

## Potential und Forschungsbedarf additiv gefertigter Druckgeräte

Scherf, S. C.

*Metallverarbeitende additive Fertigungsverfahren, wie die der Prozesskategorie „laserbasiertes Pulverbett-schmelzen“, bieten durch die schichtweise Herstellung von Bauteilen viele Formgebungsfreiheiten. Diese bieten auch für die chemisch-verfahrenstechnische Prozessindustrie eine Vielzahl an Nutzenversprechen. Für das rechtssichere Inverkehrbringen bedarf es gesicherter Methoden und entsprechende technische Normen.*



*Metal-working additive manufacturing (AM) processes, such as those of the process category "Laser-based Powder Bed Fusion" (LB-PBF-M), offer a wide range of design freedom due to the layer-by-layer production of components. It offers a large number of value-added benefits for the chemical process industry. For legally compliant placing on the market, reliable methods and corresponding technical standards are required.*

### Grenzen konventioneller Fertigungsverfahren für die Herstellung von chemisch-verfahrenstechnischen Apparaten

In der chemischen Verfahrenstechnik im Allgemeinen aber auch in der Forschung und Entwicklung, ist die Verwendung von Druckgeräten und druckführenden Reaktoren in allen Druckbereichen erforderlich. Insbesondere im Labor- und Technikumsmaßstab führen steigende Anforderungen an Apparate, Reaktoren und Prozesse zu immer größeren Herausforderungen in der Konstruktion. Fertigungstechnische Restriktionen behindern dabei die funktionsgerechte Ausführung.

Chemische Prozesse werden häufig bei erhöhten Druckbedingungen durchgeführt, um Gleichgewichte in die gewünschte Richtung zu verschieben oder Reaktionsgeschwindigkeiten zu erhöhen und so eine Intensivierung des Prozesses zu erhalten [1]. Um großindustrielle Anlagen zu entwickeln, müssen in der Prozesssynthese bzw. Forschung und Entwicklung diese erhöhten Drücke auch in Versuchsanlagen verwendet werden. Während die Niederdruckerwendungen

beim sog. „Scale-Up“<sup>1</sup> weniger problematisch sind, kommt es in den Mittel- und Hochdruckanwendungen oft zu großen Herausforderungen in der Konstruktion und Fertigung /2, 3/. Die Auswahl von kommerziell erhältlichen Rohformen und Druckbehältern ist groß, kann aber nicht immer den funktionsgerechten Betrieb bewerkstelligen (konfektionierte Größen und Geometrien). Zudem erfordert die Montage von zertifizierten Bauteilen der jeweiligen Druckstufe, insbesondere bei Querschnittsänderungen der Druckbehälter, viele Adapter (siehe Abbildung 1). Die daraus resultierenden vielen Verbindungen führen zu einer hohen Leckageempfindlichkeit der gesamten Apparatur. /2/



Abbildung 1: Produktabscheider mit vielen Adaptern (ICVT<sup>2</sup>)

Exotherme Reaktionen erfordern Reaktoren, die ausreichend gekühlt werden. Üblicherweise werden Reaktorrohre mit Doppelmantel und Feststoffschüttung oder für stark exotherme Reaktionen, Schlitzgeometrien mit aufgebracht Strukturen in Plattenwärmetauscher-Bauweise verwendet. Das Zusammenpressen der Reaktor- und Kühlräume bei der Plattenwärmetauscher-Bauweise erfordert einen sehr hohen technischen Aufwand und kann den Anforderungen der Reaktoren aufgrund von Fertigungsrestriktionen nur eingeschränkt gerecht werden. Insbesondere bei den Reaktorrohren mit Feststoffschüttung kann es aufgrund der geringen radialen Leitfähigkeit der Feststoffschüttung zur Bildung von Hot-Spots (bzw. Cold-Spots) kommen. Dabei steigt (bzw. fällt) die Temperatur im Inneren

---

<sup>1</sup> Scale-Up ist ein klassischer Ansatz der chemischen Reaktionstechnik um im Labormaßstab aufgebaute Prozesse durch Maßstabsvergrößerung auf großindustrielle Anlagen zu übertragen /2/.

