Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

Dezember 2016
Stellungnahme

Additive Fertigung

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

Herausgeber
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle: Karolinenplatz 4, 80333 München

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz

Redaktion
Dr. Martina Kohlhuber, acatech
Martin Kage, Universität Paderborn
Michael Karg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Gestaltung und Satz
unicommunication.de, Berlin

Druck
Komplan Biechteler GmbH & Co KG

1. Auflage

ISBN: 978-3-8047-3676-4

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zitiervorschlag:
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.) (2016): Additive Fertigung. München, 64 Seiten.

Additive Fertigung

Vorwort

Unter Additiver Fertigung versteht man die Produktion von Bauteilen durch den schichtweisen Auftrag von Material aus formlosem Rohstoff, zum Beispiel Metallpulver. Objekte mit sehr variablen Formen können so quasi „gedruckt“ werden. Die noch junge Branche der Herstellung und Nutzung entsprechender Geräte und Rohstoffe verzeichnet bereits hohe Wachstumsraten, auch wenn sich die Technologien immer noch in der Entwicklung befinden. Entsprechend sind die Erwartungen vor allem an die industrielle Anwendung der Additiven Fertigung groß und erscheinen mitunter überzogen.

Um einen Überblick über das sehr breite und vielfältige Forschungsfeld Additive Fertigung zu gewinnen und davon ausgehend Empfehlungen für dessen weitere Entwicklung zu formulieren, haben die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften zwei Arbeitsgruppen gebildet. Unter dem gemeinsamen thematischen Dach „Additive Fertigung“ widmen sich die beiden Gruppen den Chancen und Herausforderungen dieser neuen Technologie unter verschiedenen Gesichtspunkten.

Die vorliegende, erste Stellungnahme „Additive Fertigung“ wurde unter Federführung von acatech erstellt und behandelt die Schwerpunkte industrielle Produktion, Wertschöpfungsnetze und Geschäftsmodelle. Sie geht sowohl auf den Status quo als auch auf die erwarteten Entwicklungen ein: Welche Rolle werden additive Fertigungsverfahren in der digitalen, vernetzten Industrieproduktion der Zukunft spielen? Revolutioniert die Technologie die industrielle Produktion? Wie wirkt sich Additive Fertigung auf die Wertschöpfung aus? Welche Handlungsoptionen lassen sich daraus für Politik Wirtschaft und Wissenschaft ableiten?

Die Arbeitsgruppe unter Federführung der Leopoldina konzentriert sich auf die besonderen Anforderungen, welche die Weiterentwicklung Additiver Fertigungsverfahren an die Grundlagenforschung verschiedener Fachgebiete stellt. Darüber hinaus wird sie sich intensiv mit zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten der Additiven Fertigung im Feld von z.B. Medizin, Ernährung, Bauwesen befassen und dabei gesellschaftlich relevante Fragestellungen bezüglich Arbeitswelt, Sicherheit und Recht in den Fokus ihrer Stellungnahme nehmen.

Beide Arbeitsgruppen stehen in engem inhaltlichem Austausch miteinander und verstehen ihre Stellungnahmen als zwei Seiten ein und derselben Medaille. Allen Mitwirkenden beider Gruppen sowie den Gutachtern möchten wir hiermit ganz herzlich für ihre Beiträge zur vorliegenden Stellungnahme danken.



Prof. Dr. Jörg Hacker
Präsident
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl
Präsident
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften



Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt
Präsident
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 6

2 Einleitung 9

3 Ausgangssituation 12

3.1 Fertigungstechnologien 12
3.2 Heutige Anwendungsfelder 19
3.3 Rollen in Wertschöpfungsnetzen 21
3.4 Geschäftsmodelle 23
3.5 Erfolgsfaktoren 25

4 Erwartete Entwicklungen 27

4.1 Fertigungstechnologien 27
4.2 Anwendungen und Märkte 30
4.3 Entwicklungsoptionen in Wertschöpfungsnetzen 34
4.4 Geschäftsmodelle 36
4.5 Prognostiziertes Marktwachstum und Förderinitiativen 37

