

# Heterogene Einsatzfelder der generativen Fertigung

Henrik te Heesen, Michael Wahl, Mats Bremer, Adrian Huwer und Joachim Messemer, Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Institut für Betriebs- und Technologiemanagement (IBT)

Die generative Fertigung, d. h. der Druck von dreidimensionalen Werkstücken aus Kunststoff oder Metall mittels unterschiedlicher Verfahren, ist zentraler Bestandteil der vor einigen Jahren eingeleiteten sogenannten vierten industriellen Revolution oder Industrie 4.0. Die wachsende Vernetzung von Maschinen und Prozessen („Internet der Dinge“, „Big Data“) und die immer stärker werdende Individualisierung der Kundenbedürfnisse führen dazu, dass sich Unternehmen durch den globalen Wettbewerb in einem permanenten Prozess an wandelnde Märkte anpassen müssen. Die generative Fertigung wird hierbei eine wesentliche Rolle spielen, da innovative Produkte mit einem hohen Individualisierungsgrad entsprechend der heterogenen Anforderungen schnell und effizient hergestellt werden können.

Die Herstellung von Prototypen oder Einzelserien durch Fertigungsmaschinen, die unter anderem aus Kunststofffilamenten durch Aufschmelzen oder aus Metallpulver durch das Lasersinterverfahren (SLM), komplexe dreidimensionale Werkstücke produzieren, gewinnt eine immer größere Bedeutung für produzierende Unternehmen und damit einhergehend auch für Forschungseinrichtungen bei der Ausbildung qualifizierter Fachkräfte.

Dabei können mithilfe innovativer Bearbeitungsmethoden Objekte gefertigt werden, die mit konventionellen Verfahren nicht oder nur mit sehr großem Aufwand produziert werden könnten. Des Weiteren kann die generative Fertigung neue Möglichkeiten eröffnen, die Effizienz in Bezug auf den Energie- und Ressourcenverbrauch in

## Heterogeneous Fields of Application in Additive Manufacturing

Additive manufacturing is a central component of the fourth industrial revolution, which was initiated a few years ago. The growing interconnection of machines and processes and the ever-increasing individualization of customer needs mean that manufacturers have to adapt to changing markets in a continual process due to global competition. The production of prototypes or individual series using machines that produce complex three-dimensional workpieces is becoming increasingly important for manufacturing companies and, thus, for research institutions in the training of qualified specialists.

### Keywords:

additive manufacturing, energy efficiency, reverse engineering

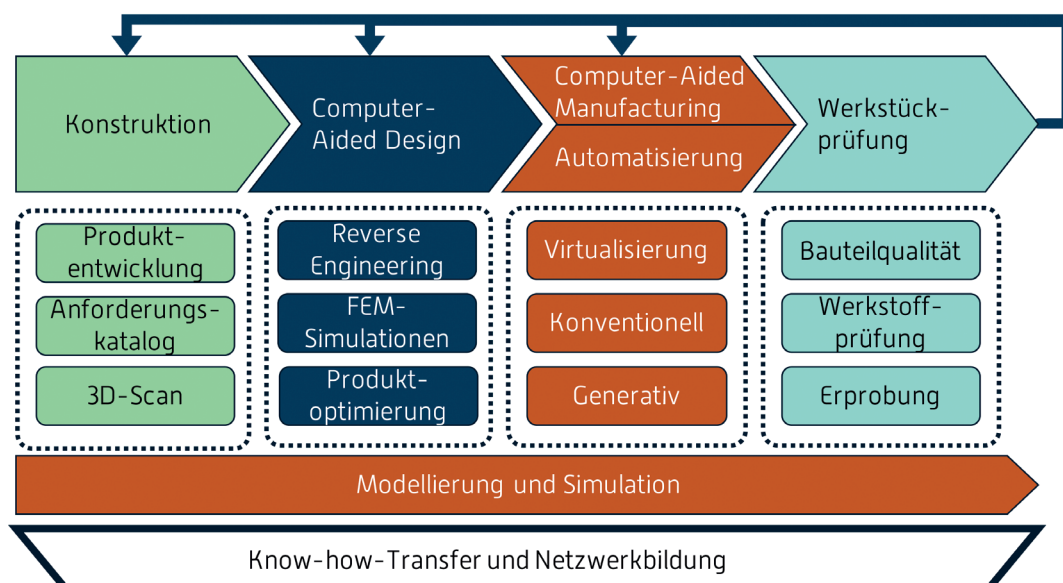


Bild 1: Vierstufige Prozesskette bei der Entwicklung und Fertigung von Werkstücken.