<sup>2</sup> Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal.

der Katalysatorschüttung um 100°C oder mehr. Der Hot-Spot stellt sicherheitstechnische Risiken wie z.B. die Wärmeexplosion aber auch eine Verschlechterung der Ausbeute durch die Begünstigung von unerwünschten Reaktionen dar. /2, 4/

## Potentiale des laserbasierten Pulverbettssmelzens

Insbesondere die Additive Fertigung (AM) mit ihren metallverarbeitenden Fertigungsverfahren der Prozesskategorie „laserbasierte Pulverbettssmelzen“ (engl. Laser-based Powder Bed Fusion, kurz LB-PBF-M<sup>3</sup>) bieten durch die schichtweise Herstellung von AM-Bauteilen viele Formgebungsfreiheiten (siehe Abbildung 2).

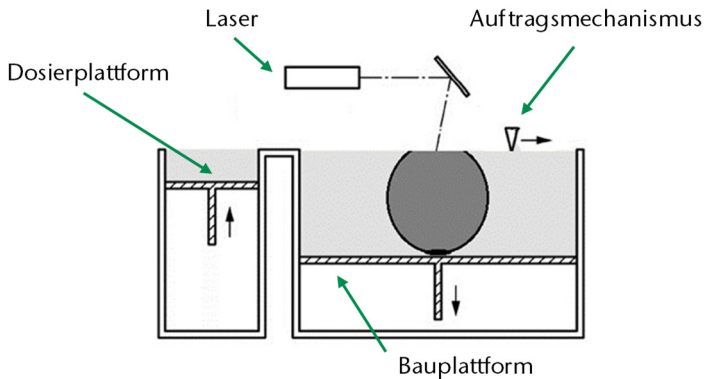


Abbildung 2: Prinzip des LB-PBF-M-Prozess mit Bauteil (Hohlkugel). Folgende Prozessschritte werden sukzessiv wiederholt um AM-Bauteile herzustellen: 1. Anheben der Dosierplattform mit pulverförmigen Ausgangswerkstoff. 2. Auftragen der bauteilspezifischen Schichtdicke mit Auftragsmechanismus. 3. Belichten (Aufschmelzen) der (selektiven) Ausgangswerkstoffschichten mit Laser. Abbildungselemente aus der Norm DIN EN ISO 17296-2:2016-12.

Diese Freiheiten können genutzt werden um z.B. sehr funktionsgerechte chemisch-verfahrenstechnische Apparate herzustellen. Dabei sind der Komplexität kaum Grenzen durch fertigungstechnische Restriktionen (wie z.B. den zuvor beschriebenen) gesetzt. Sogenannte Form-folgt-Funktion-Geometrien können dabei gezielt z.B. an die mechanische Belastung, Strömung und Wärmeübertragung

<sup>3</sup> Die verschiedenen Prozessausgestaltungen werden von den verschiedenen Herstellern als engl. „Direct Metal Laser Sintering“ (DMLS, geschützt durch EOS), Laser Beam Melting (LBM), „Direct Metal Printing“ (DMP, geschützt durch 3D Systems), „Laser Metal Fusion“ (LMF, geschützt durch Trumpf), „LaserCUSING“ (geschützt durch ConceptLaser), oder Phenix-Process (Phenix Systems) bezeichnet.

angepasst werden. Die Funktion (Konstruktion) bestimmt die Fertigung und ermöglicht damit einen (engl.) „design-driven manufacturing process“ (dt. Design- bzw. Konstruktions-gesteuerter Herstellungsprozess). Mehrere Funktionen bzw. Bauteile können durch Integralbauweise bzw. als sog. monolithische Baugruppe zusammengefasst und damit Montage- und Fügevorgänge, sowie die Leckageempfindlichkeit reduziert werden. In diesem Zusammenhang wird auch von Prozessintegration, also der Verkürzung von Produktionsprozessketten gesprochen /5/.

