

# Additive Fertigungsmethoden – Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung

Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum  
Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0  
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

# Impressum

## Herausgeber

Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0  
iit-Institut für Innovation und Technik in der  
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH  
Alfons Botthof  
Steinplatz 1 | 10623 Berlin  
alfons.botthof@vdivde-it.de

[www.autonomik40.de](http://www.autonomik40.de)

## Autoren

Stephan Richter  
Dr. Steffen Wischmann  
iit-Berlin

## Gestaltung

LoeschHundLiepold  
Kommunikation GmbH  
Hauptstraße 28 | 10827 Berlin  
autonomik@lhk.de

## Stand

April 2016

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhalt

Management Summary .....	5
1 Einleitung .....	9
2 Marktsituation .....	11
3 Technischer Entwicklungsstand und Anwendungsbereiche der additiven Fertigung .....	13
4 Forschung, Entwicklung und Fördersituation .....	19
5 Forschungsbedarfe und Perspektiven .....	21
5.1 Intuitive Modellierungswerkzeuge .....	21
5.2 Smart Production Services und Prozessintegration .....	22
5.3 Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz .....	22
5.4 Innovative Materialien und Werkstoffe .....	23
6 Literatur .....	25
7 Anhang .....	26
7.1 Standards und Normen .....	26
7.2 Übersicht: Nationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte .....	27
7.3 Übersicht: Europäische Forschungs- und Entwicklungsprojekte .....	31

# Abbildungen

<b>Abbildung 1</b> .....	11
Globaler Umsatz durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen im Bereich additive Fertigung	
<b>Abbildung 2</b> .....	11
Globale Verkaufszahlen für industrielle 3D-Drucker und Desktop-3D-Drucker	
<b>Abbildung 3</b> .....	12
Verkaufszahlen für Deutschland für industrielle 3D-Drucker	
<b>Abbildung 4</b> .....	16
Anforderungen an Bauteile und Produkte, die mit Hilfe der additiven Fertigung hergestellt werden sowie mögliche Verfahren und Materialien	
<b>Abbildung 5</b> .....	17
Nutzungsprofile additiver Fertigung in Unternehmen (angepasst nach PWC 2015)	
<b>Abbildung 6</b> .....	18
Branchenspezifische Anwendungsfelder der am häufigsten genutzten Verfahren	
<b>Abbildung 7</b> .....	19
Anzahl der zwischen 2000 und 2012 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen und Patentanmeldungen	
<b>Abbildung 8</b> .....	20
Thematische Einstufung von 35 in Deutschland geförderten oder in der Förderung befindlichen Projekten im Bereich der additiven Fertigung	
<b>Abbildung 9</b> .....	20
Thematische Einstufung der europäischen Förderprojekte im Bereich der additiven Fertigung	

# Management Summary

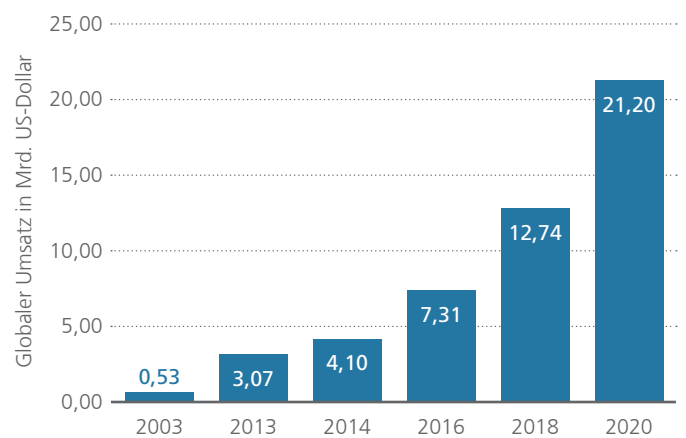
Von den additiven Fertigungsverfahren (AF), oft auch unter dem Synonym 3D-Druck zusammengefasst, wird erwartet, dass sie zukünftig eine wichtige Rolle als Schlüsseltechnologie einnehmen werden, insbesondere im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und einer zunehmend individualisierten Produktion. Im Gegensatz zu klassischen Verarbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Gießen oder Schmieden, erlauben additive Fertigungsverfahren die Herstellung komplexer Geometrien und innerer Strukturen auf Basis einer schichtweisen Konstruktion. Zudem sind additive Verfahren aufgrund der Vielfalt an nutzbaren Materialien wie Keramik, Metall, Kunststoff, Wachs etc. für ein breites Anwendungsfeld hochinteressant.

Während sich die Desktopfertigung durch den Endverbraucher und das Bioprinting noch in einem frühen technologischen Stadium verorten lassen, ist der Reifegrad der additiven Fertigungstechnologien im industriellen Kontext in vielen Anwendungsbereichen bereits weit fortgeschritten. Dafür wurden im Rahmen der Begleitforschung für das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Technologieprogramm „Autonomik für Industrie 4.0“ der technologische Reifegrad der unterschiedlichen Verfahren sowie deren Einsatzgebiete analysiert. Die vorliegende Studie schafft einen zusammenfassenden Überblick über existierende Erhebungen und Analysen zur additiven Fertigung und zeigt wichtige IKT-spezifische Handlungsfelder außerhalb der Kerntechnologieentwicklung auf, um additive Fertigungsverfahren als eine Schlüsseltechnologie der zukünftigen Smart Factories etablieren zu können.

## Marktsituation

Während für additiv gefertigte Produkte aktuell keine verlässlichen Marktabschätzungen vorliegen, lässt sich für AF-Güter eine starke positive Entwicklung erkennen. Zu AF-Gütern gehören: 3D-Drucker, Material, Zubehör und Software sowie AF-bezogene Dienstleistungen, die zur Herstellung von AF-Produkten genutzt werden. Der globale Umsatz dieser Güter hat sich zwischen 2003 und

2014 beinahe verachtfacht, und es wird von einem weiteren exponentiellen Anstieg in den nächsten Jahren ausgegangen. Für deutsche Unternehmen wurde der Anteil am globalen Umsatz für das Jahr 2010 mit 15 bis 20 % beziffert, was einem Umsatz von ca. 260 Mio. US-Dollar entspricht. Abschätzungen zufolge sind ca. 1.000 deutsche Unternehmen im Bereich der AF-Güter tätig, davon ca. 90 % klein- und mittelständische Unternehmen.



Globaler Umsatz durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen im Bereich der additiven Fertigung (eigene Darstellung, Daten aus EFI 2015, Wohlers 2015).

## Die wichtigsten additiven Fertigungstechnologien

In Abhängigkeit von den gewünschten Materialien und Anforderungen an Bauteile und Produkte, stehen dem Anwender unterschiedliche Verfahren der additiven Fertigung zur Verfügung. Dabei lassen sich drei Verfahren identifizieren, die bereits einen hohen technologischen Reifegrad mit breiten Anwendungsmöglichkeiten erreicht haben. Bei den pulverbasierten Prozessen wird eine dünne Schicht Pulver (Metall, Keramik etc.) auf eine Arbeitsfläche aufgetragen und mittels Laser in eine definierte Kontur geschmolzen, die sich nach dem Erstarren verfestigt. Daraufhin wird eine neue Schicht Pulver aufgetragen und der Prozess wiederholt sich (PBF-Verfahren). Im Extrusionsverfahren werden thermoplastische Kunststoffe über eine beheizte Düse verformbar gemacht und geometrisch definiert abgelegt (EB-Verfahren). Beim Photopolymerisationsverfahren werden flüssige Photopolymere i. d. R.

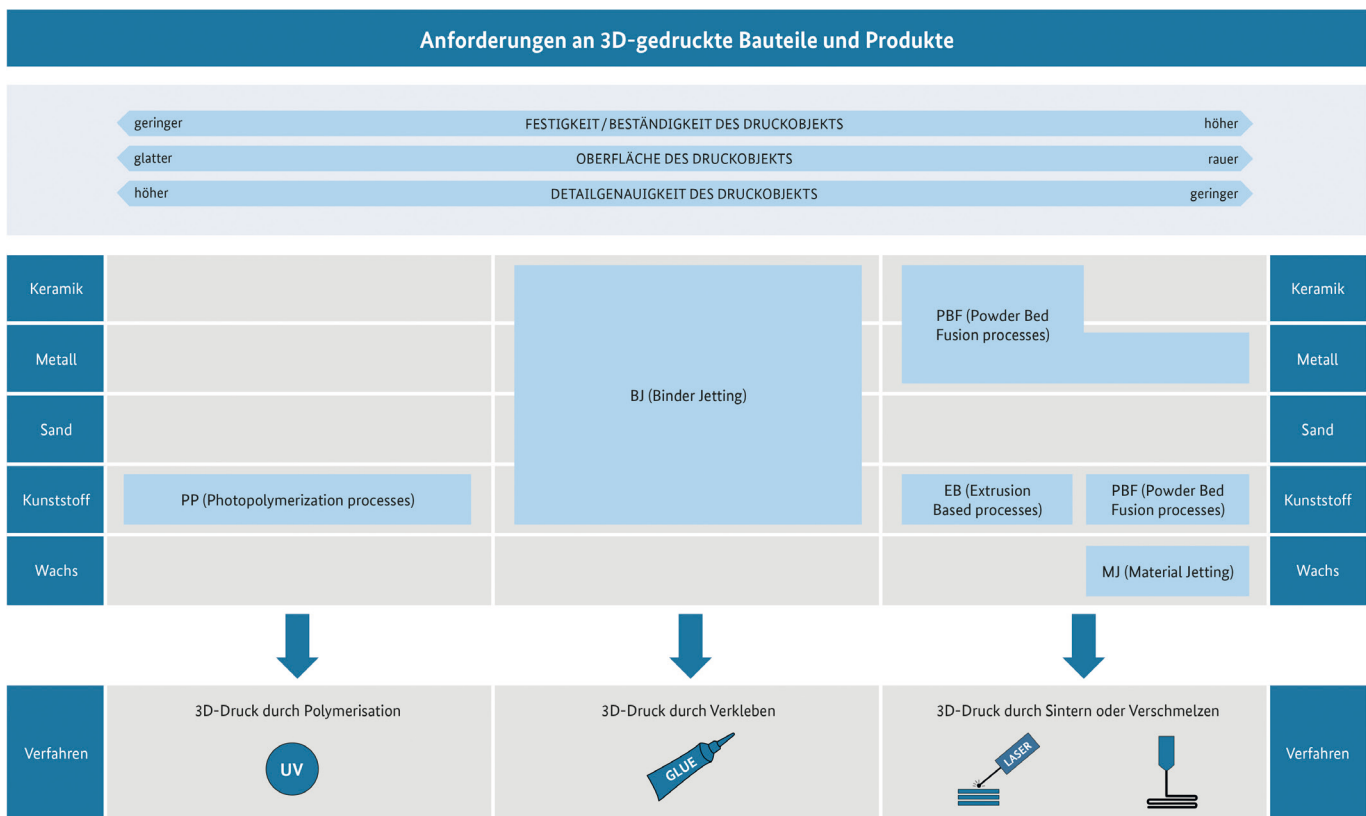
durch UV-Strahlung punkt- oder schichtweise auf einer Bauplattform vernetzt, so dass sich das Polymer verfestigt. Insbesondere im Bereich der metallbasierten PBF-Verfahren sind deutsche Unternehmen weltweit führend.

### Hauptanwendungsfelder

Die zuvor beschriebenen Hauptverfahren werden bereits heute in den unterschiedlichsten Industrien in drei Hauptanwendungsfeldern produktiv genutzt: Beim Rapid Prototyping werden die additiven Verfahren für die schnelle Herstellung von zum Teil funktionsfähigen Prototypen und Musterbauteilen eingesetzt, beim Rapid Tooling für den Werkzeug- und Formenbau und beim Rapid Manufacturing für die flexible, schnelle Fertigung von Bauteilen und Serien.