5 Thesen 40

5.1 Rahmenbedingungen 40
5.2 Technologie 42
5.3 Wertschöpfungsnetze 43
5.4 Gesellschaftsrelevante Aspekte 44

6 Handlungsempfehlungen 47

Beteiligte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 51

Literaturverzeichnis 53

Abkürzungsverzeichnis 56

Abbildungsverzeichnis 57

1 Zusammenfassung

Ob Handprothesen, ganze Autos oder sogar Menschen-Klone – was der industrielle 3D-Druck zu fertigen in der Lage sei, bietet Stoff für Wirtschaftsprognosen, Medien und Science Fiction gleichermaßen. Die Grenzen zwischen Vision und Realität sind fließend, die Erwartungen häufig überzogen. Fakt ist: Die Technologien für die sogenannte Additive Fertigung, also den 3D-Druck in der Industrie, stecken zum Teil noch in den Kinderschuhen, doch ihr Reifegrad nimmt stetig zu. Die Vielfalt an möglichen Anwendungen ist groß und die Branche verzeichnet seit Jahren Wachstumsraten von etwa 30 Prozent bei einem weltweiten Umsatz von 4,5 Milliarden Euro im Jahr 2015. In der digitalen, vernetzten Industrieproduktion der Zukunft werden additive Fertigungsverfahren eine wichtige Rolle spielen. Revolutionieren wird die Additive Fertigung die Produktion in absehbarer Zeit jedoch weder technologisch noch mit Blick auf die Wertschöpfung.

Additive Fertigung bezeichnet die Produktion von Bauteilen durch schichtweisen Materialauftrag aus formlosem Rohstoff. So können Objekte mit variablen Formen quasi „gedruckt“ werden. Die Additive Fertigung läuft automatisiert auf Basis von digitalen 3D-Modellen ab und zwar in drei Stufen: der Datenaufbereitung, dem schichtweisen Aufbau des Objekts und der Nachbereitung. Sowohl verschiedene Fügeprinzipien als auch Werkstoffe – Kunststoffe, Metalle oder Verbundwerkstoffe – können zum Einsatz kommen. Denkbar sind viele Kombinationen, je nachdem welche Produkteigenschaften erreicht werden sollen. Zu den kommerziell wichtigsten Verfahren zählen zum Beispiel das Strangablegeverfahren (Fused Deposition Modelling), das sich nach dem Auslaufen des Patents 2009 schnell verbreitete und das Interesse am 3D-Druck beflügelte, oder das Laserstrahlschmelzen. Ob eine Technologie eher für die Heimanwendung, einfache Werkstätten oder die Fabrikhalle geeignet ist, hängt auch von den Anschaffungskosten für die Anlagen ab: Diese reichen von 500 Euro bis zu über 1 Million Euro.

Nachdem ab den 1990er Jahren zunächst Prototypen, vor allem in der Automobilindustrie, und später Gussformen oder Werkzeuge additiv gefertigt wurden, werden inzwischen auch Endprodukte zum Beispiel kleine Bauteile, Kleinserien und Unikate in der Schmuckindustrie oder Medizin und Dentaltechnik hergestellt.

Die additiven Verfahren unterscheiden sich von konventionellen Fertigungstechnologien in vielfacher Hinsicht. Wenn ihre Besonderheiten konsequent genutzt werden, lassen sich enorme Potenziale erschließen. Ihr wichtigster Vorteil ist die hohe Gestaltungsfreiheit: Da das Material Schicht für Schicht bis zum fertigen Objekt aufgetragen wird und keine Gussformen notwendig sind, die selbst zeit- und kostenintensiv hergestellt werden müssen, kann theoretisch jede Form gefertigt werden. Wie groß die Gestaltungsfreiheit tatsächlich ist, hängt vom Verfahren und der Formgestaltung ab. So benötigen manche Technologien zum Beispiel Stützstrukturen, die im Nachhinein wieder entfernt werden müssen. In der Medizin können so auf die individuelle Anatomie der Patienten

maßgeschneiderte Produkte hergestellt werden, beispielsweise Zahnimplantate, Im-Ohr-Hörgeräte oder Hilfsmittel für chirurgische Operationen. In der Produktion von geometrisch komplexen Modellen und Formen wäre die Alternative zur Additiven Fertigung oft die reine Handarbeit. Die höhere Maßgenauigkeit und die kürzere Herstellungsdauer sind auch beim Prototypenbau von Vorteil. Für die Massenproduktion von einfachen Bauteilen mit geringer Wertschöpfung sind additive Fertigungsverfahren jedoch nicht wirtschaftlich genug und daher ungeeignet. Auch das einsatzbereite Produkt, das in einem einzigen Produktionsschritt hergestellt wird, wird wohl noch lange eine Vision bleiben.

