



Ondersteunt door twee case studies beschrijft dit artikel hoe één van deze technologieën - Additive Manufacturing (AM) (ook bekend als '3D-printing') - toegepast kan worden om significant beter presterende Supply Chains (SC's) te ontwerpen.

Veroorzaakt 3d-printing disruptie van de supply chain?

Victor Verboeket, Fontys Hogeschool voor Techniek en Logistiek

INTRODUCTIE

Digitale technologieën veranderen onze wereld snel. Ondersteunt door twee case studies beschrijft dit artikel hoe één van deze technologieën - Additive Manufacturing (AM) (ook bekend als '3D-printing') - toegepast kan worden om significant beter presterende Supply Chains (SC's) te ontwerpen. Een tekort aan kennis over de effecten van AM op het ontwerpen van SC's wordt een hiaat in de wetenschappelijke literatuur beschouwd (Holmström, Holweg, Khajavi, & Partanen, 2016; Waller & Fawcett, 2014).

Theoretisch kader

Historisch gezien hebben SC's zowel incrementele als disruptieve veranderingen ondergaan ten gevolge van technologische ontwikkelingen en/of trends in de samenleving. Incrementele veranderingen zijn relatief kleine veranderingen, bijvoorbeeld kwaliteitsverbeteringen waarbij lean technieken (Holweg, 2007) ingezet worden. Bij disruptieve veranderingen (ook wel 'game-changers' genoemd) veranderen daarentegen de rollen van de verschillende belanghebbenden (stakeholders) in de SC significant (Fawcett & Waller, 2014). Deze veranderingen gaan ver terug in de geschiedenis. Ze werden versneld tijdens de industriële revoluties. De eerste industriële revolutie werd veroorzaakt door de uitvinding van de stoommachine in de 18e eeuw. De tweede industriële revolutie startte met de uitvinding van elektriciteit, terwijl de derde industriële revolutie werd veroorzaakt door de uitvinding van informatie- en communicatietechnologie in de 20e eeuw. Volgens het World Economic Forum staat onze samenleving momenteel op de rand van de vierde industriële revolutie en zullen geavanceerde technologieën onze samenleving ingrijpend wijzigen (Schwab, 2017). Voorbeelden van deze technologieën zijn mobiele supercomputers, artificiële intelligentie (AI), blockchain technologie, autonome voertuigen en AM – de techniek die besproken wordt in dit artikel.

126

AM is een digitale productietechniek die ook bekend staat als 3D printing en ingezet kan worden voor verschillende toepassingen zoals Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) en Rapid Manufacturing (RM). Het verschil met traditionele (subtractieve) productie is dat bij traditionele productie stukjes materiaal verwijderd worden van een massief blok (bijvoorbeeld door boren, zagen of frezen), terwijl bij AM materiaal laagje voor laagje toegevoegd wordt (ISO/ASTM, 2015). AM werd uitgevonden in de vroege negentiger jaren en werd allereerst gebruikt om prototypes (RP) te produceren van voornamelijk kunststoffen. De technologie werd volwassen. Het werd mogelijk om meerdere materialen te printen, bijvoorbeeld hittebestendige polymeren, waardoor het toepassingsgebied werd uitgebreid naar gereedschappen (RT). Rayna and Striukova (2016) beschouwen RP en RT toepassingen als volwassen, in tegenstelling tot productie van eindproducten (RM). Daarentegen noemen Maresch and Gartner (2018) verschillende RM-toepassingen in verscheidene industrieën. Voorbeelden zijn het produceren van reserveonderdelen waar (zeer) weinig vraag naar is, gepersonaliseerde juwelen en gepersonaliseerde medische producten zoals implantaten, chirurgische gereedschappen en hoortoestellen (Emelogu, Marufuzzaman, Thompson, Shamsaei, & Bian, 2016; Giannatsis & Dedoussis, 2009; Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013). De casestudies in dit artikel betreffen ook gepersonaliseerde medische producten; case 1 betreft chirurgische gereedschappen en case 2 betreft orthopedische schoenen.