### Stand der Forschung und Entwicklung

Die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel mit einem Schwerpunkt im Bereich der additiven Fertigung hat sich zwischen 2003 und 2012 verdreifacht. In Deutschland ansässige Wissenschaftler/-innen gehören nach den USA und China zu denen mit den meisten veröffentlichten Publikationen. Die Anzahl der angemeldeten Patentfamilien zeigt eine vergleichbare Entwicklung. Hier belegen die USA und Japan eine deutlich führende Position. Deutschland belegt hinter China die vierte Position. Im Bereich der geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf nationaler sowie europäischer Ebene werden Projekte mit einer Fokussierung auf die Materialentwicklung überdurchschnittlich oft gefördert. Projekte ohne direkten Bezug zur Kerntechnologieentwicklung mit den



Anforderungen an Bauteile und Produkte, die mit Hilfe der additiven Fertigung hergestellt werden sowie mögliche Verfahren und Materialien\* (angepasst nach additively.com 2015). © iit

\* Das MJ-Verfahren kann auch mit Photopolymeren umgesetzt werden. Es werden Druckobjekte mit einer hohen Detailgenauigkeit und glatten Oberflächen erzielt

Branche	Powder Bed Fusion processes (PBF)			Extrusion Based processes (EB)			Photopolymerization processes (PP)		
	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing
Automobilindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	●
Architektur, Möbelindustrie, Design und Kunst	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Elektrotechnik- und Elektronik-industrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Film- und Unterhaltungsindustrie	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Luft- und Raumfahrtindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Medizintechnik, Prothetik, Dental-technik, medizinische Hilfsmittel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Nahrungsmittelindustrie	✗	✗	✗	✓	✗	●	✗	✗	✗
Rüstungsindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Sportgeräteindustrie	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Spielwaren- und Game-Industrie	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Textil- und Bekleidungsindustrie	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Wissenschaft	✓	●	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗

✓ Technologie ist soweit/bereits im produktiven Einsatz      ✗ Technologie ist noch nicht so weit/nicht relevant      ● Technologie ist noch im Entwicklungsstadium

Erläuterungen:



Beim Rapid **Prototyping** werden die Verfahren der AF für die schnelle Herstellung von zum Teil funktionsfähigen Prototypen und Musterbauteilen eingesetzt.



Beim Rapid **Tooling** werden die Verfahren der AF für den Werkzeug- und Formenbau eingesetzt. Im Fokus steht die zeitnahe Herstellung komplexer Werkzeuge für z. B. den Kunststoffspritzguss.



Beim Rapid **Manufacturing** werden die Verfahren der AF für die flexible, schnelle Fertigung von Bauteilen und Serien eingesetzt.

Branchenspezifische Anwendungsfelder der am häufigsten genutzten Verfahren. © iit

Schwerpunkten Modellierungswerkzeuge, Smart Production Services sowie Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sind aktuell weitaus weniger stark vertreten. Hier besteht insbesondere auf nationaler Ebene ein großer Aufholbedarf.

**IKT-spezifische Handlungsbedarfe**

Die additive Fertigung hat ihren Ursprung im Prototypen- und Kleinserienbau. Um eine größtmögliche Flexibilität zu erhalten, wurde auf eine umfangreiche Automatisierung der Prozesse verzichtet, so dass noch heute zahlreiche händische Eingriffe im Prozess nötig sind. Die

Kerntechnologien der additiven Fertigungsverfahren erreichen damit heute bereits einen sehr hohen Reifegrad. Gefragt sind nun insbesondere IKT-gestützte Lösungen für eine verbesserte Nutzung und Integration der additiven Fertigungsverfahren, um ihr volles Potenzial in Zukunft ausschöpfen zu können. In Deutschland werden Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit den hierfür relevanten Schwerpunkten Modellierungswerkzeuge, Smart Production Services sowie Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz weniger stark vorangetrieben als Projekte im Bereich der Materialien und Werkstoffe. Daraus leiten sich folgende Handlungsbedarfe ab:

### Modellierungswerkzeuge

- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen und Nutzerschnittstellen für Konsumenten, die eine möglichst intuitive Eingabe ermöglichen.
- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen und Dateiformaten, die eine Modellierung von Form und Verhalten sowie die Simulation von Bauteileigenschaften gleichermaßen ermöglichen bzw. unterstützen.
- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen zur maschineninterpretierbaren Beschreibung von Objekten (Morphologie, Materialeigenschaften und Porositäten, Bauteilverhalten, Bauteilsimulation etc.).

### Smart Production Services und Prozessintegration

- Vollständige Automatisierung der Prozessketten der additiven Fertigung, um die Verfahren im Rahmen einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können (z. B. Anpassung von Planungs- und Ausführungssystemen, kontinuierliche Datenzuführung, Bestückung des Druckers mit Druckmaterial, Entnahme der Druckobjekte).
- Weiterentwicklung und Anpassung von Qualitätssicherungstools (z. B. zerstörungsfreie Prüfverfahren auf Basis von Ultraschall und 3D-Monitoring).

- Automatisierter Abgleich von virtuell geplanten und realen Produktionsprozessen, um z. B. die Systeme bei Abweichungen entsprechend automatisch anpassen zu können.
- Entwicklung von Kommunikationsstandards und -tools für die Integration der additiven Fertigung in weitere Produktionsprozesse und in die Smart Factories der Zukunft.

### Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz

- Entwicklung von Konzepten und Technologien zur Vernetzung von 3D-Druckern, um diese über einen Unternehmensstandort hinaus bestmöglich auslasten zu können.
- Entwicklung und Anpassung von Logistikkonzepten und Technologien, die Sharing-Konzepte von 3D-Druckern in Echtzeit unterstützen.
- Untersuchung möglicher Rebound-Effekte und der Ökobilanzen bezüglich der eingesetzten Technologien und Verfahren sowie der Anwendungsbereiche.



# 1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren (AF), außerhalb der Fachwelt auch unter dem Synonym 3D-Druck zusammengefasst, erfahren aktuell eine große Popularität. Die von der deutschen Bundesregierung eingerichtete Expertenkommission für Forschung und Innovation (EFI) geht davon aus, dass additive Fertigungsverfahren zukünftig eine wichtige Rolle als Schlüsseltechnologie einnehmen werden (EFI 2015). Darüber hinaus wird das Thema im Rahmen einer breiten gesellschaftlichen Diskussion behandelt, führt bei Suchanfragen zu einer hohen Trefferquote und weist einen politisch-normativen Hintergrund auf.

Additive Fertigung wurde von der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM International wie folgt definiert (ASTM 2012): „Additive Manufacturing is a process of joining materials to make objects from three dimensional (3D) model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. As a new tool in the entrepreneurial toolbox, additive manufacturing systems use computer-aided design models (CAD) and 3D scanning systems for production.“

Im Gegensatz zu den subtraktiven (Drehen, Fräsen) und formativen (Gießen, Schmieden) Verfahren erlauben additive Fertigungsverfahren die Herstellung komplexer Geometrien und innerer Strukturen auf Basis einer

schichtweisen Konstruktion. Zudem macht die Vielfalt an nutzbaren Materialien (Kunststoffe, Metalle, Keramiken, Beton, Zellen etc.) und deren impliziten Eigenschaften die additive Fertigung für ein breites Anwendungsfeld hochinteressant.

Während der Reifegrad der Technologie für die industrielle Fertigung in vielen Anwendungsbereichen bereits weit fortgeschritten ist, lassen sich die Desktopfertigung durch Konsumenten und das Bioprinting in einem frühen technologischen Stadium verorten (EFI 2015). Die Branchen, in denen die additive Fertigung zum Einsatz kommt, sind mit Anwendungsbeispielen in Tabelle 1 dargestellt.

Hinsichtlich der notwendigen Standards und Normen wurden im Rahmen einer Zusammenarbeit der Normungsorganisationen ISO und ASTM bereits gemeinsame Standards für die additive Fertigung eingeführt (eine Übersicht findet sich im Anhang, siehe Kapitel 7.1, S. 26). Rechtliche Besonderheiten, die die additive Fertigung betreffen, werden vor allem bezüglich neuer Geschäftsmodelle diskutiert (VDI 2016b). Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der bestehende Rechtsrahmen (Haftungs-, Patentrecht etc.) ausreichend ist, um Streitigkeiten zu klären.

Tabelle 1

Anwendungsbeispiele für die Branchen, in denen die additive Fertigung genutzt wird (angepasst nach VDI 2014).

Branche	Anwendungsbeispiel
<b>Automobilindustrie</b>	Wasserpumpenrad (Kühlung), Nebelschlussleuchte, Innenverkleidung <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-druck-automobilindustrie">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-druck-automobilindustrie</a>
<b>Architektur, Möbelindustrie, Design und Kunst</b>	Modellbau, Brückenbau, Hausbau und Hausfertigteile, Isolierung, Raumausstattung <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-architektur">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-architektur</a>
<b>Elektrotechnik- und Elektronikindustrie</b>	Entwicklung von 3D-Druckpasten, Prototypen von z. B. Drohnen <a href="http://www.heise.de/newsticker/meldung/Gedruckte-Drohnen-dank-Silbertinte-2582345.html">http://www.heise.de/newsticker/meldung/Gedruckte-Drohnen-dank-Silbertinte-2582345.html</a>
<b>Film- und Unterhaltungsindustrie</b>	Requisiten, Kulissen, Masken, Rüstungen, Schmuck, Skulpturen <a href="http://www.kubikwerk.de/branchen/film-und-fernsehen/">http://www.kubikwerk.de/branchen/film-und-fernsehen/</a>
<b>Luft- und Raumfahrtindustrie</b>	Teile für Jet-Motoren, Düsengetriebe, Bauteile wie Fensterrahmen etc. <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-druck-luftfahrt">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-druck-luftfahrt</a>
<b>Medizintechnik, Prothetik, Dentaltechnik, medizinische Hilfsmittel</b>	Prothesen, Hörgeräte, Zahnersatz, Gewebe <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/medizin-3d-drucker">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/medizin-3d-drucker</a>
<b>Nahrungsmittelindustrie</b>	Fruchtgummi, Haute cuisine <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/lebensmitteldrucker">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/lebensmitteldrucker</a>
<b>Rüstungsindustrie</b>	Drohnen, Waffen wie Sprengköpfe, Individualisierte Uniformen <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-militaer">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-militaer</a>
<b>Sportgeräteindustrie</b>	Individualisierte Schuhe, Fahrradlenker, Snowboards, Paralympics <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-sport/">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/3d-drucker-sport/</a>
<b>Spielwaren-Industrie</b>	Druck von Lego, Stofftiere <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/spielzeug-3d-drucker">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/spielzeug-3d-drucker</a>
<b>Textil- und Bekleidungsindustrie</b>	Insbesondere Schuhe und Fashion <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/kleidung-3d-drucker/">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/kleidung-3d-drucker/</a>
<b>Wissenschaft</b>	Neue Materialien (inkl. Self-Assembly), Prozesskette, Bioprinting, Medizintechnik, Mikrostrukturen <a href="http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/page/2">http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/page/2</a>

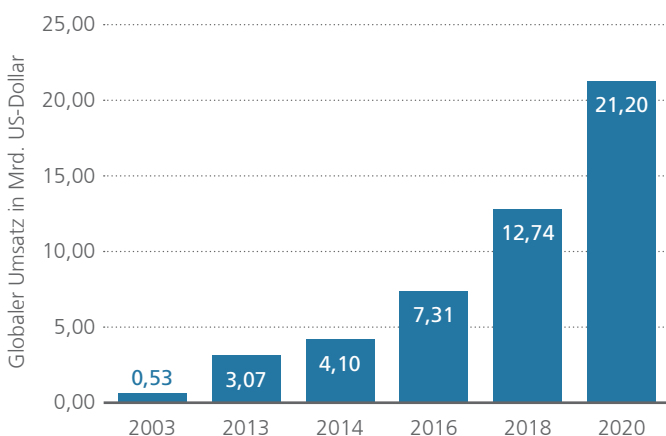
## 2 Marktsituation

Während für additiv gefertigte Produkte aktuell keine verlässlichen Schätzungen des globalen Umsatzes vorliegen, wurde die Marktsituation für AF-Güter und deren zukünftige Entwicklung in der EFI-Studie (EFI 2015) auf Basis von Ergebnissen eines Marktforschungsunternehmens zusammengefasst. Zu AF-Gütern gehören: 3D-Drucker, Material, Zubehör und Software sowie AF-bezogene Dienstleistungen, die zur Herstellung von AF-Produkten genutzt werden.

Der globale Umsatz von AF-Gütern hat sich zwischen 2003 und 2014 beinahe verachtfacht, und es wird eine sehr positive Marktentwicklung prognostiziert (Abbildung 1). Für deutsche Unternehmen wurde der Anteil am globalen Umsatz mit AF-Gütern für das Jahr 2010 mit 15 bis 20 % beziffert, was einem Umsatz von ca. 260 Mio. US-Dollar entspricht. Abschätzungen zufolge sind ca. 1.000 deutsche Unternehmen im Bereich der AF-Güter tätig, wovon ca. 90 % die Mittelstandsdefinition der EU erfüllen. Wichtige deutsche Unternehmen sind: EOS Electro Optical Systems GmbH, SLM Solutions GmbH, Voxeljet AG, Concept Laser GmbH, Envisiontec GmbH sowie Realizer GmbH. Im Bereich der metallbasierten PBF-Verfahren sind deutsche Unternehmen weltweit führend (VDI 2014).