Ihr volles Potenzial kann die Additive Fertigung im Kontext Mass Customization ausspielen: Die Technologie erlaubt die vollständige Individualisierung von Produkten. Für die intelligente, vernetzte Produktion in der Industrie 4.0 ist sie deshalb von großer Bedeutung. Der Kunde mit seinen individuellen Anforderungen rückt in den Mittelpunkt der Produktplanung. Mithilfe additiver Fertigungsverfahren können dann Kleinstserien bis hin zur Losgröße 1 ohne größere Kostennachteile hergestellt werden. Ein U.S.-amerikanischer Sportartikelhersteller stellt beispielsweise auf der Basis biomechanischer Messdaten Schuhsohlen her, die dem Laufstil des Läufers angepasst sind. Da der Aufwand für die Nachbereitung des Endprodukts noch relativ hoch ist, stellt die massenhafte Fertigung individualisierter Einzelstücke bisher noch eine Ausnahme dar.

Industrie 4.0 verlangt auch eine Flexibilisierung der Produktion. Additive Fertigung ermöglicht es, Bauteile nah am Ort der Verwendung herzustellen, transportiert werden müsste zunächst allein der Datensatz. Die dezentrale Fertigung ist beispielsweise im Ersatzteilwesen von Bedeutung: Die benötigten Teile können dort gefertigt werden, wo sie ausgetauscht werden müssen. In der Raumfahrt könnten große Bauteile künftig direkt im All produziert werden, anstatt mit Trägerraketen kostenintensiv „angeliefert“ zu werden. Häufig weisen aber die Bauteile noch unterschiedliche Eigenschaften auf, obwohl sie auf Basis derselben Daten gefertigt wurden. Es fehlen robuste Maschinen und Fertigungsprozesse, die reproduzierbaren Output liefern.

Eine wesentliche Entwicklung bei Additiver Fertigung ist die Digitalisierung der Prozesskette; sie fördert neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungen. Online-Plattformen ermöglichen beispielsweise einen Marktplatz für 3D-CAD-Modelle, Werkstoffrezepturen sowie Prozessparameter, welche über einen einmaligen Download bzw. Kauf oder über ein Streaming-Abonnement bezogen werden können, ähnlich wie bei digitalen Musikmedien oder Filmen. Hier gilt es Fragen hinsichtlich der Datensicherheit, Urheberrechten sowie Standardisierung zu klären. Auch die internationale Normung hinkt der Realität hinterher. Die Vielfalt an additiven Fertigungstechnologien ist groß, viele Begriffe sind nicht eindeutig und es gibt unterschiedliche markenrechtlich geschützte Bezeichnungen für teilweise identische Verfahren. Auch die Ressourceneffizienz in der Industrieproduktion der Zukunft kann die Additive Fertigung unterstützen, wenngleich eine ganzheitliche ökonomische, ökologische und soziale Bilanzierung von Additiver Fertigung noch aussteht.

Additive Fertigung wird die industrielle Produktion nicht revolutionieren. Doch vieles deutet darauf hin, dass sie die etablierten Verfahren flächendeckend ergänzen wird. Um das ökonomische und ökologische Potenzial der Technologie für den Standort Deutschland voll ausschöpfen zu können, bedarf es konzertierter Aktionen in den Bereichen Forschung, Umsetzung, Bildung und Förderpolitik:

Forschung

1) Um die Produktivität der Additiven Fertigung zu steigern und die Defizite gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren zu reduzieren, sollten Produktionsprozesse, Werkstoffe und Bauteileigenschaften erforscht werden und entsprechendes Wissen in die Anlagentechnik einfließen.
2) Konkrete, verfahrensübergreifende Gestaltungsrichtlinien sollten systematisch erforscht werden, um die neuen Möglichkeiten der Gestaltungsfreiheit auszunutzen.
3) Neue Datenformate für Additive Fertigung sollten kurzfristig entwickelt werden.
4) Das Veränderungspotenzial und die Auswirkungen Additiver Fertigungsverfahren auf Wertschöpfungsnetze, Wirtschaft und Gesellschaft sollten analysiert werden.