AM biedt bepaalde voordelen ten opzichte van traditionele technieken. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om vormen te produceren die onmogelijk (of zeer kostbaar) te produceren zijn met traditionele technieken. Bovendien zijn voor het produceren alleen

maar een machine, materiaal en een digitaal ontwerp noodzakelijk. Omdat digitale files en materiaal (relatief) gemakkelijk fysieke grenzen passeren, wordt productie op locatie (in-situ) mogelijk. Dit maakt AM uitermate geschikt voor toepassingen op moeilijk bereikbare plekken zoals poolgebieden, oorlogsgebieden en buitenaardse gebieden. De theorie onderscheidt centrale AM-productie (Mellor, Hao, & Zhang, 2014; Rylands, Böhme, Gorkin, Fan, & Birtchnell, 2016) en gedistribueerde AM-productie (Bogers, Hadar, & Bilberg, 2016; Mohr & Khan, 2015). Casestudie 1, de chirurgische gereedschappen, gaat hierop in: de beslissing om centraal of gedistribueerd AM te produceren.

Een ander voordeel dat AM kan bieden is de mogelijkheid om functies direct te integreren in het product. De literatuur noemt de integratie van koelkanalen (Kothman & Faber, 2016), maar het is ook mogelijk om in een productie-run producten te produceren met daarin al geassembleerde onderdelen. Hierdoor verminderen de assemblageactiviteiten in de keten (Atzeni & Salmi, 2012; Wagner & Walton, 2016). Dit direct integreren van functies in het eindproduct komt aan de orde in casestudie 2, de orthopedische schoenen.

Doelstelling

127

De populaire literatuur beschouwt AM in het algemeen als disruptief voor de SC's en voor businessmodellen (Accenture, 2014; Cohen, Sargeant, & Somers, 2014), maar de academische literatuur is wat voorzichtiger. Zo is AM volgens Holmström, Liotta, en Chaudhuri (2017) momenteel onvoldoende volwassen en kan alleen gebruikt worden ter ondersteuning van de traditionele productie. Daarentegen kan AM volgens Steenhuis en Pretorius (2017) zowel grote als kleine veranderingen aan bestaande businessmodellen veroorzaken terwijl, Fawcett and Waller (2014) potentieel grote veranderingen benoemen als lokale AM-productie centrale massaproductie vervangt. In lijn met deze discussie is de doelstelling van dit onderzoek om uit te vinden wat het potentieel is van AM om de prestaties van SC's significant te verbeteren.

Onderzoeksvragen

De belangrijkste SC-prestatieverbeteringen lijken te zijn: kostenverlaging en levertijdversnelling. Naast 'maatwerk zonder extra kosten' (Holmström et al., 2017; Weller, Kleer, & Piller, 2015), kan AM kosten reduceren voor grondstoffen, gereed product inventaris, alsook kostenreducties in productie en assemblage (Atzeni & Salmi, 2012; Ford & Despeisse, 2016). Van de andere kant kan AM duurder zijn dan traditionele productie voor grote producten en grotere series (Berman, 2012; Thiesse et al., 2015). Verbeteringen van levertijden kunnen ook bereikt worden, maar voornamelijk voor producten met complexe vormen en voor kleine series (Giannatsis &

Dedoussis, 2009; Petrick & Simpson, 2013). De eerste onderzoeksvraag is derhalve: **Wat zijn de effecten van AM op de SC-kosten en SC-levertijdprestaties?**

Hoewel AM veel voordelen biedt ten opzichte van traditionele (subtractieve) productie, dienen nog steeds veel materiaal-, verwerkings-, regelgevende en mensgerelateerde knelpunten als drempels die de volledige uitrol van AM voorkomen (Durach, Kurpjuweit, & Wagner, 2017; Dwivedi, Srivastava, & Srivastava, 2017). Dit leidt tot de tweede onderzoeksvraag: **Welke knelpunten moeten worden geëlimineerd voordat AM de SC-prestaties radicaal kan verbeteren?**

In het empirische deel van het proefschrift zijn twee casestudies uitgevoerd naar gepersonaliseerde medische producten SC's. Deze casestudies worden nu besproken.