Abbildung 1

Globaler Umsatz durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen im Bereich der additiven Fertigung (eigene Darstellung, Daten aus EFI 2015, Wohlers 2015).

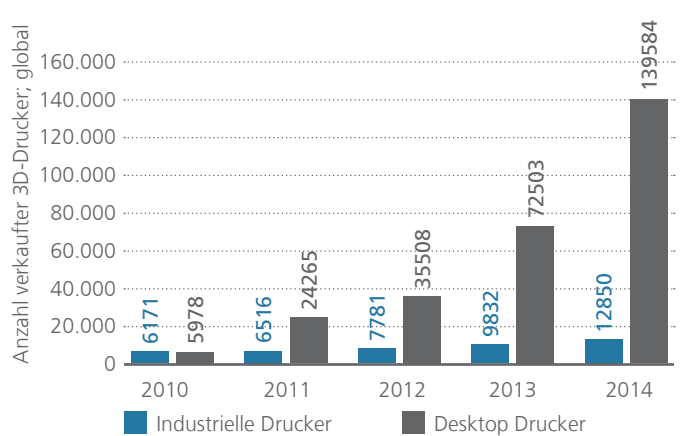


Die globalen<sup>1</sup>, jährlichen Verkaufszahlen von industriellen 3D-Druckern und Desktop<sup>2</sup> 3D-Druckern sind seit 2010 stark gestiegen. Seit 2011 ist zu beobachten, dass insbesondere Desktop-3D-Drucker einen rasant steigenden Absatz erfahren. Während sich die Anzahl der verkauften industriellen 3D-Drucker zwischen 2010 und 2014 verdoppelte, haben sich die Verkaufszahlen von Desktop-3D-Druckern sogar mehr als verzwanzigfacht (Abbildung 2).

- 1 Die Anzahl der global verkauften 3D-Drucker beruht auf Angaben der führenden Systemhersteller. Für die globale Darstellung der verkauften Einheiten wurden die USA, Kanada, Japan, China, Korea, Singapur, Österreich, Dänemark, England, Frankreich, Deutschland, Irland, Italien, Schweden und Israel einbezogen (Wohlers 2015).
- 2 3D-Drucker mit einem Anschaffungspreis unter 5.000 Dollar wurden als „Desktop 3D-Drucker“ definiert.

Abbildung 2

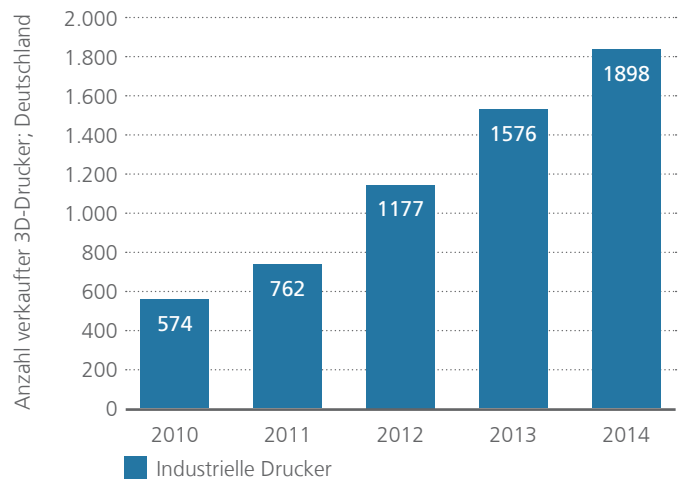
Globale Verkaufszahlen für industrielle 3D-Drucker und Desktop-3D-Drucker (eigene Darstellung, Daten aus Wohlers 2015).



In Deutschland ist ein ähnlicher Trend zu beobachten. Hier haben sich die Verkaufszahlen von industriellen 3D-Druckern zwischen 2010 und 2014 mehr als verdreifacht (Abbildung 3). Für Desktop-3D-Drucker liegen aktuell keine Daten vor. Aufgrund dessen, dass der Einsatz von günstigen Desktop-3D-Druckern bei Architekten, Designern und Dienstleistern stark zugenommen hat, kann jedoch von einer ähnlichen Entwicklung wie in der globalen Betrachtung ausgegangen werden.

**Abbildung 3**

Verkaufszahlen für Deutschland von für industrielle 3D-Drucker. (eigene Darstellung, Daten aus Wohlers 2015).



# 3 Technischer Entwicklungsstand und Anwendungsbereiche der additiven Fertigung

In der additiven Fertigung werden viele Verfahren genutzt, die sich aufgrund ihrer technischen Prozesse und den einsetzbaren Materialien signifikant unterscheiden. Es können jedoch acht Schritte in der Prozesskette identifiziert werden, die im Rahmen der meisten Verfahren durchlaufen werden (Gibson et al. 2015):

- i. Mit Hilfe eines CAD-Systems (Computer-Aided Design) wird ein virtuelles, dreidimensionales Modell eines Objekts rechnerunterstützt konstruiert. Das dreidimensionale Modell kann auch durch einen 3D-Scan realisiert werden.
- ii. Die CAD-Daten werden in ein STL-Format umgewandelt (Surface Tessellation Language), welches der Beschreibung geometrischer Informationen von dreidimensionalen Datenmodellen dient. Es handelt sich um die meistgenutzte Schnittstelle für am Markt erhältliche 3D-Drucker.
- iii. Der Transfer der STL-Daten in einen 3D-Drucker.
- iv. Einrichtung des 3D-Druckers und Festlegung der Druckparameter. Hierzu gehören u. a. die Druckposition im 3D-Drucker, die Atmosphäre und die Temperatur des Druckraums, die Eigenschaften der Energiequelle, die Materialeigenschaften, die Schichtdicke und die Druckzeit.
- v. Die Herstellung des Objekts im 3D-Drucker erfolgt i. d. R. automatisiert.
- vi. Nach der Fertigstellung kann das Objekt dem 3D-Drucker i. d. R. direkt entnommen werden.
- vii. Das gedruckte Objekt muss abhängig vom Druckverfahren verschiedene Nachbearbeitungsschritte durchlaufen, u. a. die Entfernung überschüssigen Druckmaterials (Pulvers) oder die Infiltration des Objekts mit Bindemitteln, um eine annehmbare Festigkeit zu erzeugen.
- viii. Die additiv erzeugten Objekte können nun genutzt werden. Je nach Anwendung werden die Objekte ggf. weiter behandelt, z. B. grundiert oder lackiert.

Die meistgenutzten Verfahren in der additiven Fertigung sind die pulverbasierten Verfahren und das Extrusionsverfahren (VDI 2014). Bei den pulverbasierten Prozessen wird eine dünne Schicht Pulver (Metall, Keramik etc.) auf eine Arbeitsfläche aufgetragen und mittels Laser eine definierte Kontur geschmolzen, die sich nach dem Erstarren verfestigt. Daraufhin wird eine neue Schicht Pulver aufgetragen, und der Prozess wiederholt sich (PBF-Verfahren). Im Extrusionsverfahren werden thermoplastische Kunststoffe über eine beheizte Düse verformbar gemacht und geometrisch definiert abgelegt (EB-Verfahren). Tabelle 2 gibt einen umfassenden Überblick über die gängigen Verfahren, und in Tabelle 3 werden nutzbare Materialien und Anwendungsbereiche benannt.

Tabelle 2

Additive Fertigungsverfahren und einsetzbare Materialien (angepasst nach Gibson et al. 2015).

Verfahren	Beschreibung
<b>Powder Bed Fusion processes (PBF)</b>	Bei PBF-Verfahren werden durch eine oder mehrere thermische Quellen - dies sind in der Regel Laser oder Elektronenstrahlquellen - dünne Pulverschichten, die in einem definierten Bauraum abgelegt werden, gesintert bzw. verschmolzen. Die Bauteile müssen nach dem Druckprozess von anhaftendem Pulver befreit werden.
<b>Extrusion Based processes (EB)</b>	Bei EB-Verfahren wird zwischen physikalischen und chemischen Verfahren unterschieden. Im Rahmen von chemischen EB-Verfahren wird ein flüssiges Medium über eine Düse abgelegt, welches durch eine chemische Reaktion in den festen Aggregatzustand wechselt. Bei physikalischen EB-Verfahren werden thermoplastische Kunststoffe über eine beheizte Düse geschmolzen, extrudiert und auf eine beheizte Bauplattform abgelegt. Dieses Verfahren wird oft auch als Fused Deposition Modelling (FDM) bezeichnet.
<b>Photopolymerization processes (PP)</b>	Bei PP-Verfahren werden flüssige Photopolymere i. d. R. durch UV-Strahlung punkt- oder schichtweise auf einer Bauplattform vernetzt, so dass sich das Polymer verfestigt. Während des Prozesses ist die Bauplattform in das Photopolymer eingetaucht. Als UV-Quelle dienen meist Laser.
<b>Material Jetting (MJ)</b>	Bei MJ-Verfahren werden i. d. R. flüssige Photopolymere oder Wachse über einen Druckkopf tropfenweise auf eine Bauplattform abgelegt und durch UV-Licht polymerisiert. Für die tropfenweise Ablage haben sich insbesondere zwei Technologien etabliert, die continuous stream (CS) und DOD-Methode.
<b>Binder Jetting (BJ)</b>	Bei BJ-Prozessen wird ein Bindemittel auf ein Pulver aufgetragen, so dass diese Schicht für Schicht infiltriert und zu einem dreidimensionalen Objekt verbunden wird. Das Verfahren ist auch unter dem Synonym 3D Printing (3DP) bekannt. Die Objekte werden nach dem Druck ggf. zusätzlich mit weiteren Bindemitteln infiltriert oder thermisch behandelt, u. a. um eine höhere Festigkeit zu erzeugen.
<b>Sheet Lamination processes (SL)</b>	Bei SL-Prozessen werden dünne, zweidimensionale Flächen aus einem Werkstoff ausgeschnitten und Layer für Layer zusammengefügt, so dass ein dreidimensionales Objekt entsteht.
<b>Directed Energy Deposition processes (DED)</b>	Bei DED-Verfahren werden mit Hilfe eines Lasers oder einer Elektronenstrahlquelle simultan das Substrat sowie das Material, das auf dem Substrat abgelegt werden soll, aufgeschmolzen und dem Druckpunkt kontinuierlich zugeführt. Im Gegensatz zu PBF-Verfahren wird das Material während der Ablage aufgeschmolzen.