Prof. Dr. Henrik te Heesen leitet das Institut für Betriebs- und Technologiemanagement (IBT) am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier und forscht zu Fragestellungen der Energieeffizienz.

Prof. Dr.-Ing. Michael Wahl vertritt am IBT die Forschungsgebiete 3D-Scan/3D-Druck sowie Reverse Engineering.

M. Eng. Mats Bremer arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IBT und promoviert zu korrelativer Messtechnik im mikroskopischen Bereich.

M. Eng. Adrian Huwer arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IBT im Bereich 3D-Scan/3D-Druck.

M. Sc. Joachim Messemer arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IBT und promoviert zu ressourceneffizientem Rapid Prototyping.

h.teheesen@umwelt-campus.de  
http://ibt.umwelt-campus.de

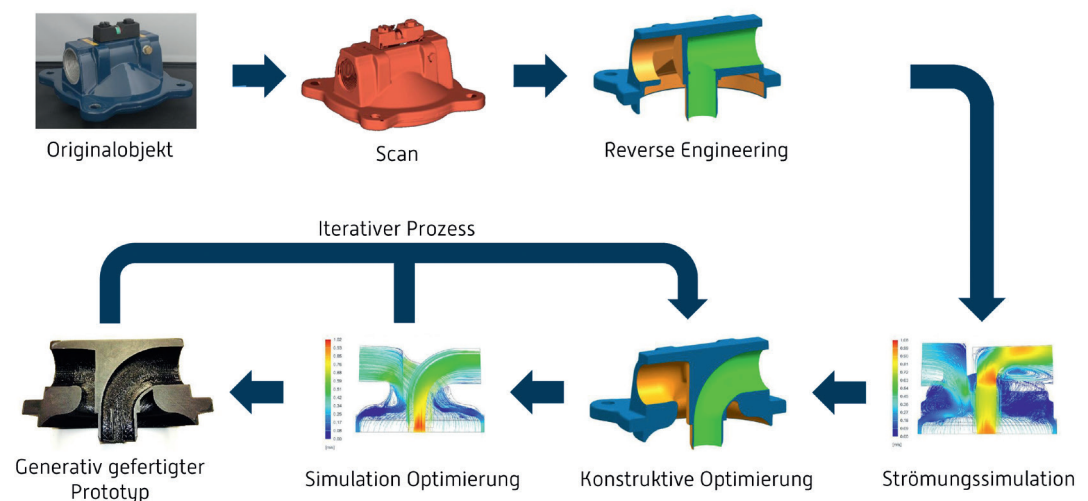
sämtlichen Produktionsteilprozessen deutlich zu verbessern.

Die Nutzung des 3D-Drucks in der Industrie spielt eine stetig wachsende Rolle. Laut einer Studie von Earls und Baya aus dem Jahr 2014 prüften 28,9 % der Unternehmen zwar noch, wie der 3D-Druck in der Fertigung eingesetzt werden könnte, ein Viertel der befragten Unternehmen nutzte den 3D-Druck jedoch bereits zur Herstellung von Prototypen und Bauteilmustern - der eigentliche Fertigungsprozess erfolgte allerdings weiterhin konventionell. Die vollständige generative Fertigung von Werkstücken und Produkten wurde nur von 3,5 % der Unternehmen eingesetzt [1]. Müller und Karevka konnten 2016 feststellen, dass 37 % aller deutschen Unternehmen Erfahrungen mit dem 3D-Druck gesammelt haben, wobei dieser Anteil branchenspezifisch zwischen 49 % in der Automobil- sowie Flugzeugbranche und 16 % bei der Logistik- sowie Transportbranche variierte [2].