Umsetzung

5) Das Daten-Tripel aus digitalen 3D-Modellen, Werkstoffrezepturen und Prozessparametern ist zu standardisieren.
6) Additive Fertigung benötigt dedizierte Methoden und Verfahren zur Qualitätssicherung.
7) Umsetzung von Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung beschleunigen.
8) Für Additive Fertigung werden Konzeptionen für die Integration in umfassende klassische Produktionssysteme benötigt.
9) Schaffung zukunftsorientierter Entscheidungsgrundlagen zur strategischen Planung im Kontext Additive Fertigung.
10) Belebung und Förderung einer dynamischen Start-up-Szene zur Ausschöpfung der hohen Innovationspotenziale von Additiver Fertigung.

Bildung

11) Klassische Berufsbilder von Facharbeiterinnen und Facharbeitern sollten durch neue Qualifikationen für Additive Fertigungstechnologien erweitert werden.
12) Die Potenziale der Additiven Fertigung für die MINT-Ausbildung in den Schulen ausschöpfen.

Förderpolitik

13) Forschungsprogramm zur Verwirklichung der Dualen Strategie: Deutschlands Position als Leitanbieter und Leitmarkt für Additive Fertigung festigen.

2 Einleitung

Additive oder synonym auch Generative Fertigung bezeichnet die Fertigung von Bauteilen durch schichtweisen Werkstoffauftrag aus formlosem Rohstoff, die automatisiert auf Basis von digitalen 3D-Modellen abläuft. Bei Additiver Fertigung handelt es sich nicht um eine einzelne Technologie, sondern vielmehr um ein facettenreiches Technologiefeld. In der Öffentlichkeit und den Medien macht dieses Technologiefeld häufig unter dem Namen 3D-Druck Schlagzeilen. Dabei kokettieren Medien gern mit dem Begriff „Revolution“. Mit den mittlerweile auf dem Markt erhältlichen Druckern für die Anwendung zuhause haben industrielle additive Fertigungsanlagen allerdings nur wenig gemein. Ein Beispiel für die zum Teil übersteigerten Erwartungen der Bevölkerung war in der Sendung „Verstehen Sie Spaß“ vom 26. September 2015 zu sehen, in der vermeintlich Menschen per 3D-Druck dupliziert wurden. Da in dieser Stellungnahme die industrielle Anwendung dieser Fertigungstechnologie im Mittelpunkt steht, wird im Folgenden der Begriff „Additive Fertigung“ verwendet.

Grundideen Additiver Fertigung wurden bereits im 20. Jahrhundert patentiert, ab den 1970er Jahren wurden Patente für erste Verfahren angemeldet, die damals noch nicht praktisch umsetzbar waren. Mit der Weiterentwicklung von Lasertechnik sowie der Informations- und Kommunikationstechnologie konnten ab den 1990er Jahren erste Erfolge im Rapid Prototyping erzielt werden: Bauteile mit eingeschränkter Funktionalität dienen dabei als Ansichtsobjekte zum Beispiel für Produktdesigner und Chirurgen. Das Besondere an diesen Prototypen ist, dass sie sich ausgehend vom 3D-Datensatz sehr schnell produzieren lassen. Die kurze Durchlaufzeit ist möglich, da beim Rapid Prototyping zeitintensive Prozessschritte wegfallen, wie die Herstellung einer Form oder die Montage von Einzelteilen. Die Herstellung von Endprodukten war zunächst aber vor allem wegen unzureichender mechanischer Eigenschaften nicht wirtschaftlich möglich. Belastbarkeit und Langlebigkeit der Erzeugnisse wurden jedoch schrittweise verbessert, sodass das sogenannte Rapid Tooling möglich wurde: die Herstellung von Formen und Werkzeugen. Nach dem Jahrtausendwechsel gelang es, die Endprodukte immer wirtschaftlicher herzustellen, bevorzugt kleine Bauteile, Kleinserien und Unikate zum Beispiel in der Schmuckindustrie oder Medizin- bzw. Dentaltechnik. Ab diesem Meilenstein sprach man vom Rapid oder Direct Manufacturing. Das Verfahren eröffnete völlig neue Konstruktionsmöglichkeiten, etwa bei der Herstellung von Bauteilen mit komplexer geometrischer Struktur aus hochfesten Werkstoffen wie sie für den Leichtbau benötigt werden. 2010 einigten sich führende Unternehmen der Branche darauf, die anwendungsbezogenen, uneindeutigen und irreführenden „Rapid“-Bezeichnungen durch den neuen Überbegriff „Additive Manufacturing“ (dt. Additive Fertigung) zu ersetzen. Dies stellt Abbildung 1-1 dar.