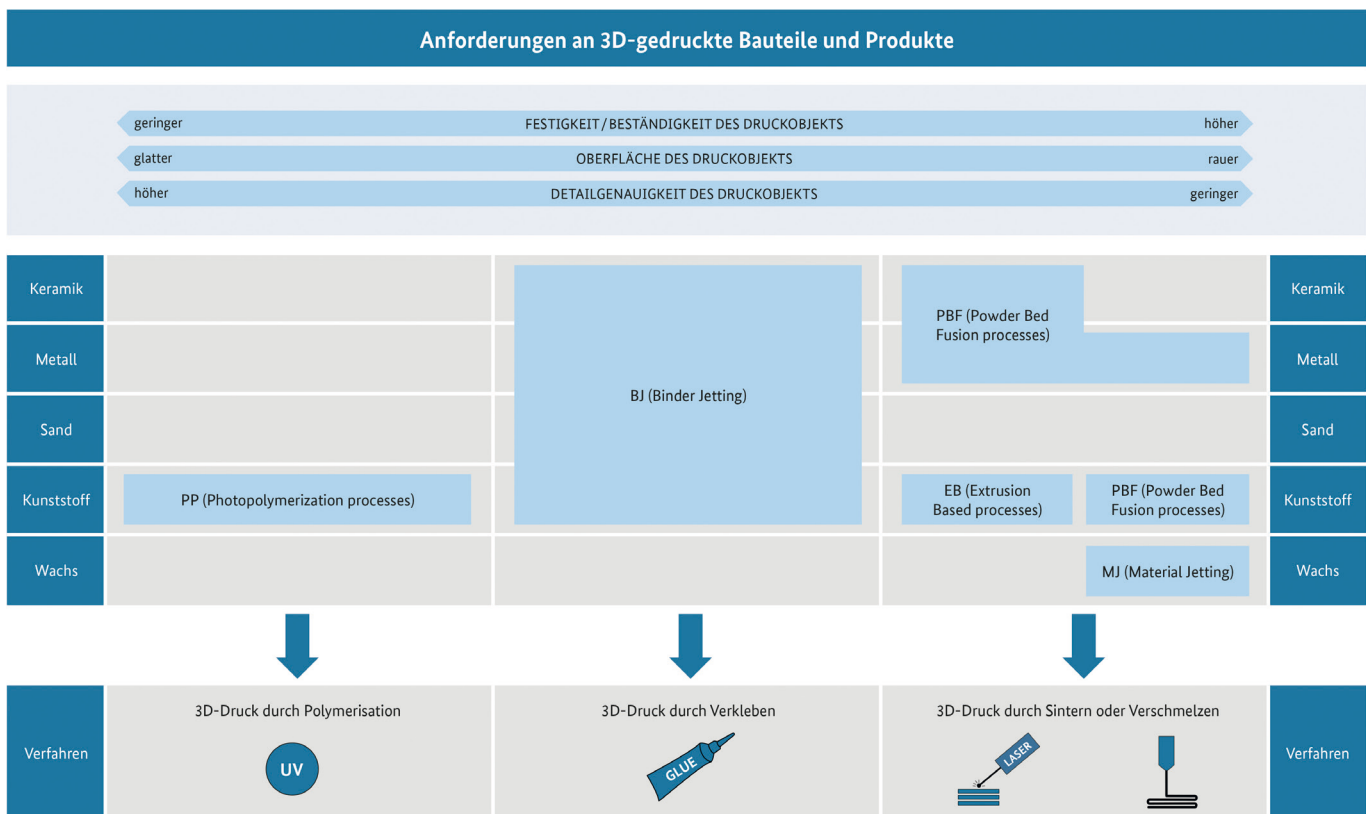
Tabelle 3

Einsetzbare Materialien und Anwendungsbereiche (angepasst nach Gibson et al. 2015; additively.com 2016).

Verfahren	Materialien	Anwendungsbereiche
<b>Powder Bed Fusion processes (PBF)</b>	Thermoplasten und Elastomere insbesondere Polyamid oder Nylon; Metalle wie Edelstahl und Werkzeugstahl, Titan und Legierungen; Aluminiumlegierungen; Keramiken	Prototypen für Form- und Passtests sowie Funktionstests; Hilfsteile (Schablonen, Lehren, etc.); Werkzeuge für Spritzguss können in Warmarbeitsstahl hergestellt werden; Kleinserienteile und Unikate
<b>Extrusion Based processes (EB)</b>	Thermoplasten insbesondere Polylactide; Acrylnitril-Butadien-Styrol	Prototypen für Form- und Passtests sowie Funktionstests; Hilfsteile (Schablonen, Lehren, etc.); Kleinserienteile
<b>Photopolymerization processes (PP)</b>	Photopolymere	Prototypen mit hohen Genauigkeiten und guten Oberflächen für visuelle Tests sowie Form- und Passtests; Urm Modelle; Werkzeuge für den Spritzguss von Kleinstserien
<b>Material Jetting (MJ)</b>	Photopolymere; Wachs	Prototypen mit hohen Oberflächengenauigkeiten; Gussmodelle mit hoher Genauigkeit und guten Oberflächen, insbesondere für die Medizin-, Dental- und Schmuckindustrie
<b>Binder Jetting (BJ)</b>	Stärke + wasserbasierte Bindemittel; Metalle + Bronze oder Kunststoffe; Sand + Kunststoffe; Keramik + Kunststoffe	Prototypen in voller Farbe für Form- und Passtests; Grünteile; Urm Modelle für den Guss; Gussformen und Gusskerne aus speziellem Gussand
<b>Sheet Lamination processes (SL)</b>	Papier; Metalle; Kunststoffe; Keramiken	Verschiedenfarbige Prototypen für Form- und Passtests
<b>Directed Energy Deposition processes (DED)</b>	Metalle; Kunststoffe; Keramiken	siehe PBF

Abbildung 4

Anforderungen an Bauteile und Produkte, die mit Hilfe der additiven Fertigung hergestellt werden, sowie mögliche Verfahren und Materialien. (Hinweis: Das MJ-Verfahren kann auch mit Photopolymeren umgesetzt werden. Es werden Druckobjekte mit einer hohen Detailgenauigkeit und glatten Oberflächen erzielt). (Angepasst nach additively.com 2016) © iit



In Abhängigkeit von den gewünschten Materialien und Anforderungen an Bauteile und Produkte stehen dem Anwender unterschiedliche Verfahren der additiven Fertigung zur Verfügung (Abbildung 4).

Auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene ist die komplette Wertschöpfungskette an den Entwicklungsprozessen beteiligt. Hierzu gehören die Technologielieferanten (Scanner und CAD; Material; Anlagentechnik; etc.), die Forschungsinstitute (Verfahren; Materialien; Gestaltung; Standards etc.), die Anwender (Produktion; Verarbeitung etc.) und die Dienstleister (Prozesse;

Automatisierung; Geschäftsmodelle) (VDMA 2015). Der Konsument als weiterer wichtiger Akteur könnte zukünftig verstärkt an Bedeutung gewinnen. Aktuell ist die additive Fertigung jedoch kaum in den hiesigen Haushalten vertreten und wird bisher nur von einer heterogenen Gruppe frühzeitiger Technologieanwender und Nutzerinnovatoren eingesetzt, die oft als „Maker Movement“ zusammengefasst werden.

Die verschiedenen Verfahren der additiven Fertigung können drei branchenübergreifenden Hauptanwendungsfeldern zugeordnet werden:

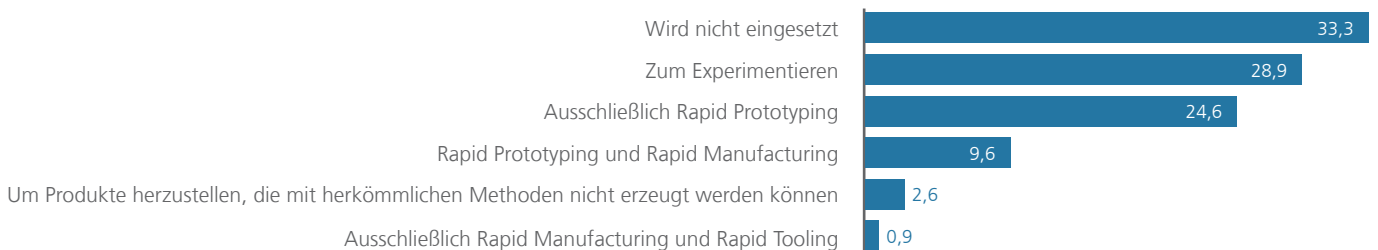


1. Beim Rapid Prototyping werden die Verfahren der AF für die schnelle Herstellung von zum Teil funktionsfähigen Prototypen und Musterbauteilen eingesetzt.
2. Beim Rapid Tooling werden die Verfahren der AF für den Werkzeug- und Formenbau eingesetzt. Im Fokus steht die zeitnahe Herstellung komplexer Werkzeuge für z. B. den Kunststoffspritzguss.
3. Beim Rapid Manufacturing werden die Verfahren der AF für die flexible, schnelle Fertigung von Bauteilen und Serien eingesetzt.

Im Rahmen einer Anwenderbefragung aus dem Jahr 2014 (Abbildung 5) konnte gezeigt werden, dass die additive Fertigung vor allem für das Rapid Prototyping und zum Experimentieren genutzt wird (PWC 2015). Aktuelle Entwicklungen zeigen jedoch, dass immer mehr Anwender die additive Fertigung auch für das Rapid Manufacturing und das Rapid Tooling nutzen und der Technologie ein großes Entwicklungspotenzial zusprechen. Die Möglichkeiten der additiven Fertigung, insbesondere die neuen Formen der Fabrikation, werden zudem in der Öffentlichkeit breit diskutiert.

### Abbildung 5

Nutzungsprofile additiver Fertigung in Unternehmen (angepasst nach PWC 2015)












Insbesondere für Bauteile und Produkte, die im Bereich Rapid Tooling und Rapid Manufacturing hergestellt werden, müssen die gleichen hohen Qualitätsstandards eingehalten und die Produkte ggf. zertifiziert werden, wie bei der Herstellung mit klassischen Fertigungsverfahren. Hierbei spielen automatisierte, zerstörungsfreie Prüfverfahren eine wichtige Rolle, die der Prozesskette der additiven Fertigung nachgeschaltet sind. Hierzu gehören z. B. Ultraschall und Prüfverfahren, die auf Basis von 3D-Aufnahmen die Bauteilgüte bewerten.

Eine Zuordnung zwischen einzelnen AF-Verfahren und einem Anwendungsfeld ist nicht möglich bzw. sinnstiftend, weil die meisten Verfahren der additiven Fertigung über die Grenzen der einzelnen Anwendungsfelder hinaus genutzt werden können. Um einen Überblick über die Technologiereife der drei häufig genutzten Verfahren (PBF-Verfahren, EB-Verfahren und PP-Verfahren) zu bekommen, wurden die Anwendungsfelder bezüglich der unterschiedlichen Branchen in Abbildung 6 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass PBF-Verfahren i. d. R. eine komplexe technische Infrastruktur benötigen, so dass diese bisher vor allem in der Industrie genutzt werden. PBF- und PP-Verfahren werden hingegen auch außerhalb der industriellen Anwendung genutzt.

Abbildung 6

Branchenspezifische Anwendungsfelder der am häufigsten genutzten Verfahren\*.

\* eigene Einschätzung, validiert durch den Leiter des VDI Fachausschusses „Additive Manufacturing“. © iit

Branche	Powder Bed Fusion processes (PBF)			Extrusion Based processes (EB)			Photopolymerization processes (PP)		
	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing	 Prototyping	 Tooling	 Manufacturing
Automobilindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	●
Architektur, Möbelindustrie, Design und Kunst	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Elektrotechnik- und Elektronikindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Film- und Unterhaltungsindustrie	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Luft- und Raumfahrtindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Medizintechnik, Prothetik, Dentaltechnik, medizinische Hilfsmittel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Nahrungsmittelindustrie	✗	✗	✗	✓	✗	●	✗	✗	✗
Rüstungsindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Sportgeräteindustrie	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Spielwaren- und Game-Industrie	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Textil- und Bekleidungsindustrie	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Wissenschaft	✓	●	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗

✓ Technologie ist soweit/bereits im produktiven Einsatz     
 ✗ Technologie ist noch nicht so weit/nicht relevant     
 ● Technologie ist noch im Entwicklungsstadium

Erläuterungen:



Beim Rapid **Prototyping** werden die Verfahren der AF für die schnelle Herstellung von zum Teil funktionsfähigen Prototypen und Musterbauteilen eingesetzt.



Beim Rapid **Tooling** werden die Verfahren der AF für den Werkzeug- und Formenbau eingesetzt. Im Fokus steht die zeitnahe Herstellung komplexer Werkzeuge für z. B. den Kunststoffspritzguss.



Beim Rapid **Manufacturing** werden die Verfahren der AF für die flexible, schnelle Fertigung von Bauteilen und Serien eingesetzt.

## 4 Forschung, Entwicklung und Fördersituation

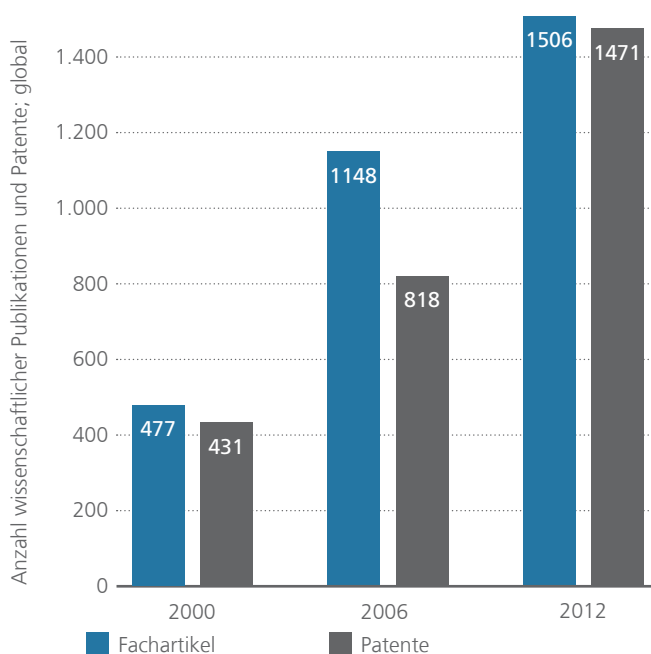
Während Publikationen in Fachmagazinen die wissenschaftlichen Tätigkeiten an Hochschulen und Forschungsinstituten gut abbilden, sind Patente ein angemessener Indikator für die Messung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten von Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen.