Bild 1 stellt die vierstufige Prozesskette bei der Entwicklung und Fertigung von Werkstücken dar. Der hohe Freiheitsgrad beim Design und eine entsprechend höhere Bauteilkomplexität führt in der Konstruktionsphase eines generativ zu fertigenden Bauteils zu einem größeren zeitlichen Aufwand. Der 3D-Scan hat das Potenzial, Geometrien von komplexen Objekten schnell und effizient zu erfassen. In der zweiten Phase erfolgt mithilfe von CAD-Software eine Modellierung und durch Finite-Elemente-Methoden-Simulationen eine Optimierung des Bauteils. Die Optimierung kann zum Beispiel durch die Integration von Wabenstrukturen oder Hohlräumen zur Gewichtsreduktion oder durch die Verwendung poröser Volumenbe-

reiche zur Reduktion der Wärmeleitfähigkeit erfolgen. Beim Fertigungsprozess als dritte Phase werden verschiedene generative Verfahren unterschieden, zu denen unter anderem das Aufschmelzen von (Metall-)Pulver (Selektives Lasersintern) oder die Schmelzschichtung beim Fused Deposition Modeling (FDM) zählen. Die Verfahren hängen von der Art des verwendeten Materials (Metalle, Kunststoffe, Harze oder Keramiken) und der Maschine ab. Die Prozesskette wird schließlich von der Werkstoffprüfung abgeschlossen, um neben der Bauteilqualität das Werkstück hinsichtlich der gewünschten anwendungstechnischen Eigenschaften zu untersuchen.

3D-Scanner stellen die Möglichkeit dar, Objekte durch eine berührungslose optische Vermessung zu digitalisieren. Dabei können 3D-Scanner nach ihrem Funktionsprinzip oder ihrem Einsatzgebiet unterteilt werden. Unter anderem können zum Beispiel die Streifenlichtprojektion oder das Lichtschnittverfahren genannt werden. Streifenlichtscanner bestehen aus einer hochauflösenden Kamera und einer blau-schwarzen Lichtquelle. Dieser Scanner nutzt zur Erstellung der 3D-Punktwolken eine Kombination aus Triangulation, dem sogenannten Gray-Code-Verfahren, und ein Phasenverschiebungsverfahren. Durch einen 3D-Scan wird die gesamte Oberfläche eines Objekts als Punktwolke abgebildet. Die Genauigkeit ist abhängig vom Scannertyp und der Beschaffenheit der zu scannenden Oberfläche. Bei einer reflektierenden Oberfläche weisen 3D-Scanner eine Wiederholgenauigkeit von circa 20 µm auf [3]. Aus der erzeugten Punktwolke kann unter Verwendung einer geeigneten Software ein CAD-Körper erstellt, wenn erforderlich konstruktiv verändert und in verschiedenen



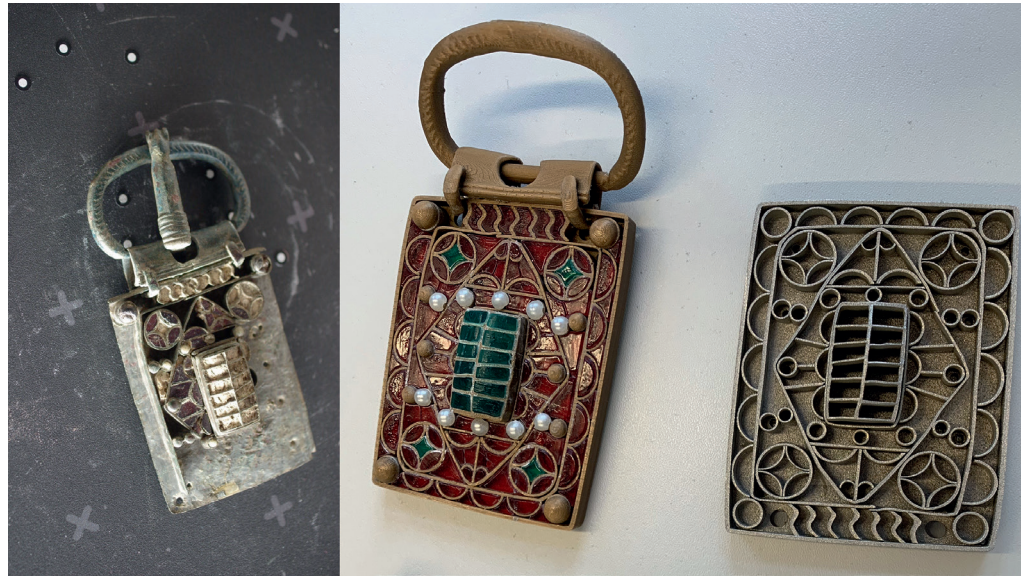
**Bild 2: Prozesskette zur Bauteiloptimierung mit 3D-Scan und generativer Fertigung.**