Casestudie 1

Centrale versus gedistribueerde AM-productie van chirurgische gereedschappen

Deze casus onderzoekt het effect op kosten en doorlooptijd bij een verandering van gecentraliseerde AM-productie naar gedistribueerde AM-productie van chirurgische gereedschappen. Deze gereedschappen worden gebruikt als zaag- of boormal tijdens operaties. Daarbij worden ze gebruikt om operaties vooraf aan de daadwerkelijke te plannen en zo de operatie efficiënter en effectiever te laten verlopen, zie Figuur 1. AM wordt al enige jaren gebruikt om deze mallen te produceren. Momenteel worden de AM-geproduceerde (gepersonaliseerde) chirurgische gereedschappen geleverd door een AM-dienstverlener aan de *Universitair Medisch Centra* (UMC's). De UMC's willen het ervaringsleren verbeteren met een snellere feedbackloop en willen daarom het digitale ontwerp sneller omzetten in een fysiek (AM-geproduceerd) product. Omdat de doorlooptijd van de huidige uitbestede (gecentraliseerde) AM-productie te lang is, verwachten de UMC's (snellere) inhouse (gedistribueerde) AM-productie.

128



Voorbeeld van een chirurgisch gereedschap

Methode casestudie 1

Casestudieonderzoek (Yin, 2014) is gebruikt om de huidige situatie in kaart te brengen en te analyseren, terwijl er scenario-analyse (Varum & Melo, 2010) is gebruikt om toekomstige scenario's in kaart te brengen en te analyseren (Cornelius, van de Putte, & Romani, 2005). Zowel de huidige situatie als toekomstige scenario's zijn geëvalueerd op hun respectievelijke kosten en doorlooptijdprestaties.

Resultaten casestudie 1

De resultaten laten zien dat gedistribueerde scenario's, met behulp van de momenteel beschikbare AM-technologie, de doorlooptijd verkorten van 54 naar 27 uur als gevolg van de eliminatie van transport. De kosten worden echter drie keer zo hoog. Daarbij voldoet de doorlooptijdverbetering nog steeds niet aan de *eisen* en moet deze verder worden vermindert. Dit kan mogelijk worden als er een oplossing wordt gevonden om de koeltijd van het product te verkorten. De koeltijd is nodig om productvervorming te voorkomen. De hoge SC-kosten worden veroorzaakt door dure machines en noodzakelijke installatieaanpassingen om stofverspreiding op elk van de gedistribueerde locaties te voorkomen.

Casestudie 2

Implementatie van AM in traditionele productie van orthopedische schoenen

De context waarin het casestudie-bedrijf werkt is uitdagend. Door de snel stijgende gezondheidszorgkosten in Nederland zien ziektekostenverzekeraars zich genoodzaakt jaarlijks de vergoeding voor behandelingen te reduceren. Tot nu toe heeft de schoenfabrikant dit inkomensverlies kunnen compenseren door lean-technieken toe te passen. Bijvoorbeeld door het toepassen van processtandaardisatie en (gedeeltelijke) outsourcing. Kostenbesparingen door deze incrementele procesverbeteringen komen echter tot een einde en AM wordt beschouwd als een veelbelovende oplossing.

De verschillende SC-stappen zijn gevisualiseerd in figuur 2. Bij deze casestudie vervangt AM stukken van de traditionele orthopedische schoenen SC. Zo worden in verschillende scenario's de leesten, de voetbedden, en de pas-, test- en complete schoen AM geproduceerd. In de literatuur zijn geen voorbeelden van AM-geproduceerde orthopedische schoenen te vinden, terwijl voorbeelden van complete AM-geproduceerde schoenen in de mode-industrie wel gevonden worden. De kwaliteit van de schoenen wordt echter beschouwd als slecht (Kim, Seong, Her, & Chun, 2019; Vanderploeg, Lee, & Mamp, 2017). Andere toepassingen van AM in de modeschoenen zijn de productie van mallen (Chung et al., 2003), leesten (Amza, Zapciu, & Popescu, 2019) en gepersonaliseerde schoenen (Meier, Tan, Lim, & Chung, 2019). Hoewel AM-productie van complete orthopedische schoenen (nog) niet mogelijk is, bestaan er voorbeelden van toepassingen voor orthopedische schoenelementen, bijvoorbeeld voor de productie van inlegzolen (Salles & Gyi, 2013a, 2013b) of orthesen (Jordan, 2019).