Durch die metallverarbeitende Additive Fertigung ergeben sich neue revolutionäre Konzepte zur großindustriellen Produktion chemisch-verfahrenstechnischer Produkte, wie sie vor einigen Jahren der Mikroverfahrenstechnik vorhergesagt wurden, aber u.a. aufgrund von Fertigungsproblemen ausgeblieben sind /4, 6/. Anders als beim Scale-Up werden beim sog. „Numbering-Up“ viele kleine parallel geschaltete Mikro-Strukturapparate verwendet. Dadurch kann das volle Potential der einzelnen chemischen Reaktionen ausgeschöpft und gleichzeitig das gewünschte Produktionsvolumen hergestellt werden. Diese Prozessintensivierung kann insbesondere bei den zuvor beschriebenen stark exo- oder endothermen aber auch bei mischsensitiven Reaktionen zum Einsatz kommen. Durch diese auf die Funktion(en) fokussierte Auslegung von verfahrenstechnischen Apparaten kann die Produktnutzung sicherer und durch die Effizienzsteigerung kostengünstiger (Reduktion von Betriebs- und Verbrauchskosten) und nachhaltiger (Reduktion von Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen) gestaltet werden. Darüber hinaus kann der Transportaufwand durch viele kleine Produktionsanlagen direkt beim Kunden (engl. Production-on-site) verringert werden. /7, 8, 4, 7, 9/

Weiterhin ermöglicht die Additive Fertigung dem Ingenieur die gezielte Verarbeitung von hochwertigen Materialien. Dadurch und auch weil die Ausgangswerkstoffe formlos als z.B. Pulver verwendet werden, können Ressourcen und damit Kosten in der Produktion bestehend aus Fertigung und Liefernetz<sup>4</sup> (u.a. Lagerhaltung und Transport) gespart und auch die Nachhaltigkeit verbessert werden. Zudem erlaubt die additive Fertigung auf Abruf eine flexible und automatisierte Herstellung individueller Bauteile ab Losgröße 1 vor Ort /10/. Durch die digitale und direkte Fertigung kann zudem die Herstellungs- (engl. Time-to-Product) und Produkteinführungszeit (engl. Time-to-Market) reduziert und gleichzeitig Kosten in deren Herstellung reduziert werden. Während die Kosten für die Herstellung geringer Stückzahlen, aber auch komplexer Bauteile in der konventionellen Fertigung tendenziell sehr hoch sind, können additive Fertigungstechnologien insbesondere bei der Herstellung von Bauteilen kleiner Stückzahlen und hoher Komplexität von Vorteil sein. Dies ist auch auf die werkzeuglose bzw. generische Fertigung, also dem Entfallen produktspezifischer Werkzeuge zurückzuführen. Insbesondere für die chemische Verfahrenstechnik im Labor- und Technikumsmaßstab mit tendenziell kleinen Stückzahlen und individualisierten komplexen Apparaten

---

<sup>4</sup> Auch als Lieferkette bezeichnet.

und Reaktoren kann die Additive Fertigung gegenüber der konventionellen Fertigung Kostenvorteile bieten. Die hohen Herstellungskosten für Großserien von Numbering-Up-Apparaten, können durch Ressourcen- und Kosteneinsparungen in der Produktnutzung kompensiert oder sogar übertroffen werden, wie Beispiele aus der konventionellen Mikroapparatetechnik zur Herstellung von Farbpigmenten zeigen /11/.

Die Vielzahl an Potentialen der Additiven Fertigung macht deutlich, dass die verschiedenen additiven Technologien mehr als nur Fertigungsverfahren sind und das Potential haben, Produktentwicklung (und Konstruktion), Prozessketten, Liefernetz, Fertigung (z.B. Fabrikstrukturen /12/) und vor allem Produkte und dessen Nutzung zu revolutionieren. Die Potentiale versprechen zusammenfassend als „Mittel zum Zweck“ Nutzen wie z.B. höheren Produktnutzen, Kostenreduktion, Nachhaltigkeitsverbesserung und Verkürzung von Time-to-Product und Time-to-Market. /5, 13/

### **Forschungsbedarf von AM-Druckgeräten**

Additive Fertigungsverfahren wie die der Prozesskategorie „laserbasierte Pulverbettsschmelzen“ (LB-PBF-M) zeigen dort Stärken, wo konventionelle Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Bedingt durch die Vielzahl an Formgebungsfreiheiten und guten mechanischen Eigenschaften der Bauteile sind die Fertigungsverfahren prädestiniert für die Herstellung chemisch-verfahrenstechnischer Apparate. Neben den Vorteilen und tiefgreifenden Potentialen, gibt es aber auch eine Vielzahl an Herausforderungen, die im Hinblick auf die Fertigung von inhärent sicherheitskritischen Druckgeräten zu klären sind.