Die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel mit einem Schwerpunkt im Bereich der additiven Fertigung haben sich zwischen 2003 und 2012 verdreifacht (Abbildung 7). In Deutschland ansässige Wissenschaftler/-innen gehörten zwischen 2000 und 2014 zu den Publikationsstärksten – nach den USA und China. Im internationalen Vergleich hatten ihre Publikationen einen hohen Hirsch-Index<sup>3</sup>. Im globalen Vergleich zählen drei deutsche Hochschulen zu den 30 bedeutendsten Forschungseinrichtungen im Bereich der additiven Fertigung (EFI 2015).

<sup>3</sup> Der Hirsch-Index (h-Index) ist ein Indikator für die Qualität wissenschaftlicher Publikationen. Er reflektiert die Zitationen der Publikationen eines Wissenschaftlers.

### Abbildung 7

Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen und Patentanmeldungen, die zwischen 2000 und 2012 veröffentlicht wurden (angepasst nach EFI 2015).



Die Anzahl der angemeldeten PCT-Patentfamilien im Bereich der additiven Fertigung hat sich zwischen 2003 und 2012 ebenfalls mehr als verdreifacht (Abbildung 7). Die USA und Japan belegten 2012 eine deutlich führende Position. Deutschland belegte hinter China die vierte Position.

Die Förderung von additiver Fertigung<sup>4</sup> in Deutschland findet insbesondere im Kontext spezifischer Anwendungsbereiche statt. Additive Fertigungsverfahren werden im Rahmen der institutionellen Förderung<sup>5</sup> sowie der Projektförderung des Bundes gefördert. Zwei aktuelle Fördermaßnahmen des BMBF sind die Programme „Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter“ (Laufzeit: 2013 bis 2020; Gesamtbudget: 45 Mio. €), das im Rahmen des Regionalförderprogramms Zwanzig20 gefördert wird und „Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat\_3D)“, die Bestandteil der neuen Hightech-Strategie der Bundesregierung sind. Die Ziele der Fördermaßnahmen sind insbesondere:

- Entwicklung der additiv-generativen Fertigung zu einer Schlüsseltechnologie
- Aufbau nachhaltiger Netzwerkstrukturen
- Messbare Steigerung der Exportnachfrage
- Positionierung Deutschlands als Leitanbieter
- Vorantreiben der Produktionsforschung und Materialforschung

Eine Auswertung<sup>6</sup> der Datenbanken UFORDAT, GePris

<sup>4</sup> Gemeint ist die Förderung aller mit der additiven Fertigung im Zusammenhang stehenden Technologien, also über die reine Verfahrenstechnik hinaus.

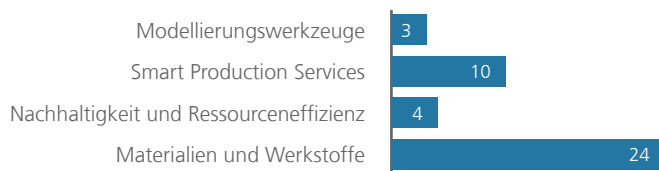
<sup>5</sup> Das betrifft insbesondere die Grundfinanzierung von Forschungseinrichtungen, wie z.B. FhG, MPI, etc.

<sup>6</sup> Für die Analyse wurde mit den Begriffen „3d druck“, „3d-druck“, „additive manufacturing“ und „additive fertigung“ in den folgenden Datenbanken nach Förderprojekten gesucht: Umweltforschungsdatenbank des UBA - UFORDAT (<http://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/information-als-instrument/umweltforschungsdatenbank-ufordat>); DFG - GePris (<http://gepris.dfg.de/>); Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/>)

und Förderkatalog (Abbildung 8) ergab, dass von 35 in Deutschland geförderten oder in der Förderung befindlichen Projekten mit einem Bezug zur additiven Fertigung, mit Abstand der Großteil der Projekte im Schwerpunkt der Materialentwicklung zu verorten ist. Projekte mit einem stärkerem IKT-Bezug in den Schwerpunkten Smart Production Services, Modellierungswerkzeuge sowie Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sind auf der Agenda zur Förderung von FuE-Vorhaben weitaus weniger stark vertreten.

#### Abbildung 8

Thematische Einstufung von 35 in Deutschland geförderten oder in der Förderung befindlichen Projekten im Bereich der additiven Fertigung, die im Rahmen einer Datenbankrecherche untersucht wurden (Datenbanken: UFORDAT, GePris und Förderkatalog). Förderprojekte können einen oder mehrere Schwerpunkte bedienen.



Im europäischen Kontext findet die Förderung aktuell auf Basis von übergeordneten Programmen bzw. Anwendungsbereichen statt. Ein spezifisches Förderprogramm für die AF ist derzeit nicht bekannt (EFI 2015).

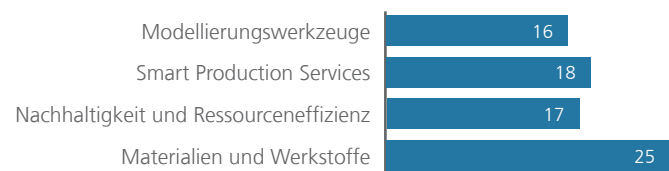
Eine Auswertung der Datenbank CORDIS<sup>7</sup> (Abbildung 9) zeigt, dass in Europa innerhalb der beiden Rahmenprogramme FP7 und Horizon 2020 insbesondere interdisziplinär ausgerichtete Projekte gefördert werden, die mehr als einen thematischen Schwerpunkt bedienen. Von 63 in Europa geförderten oder in der Förderung befindlichen Projekten mit einem Bezug zur additiven Fertigung werden Projekte mit einer Fokussierung auf die Materialentwicklung überdurchschnittlich oft gefördert. Darüber

<sup>7</sup> Für die Analyse wurde mit den Begriffen „3D-Print\*“ und „additive manufacturing“ in der folgenden Datenbank nach Förderprojekten gesucht: Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Europäischen Kommission - CORDIS (<http://cordis.europa.eu/>). Einbezogen wurden Projekte aus den beiden Rahmenprogrammen FP7 und Horizon 2020 (Abfragedatum: 16.02.2016).

hinaus sind Projekte in den Schwerpunkten Smart Production Services, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sowie Modellierungswerkzeuge im Vergleich zu national geförderten Projekten anteilig stärker vertreten. Die Gesamtfördersumme der 63 Projekte beläuft sich auf ca. 160 Mio. Euro.

#### Abbildung 9

Thematische Einstufung der europäischen Förderprojekte im Bereich der additiven Fertigung, die im Rahmen einer Datenbankrecherche untersucht wurden (Datenbanken: CORDIS).



Die USA fördert über das 2012 gestartete Programm „National Network of Manufacturing Innovation“ das National Additive Manufacturing Innovation Institute<sup>8</sup>, welches von der Regierung mit 50 Mio. US-Dollar ausgestattet wurde (EFI 2015). Die chinesische Regierung plant in nächster Zeit die additive Fertigung mit 245 Mio. US-Dollar zu fördern. Aktuell werden zehn Forschungseinrichtungen über die staatlich geförderte Handelsgruppe Asian Manufacturing Association (AMA) aufgebaut (EFI 2015). Insgesamt kann die Fördersituation in Europa, Asien und Amerika als relativ ausgewogen eingeschätzt werden.

<sup>8</sup> <https://americamakes.us>

# 5 Forschungsbedarfe und Perspektiven

Die additive Fertigung hat ihren Ursprung im Prototypen- und Kleinserienbau. Um eine größtmögliche Flexibilität zu erhalten, wurde auf eine umfangreiche Automatisierung der Prozesse verzichtet, so dass noch heute zahlreiche händische Eingriffe im Prozess nötig sind (VDI 2014). Die Kerntechnologien der additiven Fertigungsverfahren erreichen damit zwar heute bereits einen sehr hohen Reifegrad. Gefragt sind allerdings jetzt insbesondere IKT-gestützte Lösungen für eine verbesserte Nutzung und Integration der additiven Fertigungsverfahren, um ihr volles Potenzial in Zukunft ausschöpfen zu können. In Deutschland werden, wie bereits dargestellt, Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit den hierfür relevanten Schwerpunkten Modellierungswerkzeuge, Smart Production Services sowie Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz weitaus weniger stark vorangetrieben als Projekte im Bereich der Materialien und Werkstoffe. Daraus leiten sich Handlungsbedarfe ab, die im Folgenden skizziert werden.

## 5.1 Intuitive Modellierungswerkzeuge

Die Basis für AF-Objekte sind virtuelle, dreidimensionale Modelle. Diese werden in der Regel rechenunterstützt konstruiert (CAD) oder mit Hilfe eines 3D-Scanners realisiert. Der Umgang mit 3D-Konstruktionsprogrammen und die Erstellung von 3D-Modellen gelten unter Fachanwendern in der Regel als unproblematisch und insbesondere im Ingenieurbereich haben sich viele mit den gängigen Methoden arrangiert. Alternative Modellierungsansätze, wie z. B. die Subdivisionsverfahren, setzen sich allerdings nur langsam im Markt durch.

Softwareanwendungen, mit denen dreidimensionale Modelle für die additive Fertigung konstruiert und dargestellt werden können, haben bis heute oftmals eine Schwäche. Wichtige Informationen, wie z. B. die Zuordnung von Materialeigenschaften oder die Festkörpersimulation mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) können mit diesen Konstruktionsprogrammen nicht dargestellt bzw. umgesetzt werden. Hierfür muss auf zusätzliche Softwarelösungen zurückgegriffen werden, die 3D-Daten auf

völlig unterschiedliche Weise interpretieren. Dies führt zu Kompatibilitätsproblemen und zu Zeitverlusten bei etwaigen Anpassungen der virtuellen AF-Objekte, die der Automatisierung der Prozessketten in der additiven Fertigung entgegenwirken. Zudem ist die Nutzung verschiedener Softwareprogramme nutzerunfreundlich und fehleranfällig. Integrierte Softwarelösungen sind daher eine Voraussetzung, um die additive Fertigung im Rahmen einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können.

Die User-Experience von Konstruktionsprogrammen für Konsumenten wird als eher negativ eingeschätzt. Bisher sind private Anwender und Nichtexperten im industriellen Bereich, die additive Verfahren einsetzen möchten, meist auf Konstruktionsdaten angewiesen, welche käuflich erworben werden müssen oder frei zugänglich sind. Um Produkte selbst gestalten oder modifizieren zu können, sind intuitiv bedienbare Konstruktionsprogramme notwendig. Für den intuitiven Umgang mit Modellierungswerkzeugen werden Ansätze wie die generative Modellierung beforscht und sind zum Teil bereits auf dem Markt erhältlich. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass intuitivere Mensch-Computer-Schnittstellen notwendig sind, um es privaten Nutzern zu ermöglichen, 3D-Modelle für den 3D-Druck zu konstruieren oder anzupassen. Obwohl die Mehrzahl der privaten Anwender den Umgang mit IT gewohnt ist, stellt sie der Umgang mit 3D-Daten vor eine große Herausforderung – insbesondere wenn es sich um technische Konstruktionen handelt. Um die Potenziale der AF bestmöglich nutzen zu können, müssen Benutzerschnittstellen entwickelt werden, die speziell auf die dritte Dimension ausgerichtet sind und Technologien wie die mobile Augmented Reality einbeziehen (Astor et al. 2013). Dies würde auch den industriellen Anwendern zu Gute kommen.

### Handlungsempfehlungen

- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen und Nutzerschnittstellen für private Anwender, die eine möglichst intuitive Eingabe ermöglichen.
- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen und

Dateiformaten, die eine Modellierung von Form und Verhalten sowie die Simulation von Bauteileigenschaften gleichermaßen ermöglichen bzw. unterstützen.

- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen zur maschineninterpretierbaren Beschreibung von Objekten (Morphologie, Materialeigenschaften und Porositäten, Bauteilverhalten, Bauteilsimulation etc.).