Orthopedische schoenen ketenstappen

Methodologie casestudie 2

Net als in casestudie 1 wordt in dit onderzoek casestudieonderzoek (Yin, 2014) en scenario-analyse (Varum & Melo, 2010) gebruikt om de effecten van de introductie van AM te analyseren (Cornelius et al., 2005). De huidige (traditionele productie)processen zijn in kaart gebracht en kosten, volume en doorlooptijdgegevens zijn verzameld. Daarna zijn toekomstscenario's gesimuleerd, waarbij AM de traditionele productie vervangt voor gereedschappen, schoencomponenten en uiteindelijk voor complete schoenen. De huidige situatie en toekomstige scenario's zijn geëvalueerd op hun respectieve SC-kosten en SC-doorlooptijdprestaties.

130

Resultaten casestudie 2

De bevindingen tonen aan dat met de huidige stand van de techniek, AM-productie van complete orthopedische schoenen technisch nog niet haalbaar is. Momenteel is alleen AM-productie van gereedschappen (bijvoorbeeld leesten en passchoenen) en componenten (bijvoorbeeld voetbedden en testschoenen) mogelijk. Het vervangen van traditionele productie van gereedschappen en componenten door AM-productie leidt echter tot hogere SC-kosten en verslechtert ook nog eens de doorlooptijd van SC. De bevindingen tonen ook aan dat zodra AM van complete orthopedische schoenen mogelijk wordt, naar verwachting over 5 tot 10 jaar, AM zeer waarschijnlijk kostenconcurrerend wordt met traditionele productie. Bovendien vermindert dan de SC-doorlooptijd met circa 90 procent als gevolg van de eliminatie van 70 procent van de SC-stappen. Ook kan het grondstoffengebruik verminderen en de ecologische voetafdruk verbeteren. Met de introductie van AM voor complete orthopedische schoenen worden de bestaande relaties binnen de huidige SC-stakeholders disruptief verstoord. Zo zijn er bijvoorbeeld minder en andere soorten leveranciers nodig en veranderen de taken van de mensen, de benodigde faciliteiten, machines en gereedschappen volledig. Er zijn echter wel knelpunten die vooraf opgelost moeten worden. Allereerst moet AM-productie van volledige orthopedische schoenen technisch mogelijk worden. Ten tweede moeten de AM-productieprijzen dalen tot onder de € 630,- per paar (de huidige waarde), en ten derde moet het traditionele schoenmakersvakmanschap worden overgebracht naar een 'perfect', dus betrouwbaar, digitaal ontwerp.

Conclusie

De belangrijkste voordelen van AM in vergelijking met traditionele productie zijn de mogelijkheden om complexe vormen te vervaardigen, waaronder de mogelijkheid om functies rechtstreeks in het product te integreren en om lichtgewicht producten te produceren. AM wordt momenteel beschouwd als 'volwassen' voor prototyping- en toolingtoepassingen, maar 'onvolwassen' voor de productie van eindproducten; hoewel er (voor eindproducten) al veel verschillende toepassingen bestaan. Het gaat hierbij vooral om kleine en geometrisch complexe producten waar lage vraag voor bestaat, zoals (industriële) reserveonderdelen en gepersonaliseerde medische producten. AM maakt gebruik van digitale ontwerpen die gemakkelijk fysieke grenzen omzeilen. Het vereist geen product specifieke machines en gereedschappen en kan daarom in-situ productie mogelijk maken. Dit kan leiden tot kortere en eenvoudiger SC's. Het implementeren van AM kan de benodigde SC-partners, IT-systemen, faciliteiten, apparatuur en mensen die in de SC werken veranderen. Dit leidt tot beantwoording van de twee onderzoeksvragen.

Wat zijn de effecten van AM op de SC-kosten en SC-levertijdprestaties?