So haben auch die LB-PBF-M-Fertigungsverfahren Prozessgrenzen und Funktionsflächen müssen i.d.R. konventionell mechanisch nachbearbeitet werden. Aufgrund der Schichtbauweise entstehen anisotrope Materialeigenschaften die von der Fertigungsrichtung, aber auch von dem verwendeten AM-System, bestehend aus AM-Maschine, Ausgangswerkstoff und Prozessparameter (wie z.B. Laserleistung und Schichtdicke) abhängig sind. Die Auswahl an qualifizierten Ausgangswerkstoffen (und dessen Prozessparameter) ist zudem eingeschränkt /14–16/. Neben den anisotropen mechanischen Eigenschaften und einer geringen Porosität (<1 %), weisen die AM-Bauteile, u.a. abhängig von der Schichthöhe, den sog. Treppenstufeneffekt auf, welcher i.d.R. eine nicht additive mechanische (Post-Prozess-) Nachbearbeitung erfordert. Fertigungstechnische Herausforderungen wie Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit, Schwindung und thermisch induzierte Eigenspannungen und in Folge dessen die erreichbaren Genauigkeiten, erschweren darüber hinaus die bauraumgebundene Herstellung /16–24/.

Die Bauteilstückkosten von LB-PBF-M-Prozessen setzen sich größtenteils aus Fix- und nur geringen variablen Bauteilkosten zusammen. Die Stückkosten sind daher

mit zunehmender Stückzahl dennoch nahezu konstant. Dies ist auf die geringe Bauraumgröße bzw. Baugeschwindigkeit und hohen Maschinenkosten sowie den niedrigen Automatisierungsgrad der Nachbearbeitung (Post-Prozess) zurückzuführen. Die Nachbearbeitung aber auch die fehlende Integration der AM-Maschinen in bestehende Fertigungsabläufe führt zu hohen Personalkosten. Zudem liegt der Ausgangswerkstoffpreis ein Vielfaches über den Werkstoffpreisen anderer Fertigungsverfahren /25–28/. Bauteilserien großer Stückzahlen sind somit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren oft mit hohen Fertigungskosten verbunden. Andererseits sind die additiven Fertigungsverfahren (LB-PBF-M) auch nur dann wirtschaftlich (in Großserien) einzusetzen, wenn die Funktions- bzw. Bauteilkomplexität ausreichend hoch bzw. nicht konventionell gefertigt werden können (s.o.) und/oder während der Produktnutzung ein finanzieller Mehrwert erzeugt werden kann. /14, 15, 26, 30–32/

Die Potentiale, aber auch die spezifischen fertigungstechnologischen Prozessgrenzen müssen in der Produktentwicklung und Konstruktion berücksichtigt werden. Zur konstruktiven Gestaltung von Bauteilen der Prozesskategorie LB-PBF-M gibt es eine Vielzahl von Gestaltungsrichtlinien, -regeln oder -empfehlungen. Das häufig als „Design for Additive Manufacturing“ (DfAM) /5, 33/ bezeichnete junge Forschungsfeld, besteht allerdings aus hauptsächlich isolierten Methoden und Regeln. In der Industrie mangelt es daher und auch weil die LB-PBF-M-Verfahren vielfach nach wie vor als reines Prototypenverfahren stigmatisiert werden, an Konstruktionswissen, Richtlinien und geeigneten CAE<sup>5</sup>-Werkzeugen /5/.