Additive Fertigungsverfahren unterscheiden sich von konventionellen Technologien in vielerlei Hinsicht. Wenn diese Besonderheiten durchgängig berücksichtigt und konsequent genutzt werden, lassen sich enorme Potenziale erschließen. Der Reifegrad und damit die



Abbildung 1-1: Begriffsgebäude der Additiven Fertigung (Quelle: [GK16], [LL16])

Nutzung der Additiven Fertigung nehmen stetig zu, die Branche verzeichnet seit Jahren Wachstumsraten in der Größenordnung von etwa 30 Prozent pro Jahr [Woh16]. Vieles deutet darauf hin, dass sich Additive Fertigung als gängige Fertigungstechnologie neben den bislang etablierten flächendeckend durchsetzt. Es gibt derzeit keine belastbaren Indikatoren dafür, dass Additive Fertigung die industrielle Produktion in naher Zukunft revolutionieren wird. Bis es soweit ist, müsste noch ein weiter Weg zurückgelegt werden. Mit anderen Anwendungsgebieten (z.B. der Medizin, dem Bauwesen oder dem Heim-3D-Druck) in denen die Additive Fertigung allerdings langfristig ein revolutionäres Potenzial entfalten könnte, wird sich eine zweite gemeinsame Stellungnahme beschäftigen, die unter Federführung der Leopoldina herausgegeben wird.

Aus den vorgenannten Eigenschaften der Technologie und den sich abzeichnenden Nutzenpotenzialen ergeben sich einige **Schlüsselfragen** in Bezug auf Rahmenbedingungen, die Technologie und das Wertschöpfungsnetz, sowie gesellschaftliche Fragestellungen:

- Welche Chancen und Barrieren bestehen in der Entwicklung und der Anwendung dieser Schlüsseltechnologie?
- Was ist nötig, um Additive Fertigung im industriellen Maßstab auch für Großserien wirtschaftlich einsetzen zu können?
- Wie verändern sich Wertschöpfungsnetze und Geschäftsmodelle?
- Was ist zu tun, um dem Anspruch Leitmarkt und Leitanbieter gerecht zu werden?
- Wie verändern sich Qualifikationsprofile?

Zielsetzung

Die vorliegende Stellungnahme soll Fragen dieser Art beantworten und insbesondere Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Technologiefelds und der Ausschöpfung der Nutzenpotenziale geben. Die Stellungnahme ist in vier Kapitel strukturiert:

Das erste Kapitel **„Ausgangssituation“** beschreibt den Stand der Technik und die Felder, in denen Additive Fertigung bereits erfolgreich angewendet wird. Ferner wird auf die Akteure in Wertschöpfungsnetzen, heute zu beobachtende Geschäftsmodelle und Erfolgsfaktoren eingegangen.

Das zweite Kapitel **„Erwartete Entwicklungen“** betrachtet die Zukunft der im ersten Kapitel beschriebenen Verfahren und Anwendungsfelder. Anschließend werden Entwicklungsoptionen in Wertschöpfungsnetzen und Geschäftsmodellen aufgezeigt. Am Ende werden künftige Marktentwicklungen und bestehende Fördermaßnahmen dargestellt.

Das dritte Kapitel **„Thesen“** enthält 21 Thesen, die das Untersuchungsfeld auf der Grundlage der beiden vorangegangenen Kapitel charakterisieren. Dem schließen sich im vierten Kapitel die **„Handlungsempfehlungen“** an.