Formaten ausgegeben werden. Dieser Prozess wird als Reverse Engineering bezeichnet.

Der Begriff 3D-Druck wird für unterschiedliche generative Fertigungsverfahren verwendet. Allen Prozessen ist gleich, dass dreidimensionale Bauteile durch physikalische bzw. chemische Verfahren schichtweise aufgebaut werden. Die generative Fertigung ist durch unterschiedliche Druckverfahren sowie eine breite Palette an einsetzbaren Materialien gekennzeichnet. Am weitesten verbreitet ist der 3D-Druck von Kunststoffen sowie Metallen. Aber auch Harze, Gips oder Keramiken sind additiv verarbeitbar. Die Fertigungsverfahren lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen. In der ersten Gruppe wird das Material, zum Beispiel Kunststoff, aufgeschmolzen und über einen beweglichen Druckkopf eine dünne Schicht des Materials auf einem Druckbett aufgetragen. Hierbei erfolgt eine Relativbewegung zwischen Düse und Druckbett in horizontaler x- und y-Richtung. Nach Fertigstellung der Schicht erfolgt ein Verschieben des Bauteils in vertikaler z-Richtung und die nächste Schicht wird aufgetragen. In der zweiten Gruppe wird das Bauteil schichtweise aus Pulver oder Flüssigkeit erzeugt. Hierbei erfolgt die Schichterzeugung beispielsweise durch Aushärtung mit Licht oder durch Aufschmelzen über einen Laser. Nach Fertigstellung der Schicht wird das Bauteil vertikal bewegt und eine neue Pulver- oder Flüssigkeitsschicht aufgebracht. Bei sämtlichen Verfahren muss der Körper nicht als Vollkörper, sondern kann unter Einsatz unterschiedlicher Füllgrade auch teilgefüllt hergestellt werden.

Anwendungsbeispiele verdeutlichen heterogene Einsatzfelder des 3D-Drucks

Die Anwendung des 3D-Drucks ist breit gefächert und reicht von der Erstellung von Anschauungsobjekten über Prototypen bis hin zur Kleinserienfertigung. In Bild 2 wird auf die möglichen Schritte einer Bauteiloptimierung durch Nutzung der einzelnen Prozessschritte eingegangen. Sofern keine digitalen Daten des Objekts vorliegen, wird unter Verwendung eines 3D-Scanners ein digitales Modell des Objekts als Punktwolke erzeugt. Mit diesen Daten kann im Anschluss ein Reverse-Engineering-Prozess durchgeführt werden. Das daraus resultierende Volumenmodell ist zum



**Bild 3:** Replik einer germanischen Gürtelschnalle aus dem 5./6. Jahrhundert. Links ist das Original, in der Mitte die generativ gefertigte, farbige Replik aus Kunststoff und rechts die generativ gefertigte Replik aus Metall zu erkennen.

Beispiel für Simulationen oder konstruktive Änderungen verwendbar. Hierbei kann der Fokus sowohl auf einem minimalen Materialeinsatz (Topologieoptimierung) als auch auf einer optimalen strömungstechnischen Formgebung liegen. Die durch Simulationen erreichten Verbesserungen können anschließend mit einem additiven Prozess umgesetzt werden. Das gewählte Material und Verfahren bei der Herstellung ist vom Einsatzzweck abhängig. Hierbei gibt es eine große Bandbreite von Anwendungen: Schnittdarstellungen, Anschauungsobjekte, Ersatzteile, Funktionsprototypen oder Kleinserien. Bild 2 zeigt beispielhaft die Prozessschritte vom 3D-Scan bis zum Anschauungsobjekt eines strömungstechnisch optimierten Bauteils. Bei diesem Oberteil eines Filters konnte der Druckverlust um 40 % reduziert werden.