Aktuelle Regelwerke zur Auslegung von chemisch-verfahrenstechnischen Apparaten oder Druckgeräte berücksichtigen die Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren nicht. Da sich die Bauteileigenschaften und auch die (Fertigungs-) Prozesskette erheblich von den in den restriktiven Regelwerken (wie AD-2000 Regelwerk oder Normenreihen wie die DIN EN 13445 für unbefeuerte Druckbehälter) zur Auslegung von Druckgeräten verwendeten Fertigungsverfahren unterscheiden, ist eine sichere und standardisierte Herstellung aktuell nicht möglich. Zudem berücksichtigen auch Rechtsvorschriften wie die Druckgeräteverordnung (14. ProdSV und Druckgeräterichtlinie, 2014/68/EU, kurz DGRL) die vergleichsweisen neuen additiven Fertigungsverfahren nicht. Hierdurch ist auch das rechtssichere in Verkehr bringen von Mittel- oder Hochdruck-Apparaten (Gefahrenkategorie II bis IV nach DGRL) nicht realisierbar.

Bemühungen von Vereinen wie der DECHEMA e.V.<sup>6</sup>, des DIN e.V. und dem VDMA e.V. aber auch die verschiedener Forschungsinstitute und Industrieunternehmen zeigen, dass das Potential erkannt und entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden, um zukünftig additiv (LB-PBF-M) gefertigte Druckgeräte herzustellen. Im DIN-Normenausschuss „Maschinenbau“ (NAM) wurde im Fachbereich

---

<sup>5</sup> Engl. Computer-aided Engineering (CAE), dt. rechnergestützte Entwicklung.

<sup>6</sup> z.B. im Rahmen des Praxisforum zu additive Fertigungsverfahren im Apparate- und Anlagenbau im September 2015

„Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate“ Ende 2016 der Arbeitskreis „Additive Manufacturing für Druckgeräte“ gebildet. Die Mitglieder Arbeitsgemeinschaft beim VDMA wollen im Rahmen des Geltungsbereichs der Druckgeräterichtlinie (DGRL) additiv gefertigte Bauteile und Druckgeräte auf EU<sup>7</sup>-Ebene normen. Der Arbeitskreis betrachtet zwei additive Fertigungsverfahren und hat entsprechend zwei Arbeitsgruppen für die additiven Prozesskategorien „Laserbasiertes Pulverbettsschmelzen“ (AG „Pulverbettverfahren“) und „Gerichtete Energieeinbringung“ (AG „Auftragsschweißen“) gebildet. Neben führenden Herstellern von Pumpen und Armaturen sowie Anlagenbauer und -betreiber aus der chemischen Industrie, arbeiten hier auch Experten von Überwachungsorganisationen, Vertretern des DIN-Normenausschusses Maschinenbau und Forschungsinstitute auch wie das IMW zusammen. /29/

Um die additiven Fertigungsverfahren der Prozesskategorie laserbasiertes Pulverbettsschmelzen für die Herstellung von AM-Druckgeräten (der DGRL-Gefahrenkategorie II bis IV) zu qualifizieren, müssen die an die Herstellung von Druckgeräten gestellten Anforderungen (z.B. der Normenreihe DIN EN 13445) und die Besonderheiten der LB-PBF-M-Prozesse/-Bauteile zusammengeführt werden (vgl. Abbildung 3). Dies kann in Anlehnung an die Qualifizierung von (konventionellen) Schweißverfahren und den Methoden zur Untersuchung von Gussbauteilen forciert werden.

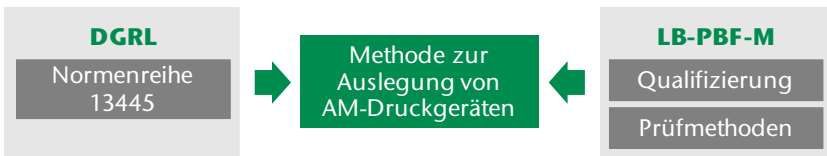


Abbildung 3: Aufbau der Methode zur Auslegung von AM-Druckgeräten mit Hilfe von LB-PBF-M-Prozessen