Methodischer Ansatz

Abbildung 1-2 stellt die Genese der Handlungsempfehlungen prinzipiell dar. Die Projektgruppe hat die fünf Betrachtungsfelder Fertigungstechnologien, Anwendungsfelder, Wertschöpfungsnetze, Geschäftsmodelle und Erfolgsfaktoren analysiert und daraus Thesen formuliert. Für jedes Betrachtungsfeld wurden dabei die heutige Ausgangssituation sowie die erwarteten Entwicklungen ins Kalkül gezogen. Auf Basis der Thesen und der Analyseergebnisse der Betrachtungsfelder wurden im Anschluss Handlungsempfehlungen abgeleitet. Das Vorgehen wurde durch zwei Workshops mit Experten der Additiven Fertigung begleitet.

Projektorganisation

Dieses Papier ist die erste von zwei gemeinsamen Stellungnahmen von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften zu diesem Thema. Die vorliegende Stellungnahme mit den Schwerpunkten Technologien, Wertschöpfungsnetze und Geschäftsmodelle wurde unter Federführung von acatech erstellt.

Die Arbeitsgruppe unter Federführung der Leopoldina betrachtet zunächst systemtechnische Herausforderungen der Grundlagenforschung und sodann zukunftsgerichtete Anwendungen der Additiven Fertigung im Feld von zum Beispiel Medizin, Ernährung, Bauwesen. Darüber hinaus vertieft sie die Wechselwirkungen mit der Gesellschaft vor allem im Hinblick auf, die Arbeitswelt, sicherheitsrelevante Aspekte sowie DIY (Heim-3D-Druck) und endet mit der Erörterung rechtlicher Fragen. Die Arbeitsgruppe der Leopoldina hat die vorliegende Stellungnahme ausführlich kommentiert. Die vorgeschlagenen Text-Ergänzungen und Hinweise haben in der Stellungnahme Berücksichtigung gefunden.

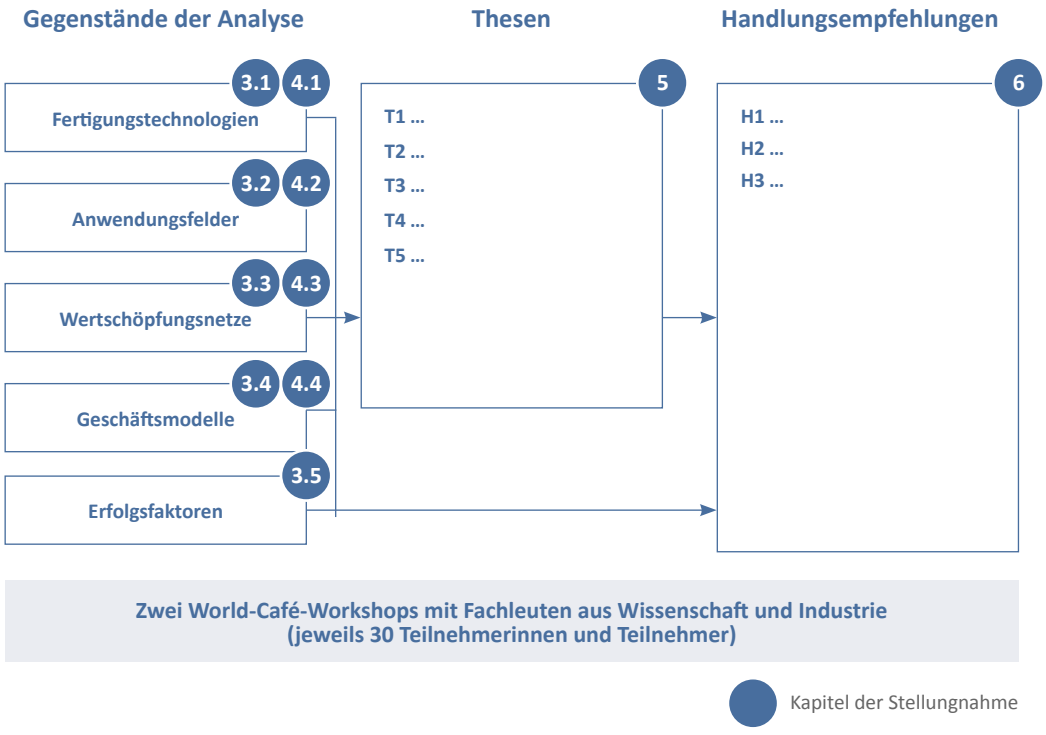


Abbildung 1-2: Der Weg zu den Handlungsempfehlungen (Quelle: eigene Darstellung)