Volgens de theorie heeft AM vooral invloed op de SC-kosten, de doorlooptijd, de activa en op duurzaamheid. Naast 'maatwerk zonder extra kosten' lijkt AM de kosten te verlagen, waaronder de verlaging van de kosten van grondstoffen en eindproducten, evenals verlagingen van productie-, assemblage- en transportkosten. AM kan echter duurder zijn dan traditionele productie voor grotere series en grotere producten. Levertijd verbeteringen kunnen ook worden bereikt, maar vooral voor producten met complexe geometrieën en voor kleine series. Het twee casestudies ondersteunen deze bevindingen slechts gedeeltelijk: hoewel de doorlooptijd aanzienlijk kan verbeteren, zijn de kosten hoger of in het beste geval vergelijkbaar. Om specifiek te zijn, bij de overstap van centraal naar gedistribueerd AM verbetert de SC-doorlooptijd aanzienlijk, maar de kosten nemen aanzienlijk toe omdat investeringen in activa (machines en faciliteiten) op elk van de gedistribueerde locaties vereist zijn. Aan de andere kant, wanneer AM van complete eindproducten de traditionele productie van componenten vervangt, verbetert de doorlooptijd ook aanzienlijk, maar tegen concurrerende SC-kosten, terwijl de vereisten voor gebouwen, machines en gereedschappen aanzienlijk verminderen. Dit is echter alleen het geval wanneer eindproducten volledig AM geproduceerd kunnen worden; In het geval van AM-productie van gereedschappen en componenten verslechteren de SC-kosten en doorlooptijdprestaties zelfs.

Welke knelpunten moeten worden geëlimineerd voordat AM de SC prestaties radicaal kan verbeteren?

Volgens de *literatuur* moeten de volgende knelpunten worden geëlimineerd voordat AM

kwaliteits-, snelheids- en kostenconcurrerend kan worden met traditionele productie en uiteindelijk de SC-prestaties radicaal kan verbeteren:

- de productkwaliteit moet stabiel en herhaalbaar zijn;
- product- en procescertificeringsproblemen moeten worden opgelost;
- er moet voldoende kennis beschikbaar zijn over het ontwerpen voor AM;
- de AM productietechnologie moet verbeteren (dit omvat dat machines sneller, goedkoper en meer geautomatiseerd te worden en dat nabewerkingsproblemen moeten worden opgelost).

De empirische bevindingen ondersteunen deze theoretische bevindingen. De overstap van centrale naar gedistribueerde AM wordt tegengehouden door hoge AM-machinekosten, nabewerkingsproblemen (stofverspreiding) en lage productiesnelheid (gerelateerd aan productkoeling). Het oplossen van deze knelpunten maakt gedistribueerde AM-productie mogelijk en leidt tot beter ervaringsgericht leren door snellere feedback, wat uiteindelijk leidt tot een betere kwaliteit van de patiëntbehandeling. De overstap van traditionele productie naar AM wordt voorkomen door knelpunten met betrekking tot productkwaliteit die stabiel en herhaalbaar moeten zijn, omdat momenteel de kwaliteit van door AM geproduceerde orthopedische schoenen onvoldoende is. Bovendien zijn de AM-productiekosten momenteel te hoog. Tot slot is voldoende kennis over ontwerpen voor AM een knelpunt, omdat traditioneel vakmanschap geïntegreerd moet worden in het digitale ontwerp.

132

Als deze knelpunten zijn opgelost, zullen de bestaande SC-structuren radicaal (disruptief) veranderen. Er is geen bewijs gevonden dat product- en procescertificeringsproblemen knelpunten zijn.

De overkoepelende conclusie is dat het implementeren van AM op dit moment op zijn best incrementele SC-prestatieverbetering kan leveren, sterker nog: de casestudies tonen aan dat SC-prestaties zelfs kunnen verslechteren. Er zijn verschillende knelpunten die momenteel de effectieve uitrol van AM verhinderen. De AM-technologie ontwikkelt zich echter snel en deze knelpunten worden opgelost. Op dat moment kan gedistribueerde (in-situ) AM kosteneffectief worden, net als de omschakeling van traditionele productie naar AM. Wanneer dit gebeurt (niet 'als' dit gebeurt), worden bestaande SC-relaties verstoord en overleven alleen de bedrijven die voorbereid zijn op deze verandering. Bovendien laat de orthopedische-schoenenencasus zien dat AM op zichzelf niet de heilige graal is en dat slimme combinaties van digitale technieken nodig zijn. Een concept dat Mandolla, Petruzzelli, Percoco, en Urbinati (2019) 'digital twin' noemen. Een belangrijke les van de orthopedische-schoenenencasus is dat het hebben van een 'perfect' digitaal ontwerp de sleutel is. Dit gemakkelijker klinkt dan het in werkelijkheid is. Traditioneel vakmanschap moet namelijk