Mit den beschriebenen Arbeitsschritten ist es darüber hinaus möglich, Ersatzteile von Bauteilen, die nicht mehr beschafft werden können, herzustellen. Liegt ein defektes Bauteil vor, kann dieses eingescannt und digital repariert bzw. auch optimiert werden. Gute Anwendungsbeispiele liefern hier zum Beispiel Ersatzteile im Oldtimerbereich. Ebenfalls ist es möglich, Teile zu ersetzen, die vom Hersteller nicht als Einzelteile zu beziehen sind. Die Anwendungsmöglichkeiten im Ersatzteildruck, defekte Geräte mithilfe von generativ gefertigten Bauteilen zu reparieren, werden insbesondere in Maker-Spaces bzw. Repair-Cafés genutzt.

Ein weiteres Anwendungsgebiet von 3D-Scan und 3D-Druck bietet die Möglichkeit, Repliken wertvoller Gegenstände anzufertigen. Dies ist am Beispiel einer antiken gotischen Gürtelschnalle des Römisch-Germanischen Museums



## Literatur

- [1] Earls, A.; Baya, V.: The road ahead for 3-D printers. Price-waterhouseCooper. Technology forecast: The Future of 3-D Printing – The road ahead for 3D printers. Issue 2, p. 2, 2014.
- [2] Müller, A.; Karevska, S.: How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain: EY's Global 3D printing Report 2016. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft GmbH. Deutschland 2016.
- [3] Bremer, M.; Wahl, M.; Kedziora, S.: Einfluss einer zusätzlichen Glasscheibe auf ein optisches 3D-Messsystem. tm - Technisches Messen. DOI: 10.1515/teme-2019-0105. 2019.
- [4] Messemer, J.; Kaufmann, T.; Martin, C.; Neises, M.; Schmidt, A.; te Heesen, H.: Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad. RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie. Vol. 2016. Ausgabe 13. URL: <https://www.rtejournal.de/ausgabe-13-2016/4441>, Abrufdatum 13.05.2020.
- [5] Feldmann, C.; Schulz, C.; Fernströning, S.: Digitale Geschäftsmodell-Innovationen mit 3D-Druck. Erfolgreich entwickeln und umsetzen. DOI: 10.1007/978-3-658-25162-8. Wiesbaden 2019.

Köln in Bild 3 dargestellt. Bei der Gürtelschnalle handelt es sich um ein stark beschädigtes Objekt aus dem 5. bis 6. Jahrhundert. In einem ersten Schritt wurde der Ist-Zustand der Gürtelschnalle mithilfe eines 3D-Scanners aufgezeichnet. Auf Basis der dreidimensionalen Objektdaten wurde der Prozessschritt des Reverse Engineering durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurde auf Basis der Objektdaten ein möglicher Soll-Zustand bzw. unbeschädigter Zustand der Gürtelschnalle rekonstruiert. Die Gürtelschnalle wurde durch Einsatz unterschiedlicher Druckverfahren (FDM-Drucker bzw. Metalldrucker für den Körper, Stereolithographie-Drucker für die Replik der Ziersteinen) als Anschauungsobjekt reproduziert.