3 Ausgangssituation

Additive oder synonym auch Generative Fertigung bezeichnet die Produktion von Bauteilen durch schichtweisen Materialauftrag aus formlosem Werkstoff, die automatisiert auf Basis von digitalen 3D-Modellen abläuft. Dieser Grundsatz kann mit verschiedenen physikalischen und chemischen Prinzipien zum stoffschlüssigen Fügen kombiniert werden. Die Fügeprinzipien bestimmen zusammen mit den Prozessbedingungen, die von der Anlagentechnik vorgegeben werden, welche Werkstoffe verarbeitet und welche Produkteigenschaften erreicht werden können. Durch Fortschritte vor allem in der Lasertechnik können immer leistungsfähigere Werkstoffe verarbeitet werden. Die erreichbaren Eigenschaftsprofile übersteigen in Einzelfällen diejenigen bei konventioneller Verarbeitung.

In nahezu allen etablierten Anwendungsfällen ist die Additive Fertigung integraler Teil einer industriellen Wertschöpfung. Die Additive Fertigung selbst gliedert sich in drei Stufen: 1) die Datenaufbereitung, 2) der schichtweise Aufbau des Objekts und 3) die Nachbearbeitung. In der Regel sind derzeit Datenaufbereitung und Nachbearbeitung nicht automatisiert, sondern erfordern Handarbeit und basieren zu einem erheblichen Teil auf Erfahrungswissen. Beispiele für die Nachbearbeitung sind Entfernung von Stützen, Wärmebehandlung von Metallen sowie Entbindern und Sintern von keramischen Grünlingen. Viele Erzeugnisse Additiver Fertigung dienen nicht als eigenständiges fertiges Produkt oder Bestandteil davon, sondern als Vorrichtung, verlorenes Modell (zum Beispiel Gussmodell aus Wachs) oder Gussform. Das einsatzbereite Produkt, das in einem einzigen Produktionsschritt hergestellt wird, wird wohl noch lange eine Vision bleiben.

Im vorliegenden Kapitel wird der Status quo der Additiven Fertigung beschrieben. Da sich der Stand der Wissenschaft und Technik in diesem Feld sehr dynamisch ändert, kann eine Beschreibung des Status quo nicht wirklich aktuell sein. Die für die Industrie interessantesten additiven Fertigungsverfahren und Anwendungsfelder werden hier vorgestellt. In der zweiten Hälfte des Kapitels stehen Rollen im Wertschöpfungsnetz und Geschäftsmodelle im Mittelpunkt.

3.1 Fertigungstechnologien

Das folgende Kapitel legt die technologischen Grundprinzipien der Additiven Fertigung dar. Dazu wird zunächst auf die Datenaufbereitung eingegangen – dieser Schritt ist für alle Verfahren im Wesentlichen identisch. Danach wird das Prinzip der schichtweisen Fertigung veranschaulicht und im Anschluss die wesentlichen Verfahren der Additiven Fertigung erläutert.

Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung besteht, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, aus acht Schritten. Im ersten Schritt wird ein rechnerinternes, natives relational strukturiertes 3D-CAD-Modell erstellt. Analog können auch Geometrien aus 3D-Scannern[1] aufbereitet werden. Bei diesem sogenannten Reverse Engineering liegen die Oberflächen eines

1 Zum Beispiel: Computertomographie oder Streifenlichtprojektion.

realen Gegenstandes vorerst als Punktewolken aus Messungen vor. Anschließend werden die vorliegenden Punkte mit einem Dreiecksnetzwerk überzogen. Alternativ hierzu können durch eine Approximation von Punktefolgen Kurven höherer Ordnung und somit parametrische graphische Elemente erstellt werden [BER+13]. Ergebnis dieses Prozessschrittes ist das De-facto-Standardformat .STL (Standard Triangulation Language, Stereolithography oder Surface Tesselation Language). Bei der Verwendung von 3D-CAD-Daten findet im zweiten Prozessschritt eine Konvertierung in das .STL Format statt. Dieses weist jedoch erhebliche Schwachstellen auf. Von der ursprünglichen 3D-Geometrie wird im .STL-Format nur die Oberfläche abgebildet. Dies geschieht näherungsweise durch zahlreiche Dreieckselemente. Andere Informationen aus dem CAD-System wie Werkstoffangaben, Krümmungsradien und Toleranzen für Abmessungen gehen verloren.