## 5.2 Smart Production Services und Prozessintegration

Derzeit mangelt es insbesondere an einer ausreichenden Automatisierung der additiven Fertigungsprozesse. Von einer Prozesseinbindung in andere Fertigungsketten ist die Technologie noch weit entfernt. Aktuell zeichnet sich zudem der Trend ab, dass Maschinenhersteller die individuelle Eingabe von Bedienparametern stark einschränken und für verschiedene Materialien oder Anwendungen Parameter-Setups vom Hersteller bezogen werden müssen. Dieses Vorgehen kann den Herstellern neue Möglichkeiten im Bereich der Dienstleistungen eröffnen. Andererseits kann das Innovationspotenzial durch eine solche Einschränkung empfindlich negativ beeinträchtigt werden. Ein weiterer wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Prozesseinbindung ist die Anwendung und Weiterentwicklung gängiger Qualitätssicherungsprozesse, z. B. die zerstörungsfreie Produktprüfung (VDI 2016a).

Neben den aktuellen Herausforderungen – die Prozessautomatisierung der AF und die problemlose Kombinierbarkeit mit anderen Prozessen – könnte zukünftig die Industrie 4.0 eine immer größere Rolle spielen. Die Gestaltungsfreiheit bei den Automatisierungsprozessen im Bereich der AF bietet einen großen Handlungsspielraum, um die Technologie bestmöglich an die zukünftigen „Smart Factories“ anzupassen. In diesen Fabriken der Zukunft werden Maschinen, Betriebsmittel und Lagersysteme miteinander Informationen austauschen und sind als cyber-physische Systeme global vernetzt. Bestenfalls könnte die AF vertikal mit betriebswirtschaftlichen Prozessen vernetzt und horizontal zu verteilen, in Echtzeit steuerbaren,

Produktionsketten verknüpft werden.

Hierbei ist die Kommunikation in den cyber-physischen Systemen eine der größten Herausforderungen, um sich aus der Ära der Mechatronik heraus der Industrie 4.0 anzunähern. Neben der stark zunehmenden Komplexität der zukünftigen digitalisierten und vernetzten Produktionssysteme, in denen die AF eine wichtige Rolle spielen wird, sind die Informationssicherheit, die Verfügbarkeit und Stabilität von Kommunikationswegen und Daten sowie die Koexistenz und Interoperabilität weitere Herausforderungen. Hierzu gehört auch die Entwicklung neuer Tools für die Produktionssteuerung in Echtzeit auf deren Basis sich die Produktion zukünftig auf adaptive Randbedingungen quasi-automatisch anpassen und optimieren lässt.

### Handlungsempfehlungen

- Vollständige Automatisierung der Prozessketten der additiven Fertigung, um die Verfahren im Rahmen einer automatisierten Serienproduktion einsetzen zu können (z. B. Anpassung von Planungs- und Ausführungssystemen, kontinuierliche Datenzuführung, Bestückung des Druckers mit Druckmaterial, Entnahme der Druckobjekte).
- Weiterentwicklung und Anpassung von Qualitätssicherungstools (z. B. zerstörungsfreie Prüfverfahren auf Basis von Ultraschall und 3D-Monitoring).
- Automatisierter Abgleich von virtuell geplanten und realen Produktionsprozessen, um z. B. die Systeme bei Abweichungen entsprechend automatisch anpassen zu können.
- Entwicklung von Kommunikationsstandards und -tools für die Integration der additiven Fertigung in weitere Produktionsprozesse und Smart Factories.

## 5.3 Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz

Durch die Möglichkeiten des Production on Demand<sup>9</sup> und

<sup>9</sup> Mit Hilfe der additiven Fertigung können Bauteile je nach Bedarfslage hergestellt werden.

Production on Site<sup>10</sup> können durch die additive Fertigung Lagerkosten eingespart, Überproduktion vermieden und Transportwege sowie -zeiten verringert werden.

Eine generelle Aussage, ob additive Verfahren grundsätzlich ökologischer sind als generative Verfahren ist bisher nicht möglich und muss im Einzelfall – abhängig von Verfahren und Anwendung – geprüft werden. Allerdings wird den additiven Verfahren ein großes Einsparpotenzial nachgesagt, u. a., weil mit ihrer Hilfe komplexe Strukturen und somit neue Leichtbaukonzepte umgesetzt werden können. Zudem wird davon ausgegangen, dass für die Bauteilherstellung bei additiven Fertigungsmethoden weniger Material eingesetzt werden muss als bei subtraktiven Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen, Bohren, etc.). Allerdings werden hier zwei wichtige Faktoren vernachlässigt. Bei vielen additiven Verfahren kommen Stützstrukturen zum Einsatz, die oftmals nicht recycelt werden. Zudem können die eingesetzten Druckmaterialien durch den Druckprozess (Hitze, Licht) degradieren, so dass mit einem Materialverlust von 30 % (PBF-Verfahren) bis 45 % (PP-Verfahren) gerechnet werden muss (Bechthold et al. 2015). Aktuelle Studien zeigen jedoch, dass der maßgebende Faktor im Bereich der Ökobilanz das Nutzungsprofil der Maschinen ist, wobei eine hohe Auslastung der 3D-Drucker deren Ökobilanz<sup>11</sup> erheblich verbessert. Somit sind Sharing-Konzepte von Maschinen eine wichtige Strategie, um die additive Fertigung nachhaltig und ressourcenschonend zu gestalten. Dies setzt eine smarte Vernetzung von AF-Maschinen an unterschiedlichen Standorten und ein sich anpassendes Logistikkonzept voraus – eine Herausforderung für die Zukunft.

Gesellschaftliche Faktoren sind eine weitere wichtige Kategorie, die bei der Betrachtung der Umwelteinwirkungen berücksichtigt werden müssen. Durch die Einführung

der additiven Fertigung als Desktop-Methode könnten aufgrund von geänderten gesellschaftlichen Verbrauchsmustern mehr Ressourcen beansprucht werden (vergl. Desktop-Papierdrucker). Diese sogenannten Rebound-Effekte sind bisher für den Bereich der additiven Fertigung weitgehend unerforscht.

#### Handlungsempfehlungen

- Entwicklung von Konzepten und Technologien zur Vernetzung von 3D-Druckern, um diese über einen Unternehmensstandort hinaus bestmöglich auslasten zu können.
- Entwicklung und Anpassung von Logistikkonzepten und Technologien, die Sharing-Konzepte von 3D-Druckern in Echtzeit unterstützen.
- Untersuchung möglicher Rebound-Effekte und der Ökobilanzen bezüglich der eingesetzten Technologien und Verfahren sowie der Anwendungsbereiche.

#### 5.4 Innovative Materialien und Werkstoffe

Neben den IKT-spezifischen Perspektiven bleiben neue Materialien und Werkstoffe ein entscheidender Treiber für die zukünftige Etablierung der additiven Fertigung. Hierzu gehören insbesondere Pulver für PBF-Verfahren, Filamente und Pellets für EB-Verfahren sowie Photopolymere & Wachse für Druckverfahren, die mit flüssigen Materialien arbeiten (z.B. PP-Verfahren oder MJ-Verfahren). Eine Sonderstellung nehmen zudem Verbundmaterialien (z. B. faserverstärkte Pulver oder Filamente), Biomaterialien und biologische Materialien (Gewebe, Zellen, Proteine, etc.) ein, die bisher nur vereinzelt auf dem Markt angeboten werden oder noch nicht bis zur Marktreife entwickelt wurden.

Zudem fehlen Grenzwerte für Pulvereigenschaften, um z. B. ein Pulver als geeignet oder ungeeignet für PBF-Verfahren spezifizieren zu können. So werden aktuell auch ungeeignete Pulver durch geschicktes Justieren der Prozessparameter für die Verfahren geeignet gemacht. Auch das Alterungsverhalten von Pulvern und Photopolymeren,

<sup>10</sup> Mit Hilfe der additiven Fertigung können Bauteile in der Nähe des Einsatzortes hergestellt werden.

<sup>11</sup> Im Rahmen einer Ökobilanz werden alle Umweltwirkungen eines Produkts zusammengefasst, die es während seines Lebensweges verursacht.

z. B. durch Lagerung oder den Druckprozess (Temperatur oder Licht), ist noch weitgehend ungeklärt (VDI 2016a). Diese Wissenslücken sind ein wesentlicher Faktor, der die Prozessabfälle bei der additiven Fertigung mitbestimmt. Aus Angst vor Qualitätseinbußen werden Materialien auf Basis von subjektiver Bewertung oftmals als ungeeignet für den Druckprozess bewertet und entsorgt oder für andere Prozesse, z. B. den Spritzguss „downgecycelt“.

Während die Vielfalt und das Wissen um Materialien und Werkstoffe als Innovationstreiber betrachtet werden kann, ist die Preisentwicklung der am Markt erhältlichen AF-Materialien ein wesentliches Hemmnis, das der Verbreitung der industriellen additiven Fertigung entgegenwirkt. So sind die Preise für industrielle AF-Thermoplasten und -Photopolymere mit 175 bis 250 US-Dollar pro Kilogramm um ein vielfaches höher als gängige Kunststoffe für den Spritzguss, die ab 2 bis 3 US-Dollar pro Kilogramm

erhältlich sind (Wohlers 2015). Filamente für EB-Verfahren, die im Desktopbereich eingesetzt werden, sind bereits ab 30 Euro pro Kilogramm erhältlich. Der hohe Preis kann u. a. auf einen geringen Wettbewerb sowie auf geringe Absatzchargen zurückgeführt werden.

#### Handlungsempfehlungen

- Entwicklung neuer Materialien.
- Optimierung etablierter Materialien.
- Einen Schwerpunkt sollten Verbundmaterialien, Biomaterialien und biologische Materialien darstellen.
- Untersuchung von Alterungsverhalten und Festlegung von spezifischen Pulvereigenschaften für die additive Fertigung.
- Entwicklung von Konzepten zum Materialrecycling und zur Energieeinsparung durch IKT-gestützte Analyse und Bewertungssysteme.



# Literatur

- additively.com (2016). Übersicht über 3D-Druck-Technologien. (<https://www.additively.com/de/lernen/3d-printing-technologies>; aufgerufen am 06.04.2016)
- Astor, M.; Glöckner, U.; Klose, G.; Plume, A.-M.; Schneidenbach, T.; Lukas v., U.; Bechthold, I.; Ruth, T.; Jarowinsky, M.; Bartels, H.-J. (2013). Abschlussbericht: Marktperspektiven von 3D in industriellen Anwendungen. ([https://www.igd.fraunhofer.de/sites/default/files/3D\\_Markte\\_Prognos\\_IGD\\_MC.pdf](https://www.igd.fraunhofer.de/sites/default/files/3D_Markte_Prognos_IGD_MC.pdf) ; zuletzt zugegriffen am 08.04.2016).
- ASTM – ASTM International (Hrsg.) (2012). ASTM F2792 – 12: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, Pennsylvania, USA (<http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>; aufgerufen am 11.11.2014).
- Bechthold, L.; Fischer, V.; Hainzmaier, A.; Hugenroth, D.; Ivanovam, L.; Kroth, K.; Römer, B.; Sikorska, E.; Sitzmann, V. (2015). 3D Printing. A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential. ([http://www.e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien\\_2015/StuDIS\\_17\\_2015.pdf](http://www.e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien_2015/StuDIS_17_2015.pdf); aufgerufen am 06.04.2016)
- EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (Hrsg.) (2015). Additive Fertigung („3D-Druck“). ([http://www.e-fi.de/fileadmin/Inhaltskapitel\\_2015/2015\\_B4.pdf](http://www.e-fi.de/fileadmin/Inhaltskapitel_2015/2015_B4.pdf); aufgerufen am 06.04.2016).
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2015): Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. 2. ed. New York, NY: Springer.
- PWC – PricewaterhouseCoopers (Hrsg.) (2015). Technologyforecast. The future of 3-D printing. Moving beyond prototyping to finished products. ([www.pwc.com/en\\_US/us/technology-forecast/2014/3d-printing/features/assets/pwc-3d-printing-full-series.pdf](http://www.pwc.com/en_US/us/technology-forecast/2014/3d-printing/features/assets/pwc-3d-printing-full-series.pdf); aufgerufen am 09.09.2015).
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) (2014). Statusreport: Additive Fertigungsverfahren. Düsseldorf. ([www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/gpl\\_dateien/VDI\\_Statusreport\\_AM\\_2014\\_WEB.pdf](http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/VDI_Statusreport_AM_2014_WEB.pdf); aufgerufen am 11.11.2014).
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) (2016a). Handlungsfelder: Additive Fertigungsverfahren ([www.vdi.de/HandlungsfelderAM](http://www.vdi.de/HandlungsfelderAM)).
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) (2016b). Rechtliche Aspekte der additiven Fertigungsverfahren ([www.vdi.de/HandlungsfelderAM](http://www.vdi.de/HandlungsfelderAM)).
- VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.) (2015). Wertschöpfungskette des Additive Manufacturing. ([am.vdma.org](http://am.vdma.org); zugegriffen am 09.09.2015).
- Wohlers (Hrsg.) (2015). Wohlers Report 2015. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Colorado, CO; Wohlers Associates, Inc.