Für die Herstellung von AM-Druckgeräten wird dazu entsprechend der Anforderungen an die Bauteileigenschaften (Werkstoff) von der DGRL und Normenreihe DIN EN 13445 ein potentiell geeignetes AM-System festgelegt. Anschließend muss das spezifische AM-System in Anlehnung an die Qualifizierung von Schweißverfahren untersucht werden. Dazu werden Testkörper zur Untersuchung der systemspezifischen Prozessgrenzen (und Aufmaße), geometrischen Genauigkeiten und Oberflächenrauheit gefertigt und untersucht. Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte im Sinne einer Werkstoffeinzelpfung (PMA<sup>8</sup>) und Quantifizierung der Einflussfaktoren sind eine Vielzahl von Proben notwendig. Um entsprechende Materialsicherheiten im Sinne der restriktiven Normenreihe zu definieren, ist eine umfassende Qualitätssicherung (u.a. In-Prozessüberwachung) und

<sup>7</sup> Europäische Union (EU)

<sup>8</sup> PMA, engl. Particular Material Appraisal.

Prüfung notwendig. Die dazu notwendigen Prüfverfahren können in Anlehnung an die Prüfmethoden von Gussbauteilen (Norm DIN EN 13445-6) orientiert werden. Entsprechend der Potentiale des Fertigungsverfahren ist eine Auslegung mit Analyseverfahren (Norm DIN EN 13445-3 Anhang C) auf Basis der Restriktionen zu bevorzugen.

Eine entsprechende Methodik zur Auslegung von AM-Druckgeräten soll im Rahmen eines Institutsübergreifendes DECHEMA-AiF-Projekt zwischen ICVT und IMW der TU Clausthal erarbeitet und erprobt werden.

## Zusammenfassung

Die Potentiale der metallverarbeitenden LB-PBF-Verfahren bieten eine Vielzahl an Nutzenversprechen für die chemisch-verfahrenstechnische Prozessindustrie. Damit AM-Druckgeräte hergestellt werden können, müssen eine entsprechende Methodik und technische Normen erarbeitet werden.

## Literaturverzeichnis

- /1/ KURZWEIL, Peter ; SCHEIPERS, Paul: *Chemie : Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. 9., erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag /Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012 (Naturwissenschaftliche Grundlagen)
- /2/ ZLOKARNIK, Marko: *Scale-up*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2012
- /3/ EMIG, Gerhard ; KLEMM, Elias: *Technische Chemie : Einführung in die Chemische Reaktionstechnik ; mit 47 Tabellen*. 5, aktualisierte und erg. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)
- /4/ KRALISCH, Dana ; WEYELL, Peter: *Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau : Potenziale der Miniaturisierung*. Berlin, August 2015 (VDI ZRE Publikationen Kurzanalyse Nr. 14)
- /5/ KUMKE, Martin: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- /6/ WEINER, Monika: *Chemiebaukasten für Profis*. In: *Fraunhofer Magazin* (2004), Nr. 01.2004
- /7/ FACHBEREICHSTAG VERFAHRENSTECHNIK: *Zukunft: Mikroverfahrenstechnik*. URL <http://www.vt-fh.de/index.php?id=6>. – Aktualisierungsdatum: 2017-07-26
- /8/ *Mikro-Verfahrenstechnik :  $\mu$ VT*. Darmstadt, TU Darmstadt, Institut für Thermische Verfahrenstechnik. Vorlesungsskript. 2016. URL [http://www.tvt.tu-darmstadt.de/forschung\\_tvt/mikroverfahrenstechnik/index.de.jsp](http://www.tvt.tu-darmstadt.de/forschung_tvt/mikroverfahrenstechnik/index.de.jsp) – Überprüfungsdatum 2016-04-22



