorbeeld het gewicht (kg) of volume (cm³), omdat dan de prijs direct berekend wordt per product en niet eerst per print-batch. De berekening is echter minder nauwkeurig. Bijvoorbeeld: het maakt volgens deze berekening niet uit of de bouwplaat geheel of slechts gedeeltelijk is gevuld. Ook maakt het niet uit hoe hoog geprinte producten zijn, terwijl deze hoogte vaak mede bepaalt hoelang het printproces duurt. Om deze redenen is de tweede optie minder geschikt voor bijvoorbeeld kostenoptimalisatie van het printproces.

Er zijn dus meerdere mogelijkheden om de kosten van de machine te berekenen voor de kostprijs. Bij deze verschillende methodes worden andere verdeelsleutels gebruikt. Een voorbeeld is gebruikt om te laten zien dat de mogelijkheden nog verder vergroot kunnen worden door andere factoren toe te voegen aan een verdeelsleutel. Dat kan nuttig zijn als één vaste kostenpost, zoals een metaalprinter, een hele grote invloed heeft op de uiteindelijke kostprijs van producten.

Conclusie

Online worden legio online print calculators aangeboden, waarin een bedrijf snel een eenvoudig de kosten van een geprint product kan berekenen. Dit onderzoek heeft echter aangetoond dat zo'n 'one size fits all' model meestal niet de juiste inzichten geeft. Een kostprijsberekening kan beter worden afgestemd op de belangrijkste parameters van het totale printproces van het desbetreffende bedrijf. Uit dit onderzoek komt naar voren dat kostprijscalculaties geen exacte berekeningen zijn. Dat komt omdat er hoge vaste kosten zijn die verdeeld moeten worden over de producten. Het opstellen van deze berekening moet daarom niet zozeer gezien worden als een louter financiële aangelegenheid; het verdelen van de vaste kosten kan beter belicht worden als managementbeslissingen van het 3D- printproces.

Juist omdat kostprijsberekeningen geen harde wetenschap zijn, is het extra belangrijk om de gebruikte aannames in de berekeningen te toetsen in de praktijk. Om deze reden is het belangrijk dat er vanuit het management goed zicht is op de dagelijkse gang van zaken van het printproces en dat de belangrijkste parameters in het printproces (en als het goed is ook de kostprijsberekeningen) worden gemonitord.



Nawoord

Dit rapport is tot stand gekomen door een tweejarig onderzoeksproject over 3D-metaalprinten met een aantal Nederlandse bedrijven. Tijdens dit project zijn verschillende bijeenkomsten georganiseerd waarin ook de bedrijfskundige aspecten van 3D-metaalprinten aan bod kwamen. Zo is onder andere geïnterviewd wat de meest belangrijke onderwerpen waren om te verder te onderzoeken. Veel van het daadwerkelijke onderzoek is mede uitgevoerd door het afnemen van een interviews bij een groot aantal bedrijven in Nederland. Wij willen dit nawoord gebruiken als dankwoord voor alle bedrijven die tijdens dit proces betrokken zijn geweest.

Naast de bedrijven willen we ook de studenten hartelijk bedanken die betrokken zijn geweest bij delen van dit onderzoek. Dit zijn drie studentengroepen van de opleiding bedrijfskunde van Windesheim als onderdeel van het vak 'leiderschap en innovatie'. Wij willen daarbij de coördinerende docent Louis Celant hartelijk danken voor zijn bijdrage. Daarnaast hebben drie studenten hun afstudeeronderzoek gedaan die we willen bedanken voor hun bijdrage: Marwin van de Ruitenbergh, Edgar Postema en Jurjen de Boer. Als laatste willen we onze collega's bedanken die ook betrokken zijn geweest bij de uitvoering van dit project: Ruud van Abbema, Paul Dijkstra, Tijmen Matenboer en vanuit de project ondersteuning: Ellen Smits, Mijke Leushuis en Annemiek Overweg.

Referenties

Alhamad, I., et al. (2019). Printing Applications in Mechanical Engineering Education. Integrating 3D Printing into Teaching and Learning.Practitioners' Perspectives. A. Nagla and M. Swe Khine: 90-131.

AM, M. (2022). "Latest Alfa Romeo F1 race car sees metal AM in more critical applications." from <https://www.metal-am.com/latest-alfa-romeo-f1-race-car-sees-metal-am-in-more-critical-applications/>.

AMPower (2020). Metal Additive Manufacturing Management Summary. Hamburg, Duitsland.

Anderson, R. S. K. S. R. (2007). Time-Driven Activity- Based Costing, Harvard Business Review Press.