# 7 Anhang

## 7.1 Standards und Normen

Die internationale Normung im Bereich der additiven Fertigung findet im Technischen Komitee 261 „Additive Manufacturing“ der internationalen Normungsorganisation (ISO) statt.

Die Gründung erfolgte im Februar 2011 auf den Antrag des kurz zuvor neu gegründeten nationalen Gremiums im DIN, dem Arbeitsausschuss NA 145-04-01 AA „Grundlagen und Prüfverfahren“ im Fachbereich „Additive Fertigung“. Das deutsche Gremium beschloss, die Thematik der additiven Fertigungsverfahren international voranzutreiben.

Innerhalb des deutschen Normungsgremiums haben sich Hersteller von Maschinen für die additive Fertigung, Vertreter aus Forschung und Wissenschaft sowie Anwender z. B. aus dem Automobil- und Flugzeugbau zur Erarbeitung der Grundlagen der additiven Fertigung zusammengeschlossen. Der Arbeitsausschuss NA 145-04-01 AA „Grundlagen und Prüfverfahren“ hat die Aufgabe, Normungsarbeiten zur Festlegung von Grundlagen und Prüfverfahren additiver Fertigungsverfahren durchzuführen. Der Arbeitsausschuss ist das deutsche Spiegelgremium zum neugegründeten ISO/TC 261 „Additive Manufacturing“ und den zugehörigen vier Working Groups.

Die Bewerbung des deutschen Gremiums um das ISO/TC 261-Sekretariat war erfolgreich, so dass sowohl das Sekretariat des TC 261 „Additive Manufacturing“ als auch das der Arbeitsgruppe WG 2 „Methods, processes and materials“ im TC 261 von Deutschland geführt wird.

Die Übernahme des ISO/TC-Sekretariates für additive Fertigungsverfahren durch das DIN sollte dabei die Absicht und die Möglichkeiten unterstreichen, von deutscher Seite aus in diesem Bereich international führend tätig zu werden.

Auf Basis der VDI-Richtlinien 3404/3405 wurde im Laufe der letzten Jahre mit der ISO 17296 „Additive Manufacturing“

die erste ISO-Normenreihe zum Thema „Additive Fertigung“ erarbeitet. Sie besteht aus vier Teilen, die jeweils in einer separaten Working Group erarbeitet wurden:

- **ISO/TC 261/WG 1 Terminology** (Sekretariat: SIS, Schweden): ISO 17296-1, Additive manufacturing – General principles – Part 1: Terminology
  - **ISO/TC 261/WG 2 Methods, processes and materials** (Sekretariat: DIN, Deutschland): ISO 17296-2: Additive manufacturing – General principles – Part 2: Overview of process categories and feedstock
  - **ISO/TC 261/WG 3 Test methods** (Sekretariat: AFNOR, Frankreich): ISO 17296-3: Additive manufacturing – General principles – Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
  - **ISO/TC 261/WG 4 Data processing** (Sekretariat: BSI, Großbritannien): ISO 17296-4: Additive manufacturing – General principles – Part 4: Overview of data processing
- ISO 17296 Teile 3 und 4 wurden im Herbst 2014 und Teil 2 im Januar 2015 veröffentlicht, die Veröffentlichung von Teil 1 ist für den Sommer 2015 geplant.

Nachdem sich die ISO mit dem Committee F 42 „Additive manufacturing technology“ der ASTM (USA) auf eine Zusammenarbeit geeinigt hatte, erfolgte die Übernahme der beiden ASTM Standards:

- ASTM F 2921, Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies (ISO/ASTM 52921:2013-06) und
- ASTM F 2915, Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) (ISO/ASTM 52915:2013-06)

als ISO/ASTM Standards mittels Fasttrack-Verfahren. Auch die Übernahme von ASTM F 2915 „Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2“ wurde begonnen.

Eine solch enge Zusammenarbeit der Normungsorganisationen ISO und ASTM stellt ein Novum dar. Nachdem 2013 eine gemeinsame Strategie für die Zusammenarbeit von ASTM F 42 und ISO/TC 261 erarbeitet werden

konnte, wurden gemeinsame Arbeitsgruppen (Joint Groups) gegründet, die mit der Erarbeitung der am höchsten priorisierten Normungsprojekte begonnen haben, unter paritätischer Besetzung von ISO- und ASTM-Experten. Im Rahmen der gegründeten Arbeitsgruppen werden folgende Themen bearbeitet: "Terminology", "Standard test artifacts", "Requirements for purchased AM parts", "Design guidelines", "Standard Specification for Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials", "Standard Practice for Metal Powder Bed Fusion to Meet Rigid Quality Requirements", "Specific design guidelines on powder bed fusion" und "Qualification, quality assurance and post processing of powder bed fusion metallic parts NDT for AM parts".

Der inhaltliche Input von deutscher Seite geht zu einem Großteil aus dem VDI-Fachausschuss „Additive Manufacturing“ hervor. Der Fachausschuss betreut auch die VDI-Richtlinien VDI 3404/3405 zur Additiven Fertigung, deren Inhalt sich zu großen Teilen in der ISO/ASTM 52792 zur Terminologie sowie in der oben genannten ISO-Reihe ISO 17296-2 bis -4 wiederfindet.

Die VDI-Gremien führen regelmäßig Ringversuche<sup>1</sup>, z. B. zur Ermittlung von Materialkennwerten, durch, um den Stand der Technik festzulegen, der dann über VDI-Richtlinien und die nationalen DIN-Arbeitsausschüsse in die internationale Normung überführt wird. Dies spiegelt sich auch im Mitarbeiterkreis der DIN- und ISO-Gremien wider, die sich von deutscher Seite hauptsächlich aus Experten des VDI-Fachausschusses zusammensetzen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die deutsche Sicht auf das Gebiet der „Additiven Fertigung“

<sup>1</sup> Ringversuch (eng.: Round Robin Test): Ein Ringversuch ist eine Methode der Qualitätssicherung für Messverfahren sowie Mess- und Prüflaboratorien. Identische Proben werden mit identischen und/oder unterschiedlichen Verfahren in verschiedenen Laboratorien untersucht. Aus dem Vergleich der Ergebnisse können Aussagen über die Messgenauigkeit gemacht und z.B. Materialkennwerte ermittelt werden. Auch Vorschriften für Messverfahren werden durch Ringversuche überprüft.

und die deutschen Interessen in diesem Bereich umfassend in den internationalen Gremien vertreten sind und die beteiligten Experten aus Industrie und Wissenschaft sich sehr aktiv einbringen.

#### Weiterführende Quellen:

- Jahresberichte des Normenausschusses Werkstofftechnologie (NWT) im DIN<sup>2</sup>
- VDI Statusreport „Additive Fertigungsverfahren“, September 2014<sup>3</sup>, Aktualisierung in der ersten Jahreshälfte 2016 erwartet ([www.vdi.de/HandlungsfelderAM](http://www.vdi.de/HandlungsfelderAM))

## 7.2 Übersicht: Nationale Forschungs- und Entwicklungsprojekte

Im Folgenden findet sich eine Übersicht über abgeschlossene und laufende Förderprojekte auf nationaler und europäischer Ebene, die in die Analyse von Kapitel 4 eingeflossen sind<sup>4</sup>. Die Auflistung beinhaltet keinen Anspruch auf Vollständigkeit, und es wurden hier nur Projekte aufgenommen, die einen Bezug zu den vier wichtigsten Handlungsfeldern aufzeigen, die in Kapitel 5 diskutiert wurden: Modellierungswerkzeuge, Smart Productions Services und Prozessintegration, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sowie Materialien und Werkstoffe.

<sup>2</sup> <http://www.nwt.din.de/cmd?level=tpl-artikel&menuid=46711&cmsareaid=46711&cmsruid=46739&menurubricid=46739&cmstextid=74924&bcrumblevel=1&languageid=de>

<sup>3</sup> <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produktion-und-logistik/fachbereiche/produktionstechnik-und-fertigungsverfahren/fa105-fachausschuss-additive-manufacturing/statusreport-additive-fertigungsverfahren/>

<sup>4</sup> Für die Analyse wurde mit den Begriffen „3D-Print“, „3d druck“, „3d-druck“, „additive manufacturing“ und „additive fertigung“ in den folgenden Datenbanken nach Förderprojekten recherchiert: Umweltforschungsdatenbank des UBA - UFORDAT (<http://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/information-als-instrument/umweltforschungsdatenbank-ufordat/>); DFG - GePris (<http://gepris.dfg.de/>); Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/>); Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Europäischen Kommission - CORDIS (<http://cordis.europa.eu/>). Einbezogen wurden Projekte aus den beiden Rahmenprogrammen FP7 und Horizon 2020 (Abfragedatum: 16.02.2016).

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
<b>3D-PolySPRINT: Lichtbasierte Verarbeitung von heterogenen Polymerverbänden zur schnellen, additiven Fertigung von Funktionselementen für hörakustische Schallwandler</b> <a href="http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/20_Photonische%20Prozessketten/3D-PolySPRINT_Projektsteckbrief_Prozessketten_bf.pdf">http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/20_Photonische%20Prozessketten/3D-PolySPRINT_Projektsteckbrief_Prozessketten_bf.pdf</a>				
<b>3D-Pulverdruck von Calciumphosphat-Keramiken mit orts aufgelöster Einstellung von Struktur und Zusammensetzung</b> <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/55396052">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/55396052</a>				
<b>3DAMEEA - Additive 3D-Fertigung von elektrischen Anwendungen</b> <a href="http://www.iwb.tum.de/Additive+3D_Fertigung+von+elektrischen+und+elektronischen+Anwendungen-p-1019488.html">http://www.iwb.tum.de/Additive+3D_Fertigung+von+elektrischen+und+elektronischen+Anwendungen-p-1019488.html</a>				
<b>addef: Additiv gefertigte Hochleistungskomponenten aus Titanlegierungen und Titanaluminid – Prozessbeherrschung, Charakterisierung, Simulation</b>				
<b>Additive Fertigung dreidimensionaler Bauteiloberflächen</b> <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/278735550">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/278735550</a>				
<b>Additive Fertigung einkristalliner Superlegierungen (B02)</b> <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/211501246">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/211501246</a>				
<b>Additive Fertigung frei geformter, bewehrter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen</b> <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/257344691">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/257344691</a>				
<b>Additive Manufacturing basierend auf Ultraschall Polymer Schmelzen: Prozess Erforschung und Technologie Entwicklung</b>				
<b>Analyse und Bewertung der Wirkungen von gesellschafts- und umweltpolitischen Themen auf die Umweltpolitik mit Hilfe der Methode der Trendanalyse</b>				
<b>AutoAdd Integration generativer Fertigungsverfahren in die Automobilserienfertigung</b> <a href="http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/AutoAdd/index.html">http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/AutoAdd/index.html</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
BioFabNet: Kampagne zur Anwendung biobasierter Kunststoffe im 3D-Druck als Fallbeispiel für eine Bioökonomie von Morgen <a href="https://www.biofabnet.de/">https://www.biofabnet.de/</a>				
CALM (CFK ALM Verbindungselement) – Additive Fertigung und Verbindungstechnologien				
Dreidimensionale additive Herstellung von lichtleitenden Strukturen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/257258383">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/257258383</a>				
Einbettende Stereolithographie - Prozessentwicklung zur Integration von Funktionselementen in mechatronischen Baugruppen <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/190972254">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/190972254</a>				
Entwicklung und Herstellung optimierter Spulenumwicklungen für die elektromagnetische Umformung unter Einsatz additiver Fertigungsverfahren <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/259797904">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/259797904</a>				
Entwicklung von Verfahren zur Erzeugung von hochpräzisen STL-Dateien für das 3D-Drucken eines Dodekaedersterns				
Forschung und Entwicklung eines Nanostrukturdepositionsverfahrens <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/247352488">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/247352488</a>				
Generativ hergestellte keramische Bauteile mit dreidimensional funktional-gradierten Strukturen <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/114052652">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/114052652</a>				
GenErgie, Steigerung der Energieeffizienz durch Generative Fertigung mittels Selective Laser Melting <a href="https://www.tib.eu/de/suchen/download/?tx_tibsearch_search%5bdocid%5d=TIBKAT%3A824625781&amp;cHash=5d9da70bf06cad90ca616bfc8e1c5f7c#download-mark">https://www.tib.eu/de/suchen/download/?tx_tibsearch_search%5bdocid%5d=TIBKAT%3A824625781&amp;cHash=5d9da70bf06cad90ca616bfc8e1c5f7c#download-mark</a>				
Gerät zur additiven Fertigung im Pulverbett mit Elektronenstrahl <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/246541036">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/246541036</a>				
Green Factory Bavaria, Ressourceneffiziente pulver- und strahlbasierte additive Serienfertigung <a href="http://www.greenfactorybavaria.net/">http://www.greenfactorybavaria.net/</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
Herstellung dreidimensionaler Funktionsbauteile aus Hochleistungskeramik mittels direktem Tintenstrahldruck-Verfahren <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/52977705">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/52977705</a>				
Herstellung seriennaher Bauteile mittels dreidimensionalem Druckverfahren <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/163148346">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/163148346</a>				
High-Order Immersed-Boundary-Methoden in der Festkörpermechanik für generativ gefertigte Strukturen <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/255496529">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/255496529</a>				
In-situ formation and additive manufacturing of nano particulate reinforced metal matrix composites by aser metal deposition <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/229707301">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/229707301</a>				
Integrative Produktionstechnik für energieeffiziente Turbomaschinen TurPro <a href="http://www.turpro.de/de/index">http://www.turpro.de/de/index</a>				
Kombinationsmaschine zum Laserauftragschweißen von Pulver in einer 5-Achs-Fräsmaschine <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/279885319">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/279885319</a>				
MAC4U, Mass Customization für individualisierte Produkterweiterungen <a href="http://www.mac4u-projekt.de/">http://www.mac4u-projekt.de/</a>				
PROPRINT: Herstellung serienidentischer Prototypen mittels 3D-Drucktechnologie <a href="http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=539">http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=539</a>				
RADIKAL, Ressourcenschonende Werkstoffsubstitution durch additive & intelligente FeAl- Werkstoff-Konzepte für angepassten Leicht- und Funktionsbau <a href="http://www.matresource.de/projekte/radikal/">http://www.matresource.de/projekte/radikal/</a>				
Rapid Prototyping von mikrotechnischen Bauteilen aus Keramik und Metall mittels Powder Fused Deposition Modeling <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/283446569">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/283446569</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
Robocasting makrozellulare keramische 3D-Gitterstrukturen mit Hohlfilamenten <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/231507867">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/231507867</a>				
Robotergestütztes 3D-Laserbearbeitungszentrum <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/163724033">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/163724033</a>				
PriMa3D, Siebgedruckte Komponenten für elektrische Antriebe <a href="http://www.oeffizienzfabrik.de/de/projekte/elektrische-antriebe-detail/prima3d/737/">http://www.oeffizienzfabrik.de/de/projekte/elektrische-antriebe-detail/prima3d/737/</a>				
Verdampfungsphänomene beim selektiven Elektronenstrahlschmelzen und deren Einfluss auf die Materialkonsolidierung <a href="http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/187191007">http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/187191007</a>				