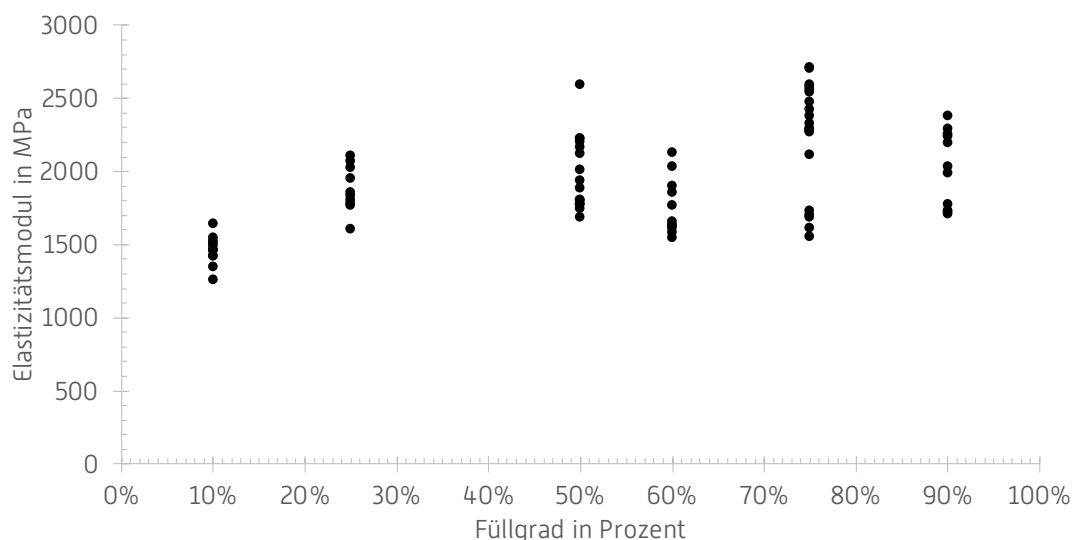
## Großes Potenzial in Bezug auf die Energie- und Ressourceneffizienz

Ein weiteres Potenzialfeld der additiven Fertigung ist die Möglichkeit, die Ressourcen- und Energieeffizienz im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren verbessern zu können. Durch das Lasersinterverfahren wird bei der Fertigung nur Material verwendet, welches tatsächlich für die Herstellung des Bauteils benötigt wird, sodass Materialverluste im Vergleich zu konventionellen, subtraktiven Fertigungsverfahren minimiert werden können. Darüber hinaus kann durch entsprechende Konstruktion und Topologieoptimierung der Bauteile Material eingespart werden, da die Formgebung beim 3D-Druck frei von konventionellen Fertigungsvorgaben ist.

Bei der Untersuchung von 143 generativ gefertigten, horizontal positionierten Normbau-

teilen nach DIN EN ISO 527-2 aus Polylactide (PLA) wurde der Füllgrad des Bauteils bei einer Schichtdicke von 0,1 mm variiert und jeweils die maximale Zuglast, die Bruchlast und die Bruchlänge gemessen [4]. Die maximale Zugkraft hängt von der Schichtdicke und dem Füllgrad ab, wobei der Füllgrad den größten Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Das Material hat nach Herstellerangaben eine Dichte von 1,26 g/cm<sup>3</sup> und einen Zug-Elastizitätsmodul von 3350 Megapascal (MPa). In Bild 4 ist der Elastizitätsmodul der Proben in Bezug auf den Druckfüllgrad dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg des Elastizitätsmoduls von kleinem Füllgrad bei 10 bis 50 %. Ab einem Füllgrad von 50 % zeigt sich eine Stabilisierung des Elastizitätsmoduls bei rund 2000 MPa. Bei größerem Füllgrad ist eine große Streuung der Elastizitätsmoduln zu beobachten, was sich unter anderem auf unterschiedliche klimatische Lagerungsbedingungen der Bauteile zurückführen lässt. Damit zeigt sich, dass sich ein stabiler Elastizitätsmodulwert bereits bei einer fünfzig prozentigen Füllung des Bauteils und damit einer Reduktion des Materialeinsatzes um die Hälfte erreichen lässt.

Bei der Untersuchung des Energieverbrauchs eines FDM-Druckers während des Druckprozesses der Normbauteile auf PLA-Basis wurde zwischen thermischen Komponenten (Erwärmung des Druckbetts, des Druckkopfs etc.) und elektrischen Komponenten (Antriebe, Kühlung etc.) unterschieden. Anschließend erfolgte die Zuordnung des Energieverbrauchs zu den einzelnen Verbrauchssegmenten des Druckers. Dabei zeigte sich, dass der Verbrauch der thermischen (53 %) und der nichtthermi-