ANIWAA (2021). Metal 3D printers in 2021: a comprehensive guide.

Barsing, J. (2018). A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing. A Study of Low-Volume Components Produced with Selective Laser Melting. Karlskrona, Sweden, Blekinge Institute of Technology

Baumers, M., et al. (2016). "The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push " Technological Forecasting and Social Change Volume 102: pp 193-201.

Baumers, M., et al. (2016). "The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push." Technological Forecasting and Social Change 102 193-201.

Beltagui, A. R., A. Candi, M. (2020). "Exaptation in a digital innovation ecosystem: The disruptive impacts of 3D printing." Research Policy 49(1).

Binon, K. (2017). "3D-Metaalprinten" bestaat niet.

Binon, K. (2021). "3D printen gaat voor veel nieuwe jobs zorgen. Onderzoek wijst uit: bedrijfsleven voert investeringen in AM verder op." 3D Print Magazine.

BMD (i.o.) BMD Design Guide. Desktop Metal

Bruggeman, W. D. L., E. Everaert, P. Hoozée, S. Patfoort, C. (2016). Analytisch boekhouden en kostencalculatie, Intersentia Antwerpen, Cambridge.

C. Lindemann, T. R., U. Jahnke, R. Koch (2015). "Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing." Rapid Prototyping Journal 21 216–227.

CBS (2017). 7 procent bedrijven gebruikt robots.

Choudhary, A., and E. Prasad (2020). 3D Printing Metal Market by type form and end-use: global opportunity analysis and industry forecast 2019-2026, Allied Market Research.

Christensen, C., et al. (2015). "What Is Disruptive Innovation? Twenty years after the introduction of the theory, we revisit what it does—and doesn't—explain." Harvard Business Review December 2015: pp. 44-53.

Cooper, R. (1990). "Implementing an activity-based cost system." Journal of Cost Management 4(1): 33-42.



Cooper, R., and R. Kaplan (1991). Activity-Based Systems: Measuring the Costs of Resource Usage, Harvard Business School Press.

Cunningham, C., et al. (2017). " (2017) Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing." Procedia Manufacturing: 650 – 657.

Danneels, E. (2004). "Disruptive Technology Reconsidered: A Critique and Research Agenda." Journal of Product Innovation Management 21(4): 246-258.

Dass, A. and A. Mordi (2019). "State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design." Coatings 9(7).

de Witte, M. and J. Jonker (2013). "Fietsen in Mul Zand." Management Executive 2013: pp 214-217.

Derwar, C. and S. Keller (2009). "The Irrational Side of Change Management." McKinsey Quarterly.

Douglas, C., et al. (2020). "Selection of additive manufacturing technologies in productive systems: a decision support model." RafaelGestão & Produção: Digital Transformation, Intelligent Manufacturing and Supply Chain Management 4.0 27(3).

Duda, T. and L. Venkat Raghavan (2016). "3D Metal Printing Technology." IFAC-PapersOnLine Volume 49(Issue 29): Pages 103-110.

EOS (2020) DMLS Materials for additive manufacturing of metal parts.

Feldmann, C. P., A. (2016). "A holistic decision framework for 3D printing investments in global supply chains." Transportation Research Procedia 25: 677-694.

Fera, M., et al. (2017). "A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing." International Journal of Advanced Manufacturing Technology 92: 4275–4291.

Gadagi, B. and R. Lekurwale (2021). "A review on advances in 3D metal printing." Materials Today: proceedings Volume 45: 277-283.

Gunasekaran, J., et al. (2021). "Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review." Materials Today: proceedings 27, part 2: 252-256.

Harmon, P. (2007). Business Process Change. A Guide for Business Managers and BPM and Six Sigma Professionals, Morgan Kauffman Publications.

Helou, M. K., S. (2017). "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 31(2018-3).

Hiltermann, G. (2019). "De zin en onzin van kostenallocatie en interne verrekening." from <https://www.nyenrode.nl/nieuws/n/zin-onzin-kostenallocatie-interne-verrekening>.

Hopkinson, N. a. D., P. (2003). "Analysis of rapid manufacturing-using layer manufacturing processes for production." Mechanical Engineering Science, 217.

Horngren, C. T., et al. (2015). Cost Accounting A Managerial Emphasis.

ISO/ASTM (i.o.) ISO/ASTM 52900(en) Additive manufacturing – General principles – Terminology.