### 7.3 Übersicht: Europäische Forschungs- und Entwicklungsprojekte

Erläuterung siehe Kapitel 7.2, S.27.

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
AEROBEAM, Direct Manufacturing of stator vanes through electron beam melting <a href="http://ceit.es/en/areas-of-r-a-d/materials/consolidation-of-metallic-and-ceramic-powders/aerobeam-direct-manufacturing-of-stator-vanes-through-electron-beam-melting">http://ceit.es/en/areas-of-r-a-d/materials/consolidation-of-metallic-and-ceramic-powders/aerobeam-direct-manufacturing-of-stator-vanes-through-electron-beam-melting</a>				
AMAZE, Additive Manufacturing Aiming Towards Zero Waste & Efficient Production of High-Tech Metal Products <a href="http://www.amaze-project.eu/">http://www.amaze-project.eu/</a>				
AMCOR, Additive Manufacturing for Wear and Corrosion Applications <a href="http://www.amcor-project.eu/">http://www.amcor-project.eu/</a>				
APPROAcH, Antimicrobial and Save 3D-Printable Polymers for Oral Health <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198670_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198670_en.html</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
BIO-SCAFFOLDS, Natural inorganic polymers and smart functionalized micro-units applied in customized rapid prototyping of bioactive scaffolds <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/108698_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/108698_en.html</a>				
BOREALIS, the 3A energy class Flexible Machine for the new Additive and Subtractive Manufacturing on next generation of complex 3D metal parts. <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/108698_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/108698_en.html</a>				
CASSAMOBILE, Flexible Mini-Factory for local and customized production in a container <a href="http://www.cassamobile.eu/">http://www.cassamobile.eu/</a>				
CAXMan, Computer Aided Technologies for Additive Manufacturing <a href="https://www.igd.fraunhofer.de/Institut/Abteilungen/IET/Projekte/CAX-MAN-Computer-Aided-Technologies-Additive-Manufacturing">https://www.igd.fraunhofer.de/Institut/Abteilungen/IET/Projekte/CAX-MAN-Computer-Aided-Technologies-Additive-Manufacturing</a>				
CerAMufacturing, Development of ceramic and multi material components by additive manufacturing methods for personalized medical products <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198348_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198348_en.html</a>				
CopyMe3D: High-Resolution 3D Copying and Printing of Objects <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/191998_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/191998_en.html</a>				
DiDIY: Digital Do It Yourself <a href="http://www.didiy.eu/">http://www.didiy.eu/</a>				
DIGHIRO, Digital Generation of High Resolution Objects <a href="http://www.2020-horizon.com/DIGHIRO-Digital-Generation-of-High-Resolution-Objects%28DIGHIRO%29-s8764.html">http://www.2020-horizon.com/DIGHIRO-Digital-Generation-of-High-Resolution-Objects%28DIGHIRO%29-s8764.html</a>				
DIMAP, Novel nanoparticle enhanced Digital Materials for 3D Printing and their application shown for the robotic and electronic industry <a href="http://www.profactor.at/index.php?id=943">http://www.profactor.at/index.php?id=943</a>				
DLCHHB, Artificial Tissue Actuators by the 3D Printing of Responsive Hydrogels <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/195483_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/195483_en.html</a>				
EBMPerform, High-quality, high-speed EBM 3D printing by the integration of high-performance electron sources <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/196409_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/196409_en.html</a>				



Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
Efficient Cooking, Sustainable and efficient food processing and cooking system <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/196527_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/196527_en.html</a>				
FABulous, Future Internet Web-Entrepreneurship for 3D Printing Virtual Fabrication in Europe <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/192131_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/192131_en.html</a>				
Factory-in-a-day, Reduce system integration time to one day <a href="http://www.factory-in-a-day.eu/">http://www.factory-in-a-day.eu/</a>				
FAST, Functionally graded Additive Manufacturing scaffolds by hybrid manufacturing <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198809_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198809_en.html</a>				
FASTEEM, High Productivity Electron Beam Melting Additive Manufacturing Development for the Part Production Systems Market <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/100826_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/100826_en.html</a>				
FLOWMAT, Exploiting Flow and Capillarity in Materials Assembly: Continuum Modelling and Simulation <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/109735_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/109735_en.html</a>				
HI-MICRO, High Precision Micro Production Technologies <a href="https://www.hi-micro.eu/">https://www.hi-micro.eu/</a>				
HIRESEBM, High resolution electron beam melting <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/100645_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/100645_en.html</a>				
IC2, Intelligent and Customized Tooling <a href="http://www.ic2-eu.org/">http://www.ic2-eu.org/</a>				
IMPRESS, New Easy to Install and Manufacture PRE-Fabricated Modules Supported by a BIM based Integrated Design ProceSS <a href="http://www.project-impres.eu/">http://www.project-impres.eu/</a>				
INTERAQCT, International Network for the Training of Early stage Researchers on Advanced Quality control by Computed Tomography <a href="https://www.interaqct.eu/">https://www.interaqct.eu/</a>				
LESA, Laser bonding of linear edged super-abrasive blades <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/197560_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/197560_en.html</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
M&M'S, New Paradigms for MEMS & NEMS Integration <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/100236_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/100236_en.html</a>				
M&M'S+, 3D Printer for Silicon MEMS & NEMS <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/107465_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/107465_en.html</a>				
M3M, Mobile 3D Modeling <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198671_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198671_en.html</a>				
ManSYS, MANufacturing decision and supply chain management SYStem for additive manufacturing <a href="http://www.mansys.info/">http://www.mansys.info/</a>				
MERLIN, Development of Aero Engine Component Manufacture using Laser Additive Manufacturing <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/97209_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/97209_en.html</a>				
NANOMASTER, Graphene based thermoplastic masterbatches for conventional and additive manufacturing processes <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/101393_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/101393_en.html</a>				
NANOTUN3D, Development of the complete workflow for producing and using a novel nano-modified Ti-based alloy for additive manufacturing in special applications. <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198813_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198813_en.html</a>				
NEXT-3D, Next generation of 3D multifunctional materials and coatings for biomedical applications <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/194379_de.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/194379_de.html</a>				
OPTICIAN2020, Flexible and on-demand manufacturing of customised spectacles by close-to-optician production clusters <a href="http://www.optician2020.eu">http://www.optician2020.eu</a>				
Ownership, Digital Rights Management Infrastructure For 3D Printed Artifacts <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/194737_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/194737_en.html</a>				
OXIGEN, Oxide Dispersion Strengthened Materials for the Additive Manufacture of High Temperature Components in Power Generation <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/106325_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/106325_en.html</a>				
PHOCAM, Photopolymer based customized additive manufacturing technologies <a href="http://www.phocam.eu/doku.php">http://www.phocam.eu/doku.php</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
PICSIMA, Next generation 3D print technology (PICSIMA), which for the first time enables the direct full colour printing of silicone to make soft tissue prostheses, orthoses and removable partial dentures. <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/197141_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/197141_en.html</a>				
PILOTMANU, Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials <a href="http://www.pilotmanu.eu/">http://www.pilotmanu.eu/</a>				
PRINTCR3DIT, Process Intensification through Adaptable Catalytic Reactors made by 3D Printing <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198358_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198358_en.html</a>				
RRD4E2, Rational Reactor Design for Enhanced Efficiency in the European Speciality Chemicals Industry <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/109277_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/109277_en.html</a>				
Scan4Reco, Multimodal Scanning of Cultural Heritage Assets for their multilayered digitization and preventive conservation via spatiotemporal 4D Reconstruction and 3D Printing <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/197123_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/197123_en.html</a>				
ShapeForge: By-Example Synthesis for Fabrication <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/104922_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/104922_en.html</a>				
SIMCHAIN, Development of physically based simulation chain for microstructure evolution and resulting mechanical properties focused on additive manufacturing processes <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/111099_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/111099_en.html</a>				
SMARTLAM, Smart production of Microsystems based on laminated polymer films <a href="http://www.smartlam.eu/">http://www.smartlam.eu/</a>				
SPHERESCAFF, The Manufacturing of Scaffolds from Novel Coated Microspheres via Additive Manufacturing Techniques for Temporomandibular Joint Tissue Engineering <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/189885_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/189885_en.html</a>				
ToMax, Toolless Manufacturing of Complex Structures <a href="http://www.tomax-h2020.eu/">http://www.tomax-h2020.eu/</a>				

Projekt	Modellierungs- werkzeuge	Smart Production Services	Nachhaltig- keit	Materialien und Werk- stoffe
<b>ULTRASUPERTAPE, ULTRAfast growth of ultrahigh performance SUPERconducting TAPES</b> <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/197529_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/197529_en.html</a>				
<b>VESCEL, Vascular Engineering on chip using differentiated Stem Cells</b> <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/198695_en.html">http://cordis.europa.eu/project/rcn/198695_en.html</a>				
<b>VINDOBONA, VINyl photopolymer Development Of BONE replacement Alternatives</b> <a href="http://cordis.europa.eu/project/rcn/103347_en.html">cordis.europa.eu/project/rcn/103347_en.html</a>				
<b>Volumental: The Cloud-Delivered 3D Scanning Service Supporting A Future Of Mass Customization</b> <a href="https://ec.europa.eu/easme/en/sme/5893/volumental-cloud-delivered-3d-scanning-service-supporting-future-mass-customization">https://ec.europa.eu/easme/en/sme/5893/volumental-cloud-delivered-3d-scanning-service-supporting-future-mass-customization</a>				