- /9/ WATERKAMP, Daniel Armin: *Zur Prozessintensivierung von Alkylierungsreaktionen in dispersen Systemen durch Mikroreaktionstechnik*. Bremen, Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik. Dissertation. 2012-01-25
- /10/ VDI-Richtlinie 3405. Dezember 2014. *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*
- /11/ KIRSCHNECK, D. ; MARR, R.: *Anlagenkonzepte in der Mikroverfahrenstechnik*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (2006), 1-2, S. 29–38
- /12/ MÖHRLE, Markus: *Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung*. Berlin : Springer Vieweg, 2018 (SpringerLink Bücher)
- /13/ BALDINGER, Matthias ; LEUTENECKER, Bastian ; RIPPEL, Manuel: *Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren : Strategic relevance of additive manufacturing*. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 2, S. 11–14. URL <https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema%3ATEMA20130401328/Strategische-Relevanz-generativer-Fertigungsverfahren/>
- /14/ VDI-GPL FACHAUSSCHUSSES FA 105 „ADDITIVE MANUFACTURING“ UND GREMIUM: *Statusreport : Additive Fertigungsverfahren*. September 2014
- /15/ WOHLERS, Terry T.: *WOHLERS REPORT : 3d printing and additive manufacturing state of the industry*. FORT COLLINS : Wohlers Associates, 2018
- /16/ HUANG, Yong ; LEU, Ming C. ; MAZUMDER, Jyoti ; DONMEZ, Alkan: *Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (2015), Nr. 1, S. 14001
- /17/ GAO, Wei ; ZHANG, Yunbo ; RAMANUJAN, Devarajan ; RAMANI, Karthik ; CHEN, Yong ; WILLIAMS, Christopher B. ; WANG, Charlie C.L. ; SHIN, Yung C. ; ZHANG, Song ; ZAVATTIERI, Pablo D.: *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. In: *Computer-Aided Design* 69 (2015), S. 65–89
- /18/ MARTHA, Alexander Matthias: *Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung*. Universität Duisburg-Essen. Dissertation. 2015-11-23
- /19/ KAHNERT, Markus: *Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation. 2014-01-22
- /20/ GEBHARDT, Andreas (Hrsg.): *Additive Fertigungsverfahren*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016
- /21/ WEGNER, Andreas; WITT, Gerd (Mitarb.): *Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen*. In: GEBHARDT, Andreas (Hrsg.): *Newsletter : RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*. Aachen : RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 2013
- /22/ JAHN, Simon ; KAHLENBERG, Robert ; STRAUBE, Christian ; MÜLLER, Marco: *Empfehlungen zur Steigerung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschmelzen*. In: WITT, Gerd; WEGNER, Andreas; SEHRT, Jan T. (Hrsg.): *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung : Beiträge aus der wissenschaftlichen Tagung der Rapid.Tech 2015*. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2015, 127-
- /23/ INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND BETRIEBSWISSENSCHAFTEN (Hrsg.); ZÄH, Michael (Mitarb.): *Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen von metalli-*

- schen Bauteilen durch thermographische Schichtüberwachung : IGF-Vorhaben 17.911 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS (DVS-Nr. 13007)*
- /24/ TÖPPEL, Thomas ; MÜLLER, Bernhard ; HOEREN, Karlheinz P.J. ; WITT, Gerd: *Eigenstressspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen : Fachbeitrag Eigenstressspannungen und Verzug bei additive Fertigung*. 20.05.2016
- /25/ ABELE, Eberhard ; REINHART, Gunther: *Zukunft der Produktion : Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011
- /26/ ATZENI, Eleonora ; SALMI, Alessandro: *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62 (2012), Nr. 9, S. 1147–1155. URL <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- /27/ KRANZ, J. ; HERZOG, D. ; EMMELMANN, C.: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4*. In: *Journal of Laser Applications* 27 (2015), S1, S14001
- /28/ PETRICK, Irene J. ; SIMPSON, Timothy W.: *3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition*. In: *Research-Technology Management* 56 (2013), Nr. 6, S. 12–16
- /29/ VDMA E.V.: *Additive Manufacturing für Druckgeräte*. URL <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/15507169>. – Aktualisierungsdatum: 2017-01-20
- /30/ *Additive Manufacturing : A game changer for the manufacturing industry?* München, November 2013. URL <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Additive-manufacturing-2013.html>
- /31/ ADAM, Guido: *Konstruktionsregeln für Additive Fertigungsverfahren : Eine Grundlage für die Ausbildung und Lehre*. OptoNet-Workshop. Paderborn, 06.11.2013
- /32/ LINDEMANN, C. ; JAHNKE, U. ; MOI, M. ; KOCH, R.: *Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing*. 2012
- /33/ VAYRE, B. ; VIGNAT, F. ; VILLENEUVE, F.: *Designing for Additive Manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 632–637