- K3D (2022). "Deeg Snijmes." from <https://k3D.nl/case/deeg-snijmes/>.
- Kaplan, R. S., and S. R. Anderson (2004). "Time-Driven Activity Based Costing." Harvard Business Review.
- Kaplan, R. S., and R. Cooper (1998). Cost & effect: using integrated cost systems to drive profitability and performance., Harvard Business School Publisher.
- Koetzier, W. (2017). Management accounting berekenen, beslissen, beheersen, Noordhoff Uitgevers Groningen/Houten.
- Kotter, J. (1995). "Leading Change: Why Transformation Efforts Fail." Harvard Business Review (May-June 1995).
- Lepore, J. (2014). The Disruption Machine. What the gospel of innovation gets wrong. The New Yorkers. New York, Condé Nast Publications.
- Marshall, J. (2001). "Explicit Cost Dynamics: An Alternative to Activity-Based Costing." Financial Executive 17(5): 16.
- Nagulpelli, K., et al. (2019). "Integrated traditional and additive manufacturing production profitability model." Procedia Manufacturing 34: 619–630.
- NASA (2020). "Future Rocket Engines May Include Large-Scale 3D Printing." from <https://www.flickr.com/photos/nasamarshall/50345711102>.
- Nazir, A., et al. (2019). "A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104: 3489–3510.
- Nichols, M. (2019). "How does the automotive industry benefit from 3D metal printing?" Metal Powder Report Volume 74, (Issue 5): 257-258.
- Otta, K., Paschera and W. H. Sihn (2019). "Improving sustainability and cost efficiency for spare part allocation strategies by utilisation of additive manufacturing technologies." Procedia Manufacturing 33:123–130.
- Palmer, N. (2018). "What is BPM?". from <https://bpm.com/what-is-bpm>.
- Papazoglou, E., et al. (2022). "On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review." Archives of Computational Methods in Engineering 29: 941–973.
- ReicheltElektronik (2020). Nederlandse bedrijven zien 3D-printen als oplossing in coronatijd. Reichelt elektronik Magazin.
- Rickenbacher, L., et al. (2013). "An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)." Rapid Prototyping Journal 19 (3) 2013: 208–214.
- Ruffo, M., et al. (2006). "Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers." Journal of Engineering Manufacture 220(9): 1417–1427.
- Shahrubudina, N., et al. (2019). "An overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, Applications." Procedia Manufacturing Volume 35: 1286-1296.



Sun, S., et al. (2017). "Powder bed fusion processes: An overview." Laser Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies, and Applications: 55-77.

Thomas, D., and S. Gilbert (2014). "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion." NIST Special Publication (1176).

TWI (2021). "What is Directed Energy Depositon (DED)?".

Vafadar, A., et al. (2021). "Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges." Additive Manufacturing and System: From Methods to Applications 11.

van der Merwe, A. (2009). "Debating the principles: ABC and its dominant principle of work." Cost Management 23(5)(20).

Velling, A. (2021). "Metal Extrusion." from <https://fractory.com/metal-extrusion/>.

Wissink, W. (2019). Focus op stuksprijs remt toepassing 3D metaalprinten. D. P. Magazine. 26 juni 2019.

Yan, C., et al. (2012). "Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting." International Journal of Machine Tools and Manufacture 62(November 2012): 32-38.

Yim, S. and D. Rosen Build Time and Cost Models for Additive Manufacturing Process Selection. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers.

Zianne, M., and N. Crane (2019). "Binder jetting: A review of process, materials, and methods." Additive Manufacturing and System: From Methods to Applications Volume 28: Pages 781-801.

In samenwerking met

TRICAS
DEVELOPING NEXT GENERATION PRODUCTS

AWL.

MOBA

K3D
MASTERS IN 3D METAL PRINTING

TRIVIUM
PACKAGING

TECHNICAMPUS
ontwikkelen van talentvol vakmanschap

TRUMPF

Nik|hef

amitek

technologies
added

**MACHINEFABRIEK
GEURTSSEN
DEVENTER B.V.**

AMBITION Deel 1: Business Case

Eindrapportage

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

Deze publicatie is tot stand gekomen door een onderzoek naar 3D-metaalprinten van 2019 tot 2021. Dit onderzoek is uitgevoerd door onderzoekers, docenten en studenten van Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven. Binnen dit project is ook onderzoek gedaan vanuit een bedrijfskundig perspectief waarbij de volgende drie onderwerpen zijn onderzocht:

- Verandermanagement binnen bedrijven om 3D-metaalprinten mogelijk te maken
- De toegevoegde waarde van de verschillende 3D-metaalprinttechnieken
- Kostenberekeningen van 3D-metaalprinten