**Bild 4: Elastizitätsmodul der Zugproben in Abhängigkeit des Füllgrads. Der Elastizitätsmodul wächst bei steigendem Füllgrad des gedruckten Bauteils an und stabilisiert sich bei einem Füllgrad von etwa 50 % [4].**

schen Komponenten (47 %) annähernd gleich groß ist. Auf Basis eines entwickelten Energieverbrauchsmodells wurden verschiedene Ansätze zur energetischen Optimierung des Druckprozesses identifiziert. Das größte Potenzial besteht hierbei in der Erhöhung der Druckgeschwindigkeit und der damit verbundenen Verringerung der Druckdauer. Es konnte gezeigt werden, dass eine Steigerung der Druckgeschwindigkeit zu einer linearen Reduzierung des Energieverbrauchs bei gleichbleibender Werkstückqualität führt. Zudem wurde festgestellt, dass der größte Teil der benötigten Energie zur Beheizung des Druckbetts verwendet wird. Vor allem bei der Erstellung wird dabei ein großer Teil der durch die Druckbetheizung erzeugten Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Daraus lässt sich ableiten, dass in Abhängigkeit der Art des Werkstücks und der eingesetzten Fertigungsmaschine ein großes Einsparpotenzial hinsichtlich des Materials und der Ressourcen bei gleichbleibender Bauteilqualität besteht, wenn nicht benötigte Einheiten der Fertigungsmaschine deaktiviert werden.

Sämtliche Industriebranchen werden von der generativen Fertigung profitieren

Bei der generativen Fertigung zeigt sich die heterogene Anwendungsfelder unter Berücksichtigung der vollständigen Prozesskette von der Konstruktion/Entwicklung eines Werkstücks über den 3D-Druck bis hin zur Qualitätssicherung. Der Nutzen des 3D-Drucks lässt sich sowohl in der Produktentwicklung als auch in der operativen Fertigung identifizieren. Neben

einem hohen Freiheitsgrad hinsichtlich des Designs sowie einer Flexibilisierung der Eigenschaften von Bauteilen ergeben sich Vorteile unter anderem durch eine Dezentralisierung der Produktion und durch eine Verringerung von Kosten bei Wartung, Schulung und Administration. Zwar liegt der Fokus beim Einsatz der generativen Fertigung in der Industrie derzeit noch häufig auf Entwicklungs- sowie reinen Fertigungsprozessen, dennoch beginnt in steigendem Maße die Integration des 3D-Drucks in Geschäftsmodellen von Unternehmen.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass die generative Fertigung ein immenses Potenzial insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) bietet, da der 3D-Druck die Herstellung innovativer Produkte mit einem hohen Individualisierungsgrad ermöglicht, um spezifische Kundenbedürfnisse bedienen zu können [5]. Eine Herstellung von Nischenprodukten sowie die On-Demand-Fertigung ermöglicht KMU, in unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen aktiv zu werden. Die Endkunden erhalten durch eine komplementäre Kooperation in der generativen Fertigung mit Unternehmen einen Mehrwert. Voraussetzung für eine erfolgreiche Integration des 3D-Drucks in die Wertschöpfung des Unternehmens ist jedoch ein hohes Maß an Flexibilität bei dynamischen Geschäftsmodellen unter Einbeziehung sich schnell wandelnder Marktbedingungen.

Schlüsselwörter:

Generative Fertigung, Energieeffizienz, Reverse Engineering



#### Intensiv-Seminar

08. – 09. Oktober 2020 in Köln | 23. – 24. Februar 2021 in Berlin

## Planning & Scheduling in der Instandhaltung

Moderne Methoden und Ansätze für Arbeitsvorbereitung, Termin- und Ressourcenplanung

- » Arbeitsvorbereitung, Termin- und Ressourcenplanung als strategische Erfolgsfaktoren in der Instandhaltung
- » Planung von Arbeitsinhalten und Erstellung von Arbeitsplänen
- » Schnittstellen zu anderen Funktionen und Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen

Bitte geben Sie bei Ihrer Anmeldung unter [www.tacook.com/planning&scheduling](http://www.tacook.com/planning&scheduling) folgenden Code ein und Sie erhalten 10% Rabatt: IMPS2020