worden gedigitaliseerd, wat weer andere digitale technieken vereist, zoals data-analyse en big data. Daarom moeten bedrijfsmanagers ruim voordat AM volwassen geworden is, investeren in digitalisering om toekomstbestendig te zijn, bijvoorbeeld door een perfect digitaal ontwerp klaar te hebben op het moment dat AM volwassen wordt.

Tot slot

Zowel vanuit theoretisch als empirisch perspectief biedt AM grote kansen om aanzienlijk verbeterde SC's te ontwerpen die korter en eenvoudiger zijn. Hoewel de doorlooptijd aanzienlijk verbetert, wordt in-situ-productie tegengehouden door hoge AM-productiekosten en technologische AM-problemen. Bovendien kan het toepassen van AM om elementen van de traditionele SC te vervangen de SC-prestaties verslechteren. Daarom moet het vormvrijheidsvoordeel van AM - met inbegrip van de mogelijkheid om functies in het eindproduct te integreren - ten volle worden benut. Een volledig herontwerp van de bestaande SC is derhalve vereist. Een opnieuw ontworpen SC, waarbij AM op de juiste wijze wordt toegepast, kan de SC-prestaties aanzienlijk verbeteren en bestaande SC-structuren radicaal veranderen (SC-disruptie). Toch moet eerst de AM-technologie volwassen worden, moeten de AM-kosten dalen en moet traditioneel vakmanschap in het digitale ontwerp geïntegreerd worden.

Literatuurlijst

- Accenture. (2014). 3D printing's disruptive potential [white paper]. Retrieved from <http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture-Disruptive-Potential-3D-Printing.pdf>
- Amza, C., Zapciu, A., & Popescu, D. (2019). *3D-Printed shoe last for bespoke shoe manufacturing*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9), 1147-1155. doi:10.1007/s00170-011-3878-1
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155-162. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bogers, M., Hadar, R., & Billberg, A. (2016). Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 225-239. doi:10.1016/j.techfore.2015.07.024
- Chung, S., Im, Y., Jeong, H., Jeong, D., Cho, K., Lee, S., . . . Choi, H. (2003). Rapid fabrication of aluminum shoe mold using vacuum sealed casting process. *Journal of materials processing technology*, 142(2), 326-333.
- Cohen, D., Sargeant, M., & Somers, K. (2014). McKinsey Quarterly: 3-D printing takes shape [white paper]. Retrieved from http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/3-d_printing_takes_shape
- Cornelius, P., van de Putte, A., & Romani, M. (2005). Three Decades of Scenario Planning in Shell. *California Management Review*, 48(1), 92-109. doi:10.2307/41166329
- Durach, C. F., Kurpjuweit, S., & Wagner, S. M. (2017). The impact of additive manufacturing on supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(10), 954-971. doi:10.1108/IJPDLM-11-2016-0332
- Dwivedi, G., Srivastava, S. K., & Srivastava, R. K. (2017). Analysis of barriers to implement additive manufacturing technology in the Indian automotive sector. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 47(10), 972-991. doi:10.1108/IJPDLM-07-2017-0222
- Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S. M., Shamsaei, N., & Bian, L. (2016). Additive manufacturing of biomedical implants: A feasibility assessment via supply-chain cost analysis. *Additive Manufacturing*, 11, 97-113. doi:10.1016/j.addma.2016.04.006
- Fawcett, S. E., & Waller, M. A. (2014). Supply Chain Game Changers—Mega, Nano, and Virtual Trends—And Forces That Impede Supply Chain Design (i.e., Building a Winning Team). *Journal of Business Logistics*, 35(3), 157-164. doi:10.1111/jbl.12058
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.150
- Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1), 116-127. doi:10.1007/s00170-007-1308-1

- Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S. H., & Partanen, J. (2016). The direct digital manufacturing (r)evolution: definition of a research agenda. *Operations Management Research*, 9(1), 1-10. doi:10.1007/s12063-016-0106-z
- Holmström, J., Liotta, G., & Chaudhuri, A. (2017). Sustainability outcomes through direct digital manufacturing-based operational practices: A design theory approach. *Journal of Cleaner Production*, 167, 951-961. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.092
- Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(2), 420-437. doi:10.1016/j.jom.2006.04.001
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), 1191-1203. doi:10.1007/s00170-012-4558-5
- ISO/ASTM. (2015). ISO/ASTM 52900: 2015 (ASTM F2792) Additive manufacturing -- General principles -- Terminology. In.
- Jordan, J. M. (2019). Additive manufacturing ("3D printing") and the future of organizational design: some early notes from the field. *Journal of Organization Design*, 8(1), 5.
- Kim, S., Seong, H., Her, Y., & Chun, J. (2019). A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. *Fashion and Textiles*, 6(1), 1-24. doi:10.1186/s40691-018-0162-0
- Kothman, I., & Faber, N. (2016). How 3D printing technology changes the rules of the game: Insights from the construction sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 932-943. doi:10.1108/JMTM-01-2016-0010
- Mandolla, C., Petruzzelli, A. M., Percoco, G., & Urbinati, A. (2019). Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry. *Computers in Industry*, 109, 134-152. doi:https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.011
- Maresch, D., & Gartner, J. (2018). Make disruptive technological change happen - The case of additive manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*. doi:10.1016/j.techfore.2018.02.009
- Meier, M., Tan, K. H., Lim, M. K., & Chung, L. (2019). Unlocking innovation in the sport industry through additive manufacturing. *Business Process Management Journal*.
- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194-201. doi:10.1016/j.ijpe.2013.07.008
- Mohr, S., & Khan, O. (2015). 3D Printing and Its Disruptive Impacts on Supply Chains of the Future. *Technology Innovation Management Review*, 5(11), 20-25.
- Petrick, I. J., & Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing. *Research Technology Management*, 56(6), 12. doi:DOI: 10.5437/08956308X5606193
- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214-224. doi:https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023

- Rylands, B., Böhme, T., Gorkin, R., Fan, J., & Birtchnell, T. (2016). The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 969-989. doi:10.1108/JMTM-12-2015-0117
- Salles, A. S., & Gyi, D. E. (2013a). Delivering personalised insoles to the high street using additive manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(5), 386-400.
- Salles, A. S., & Gyi, D. E. (2013b). An evaluation of personalised insoles developed using additive manufacturing. *Journal of sports sciences*, 31(4), 442-450.
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution* Random House USA Inc.
- Steenhuis, H.-J., & Pretorius, L. (2017). The additive manufacturing innovation: a range of implications. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(1), 122. doi:10.1108/JMTM-06-2016-0081
- Thiesse, F., Wirth, M., Kemper, H. G., Moisa, M., Morar, D., Lasi, H., . . . Minshall, T. (2015). Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS. *Business & Information Systems Engineering*, 57(2), 139-148. doi:10.1007/s12599-015-0374-4
- Vanderploeg, A., Lee, S.-E., & Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10(2), 170-179. doi:DOI: 10.1080/17543266.2016.1223355
- 136 Varum, C. A., & Melo, C. (2010). Directions in scenario planning literature – A review of the past decades. *Futures*, 42(4), 355-369. doi:10.1016/j.futures.2009.11.021
- Wagner, S. M., & Walton, R. O. (2016). Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry. *Production Planning & Control*, 27(13), 1124-1130. doi:10.1080/09537287.2016.1199824
- Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2014). Click Here to Print a Maker Movement Supply Chain: How Invention and Entrepreneurship Will Disrupt Supply Chain Design. *Journal of Business Logistics*, 35(2), 99-102. doi:10.1111/jbl.12045
- Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, 43-56. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020
- Yin, R. K. (2014). *Case study research: design and methods* (Fifth edition. ed.). Los Angeles: SAGE.

Veroorzaakt 3d-printing disruptie van de supply chain?