Das .STL-Format ist insbesondere für Inkonsistenzen anfällig. Sie ziehen prozessverzögernde Arbeiten, wie Datenanalyse und -reparatur nach sich. Anschließend werden die Bauteile im virtuellen Bauraum orientiert und positioniert. Für additive Fertigungstechnologien, die Stützen benötigen, werden solche an Überhängen des fertigen Bauteils konstruiert. Je nach additivem Fertigungsverfahren kann dies automatisiert oder in Handarbeit geschehen, was großes Prozessverständnis und Erfahrungswissen erfordert. Die Konstruktion der Stützstrukturen entscheidet zum Beispiel beim Metall-Laserstrahlschmelzen maßgeblich über die Herstellbarkeit eines Bauteils, die Prozessstabilität und den Aufwand bei der nachgelagerten Zerspanung. Im nächsten Schritt, dem sogenannten Slicing, werden horizontale Schnitte (Slices) der 3D-Geometrie erzeugt. Weil .STL-Dateien nur Oberflächen aus Dreiecken beschreiben, enthalten die Slices lediglich Konturen des zu fertigenden Bauteils. Um Vollkörper zu fertigen, werden die Konturen im folgenden Schritt gefüllt. Für manche additiven Fertigungsverfahren kann

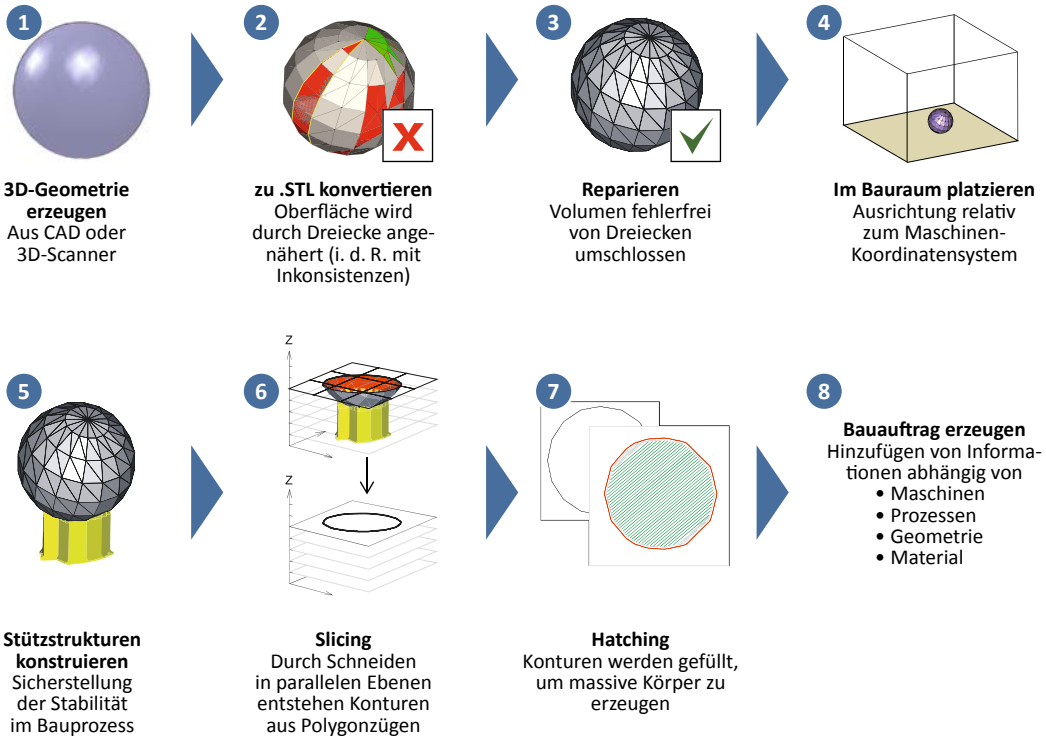


Abbildung 3-1: Prozesskette der Datenaufbereitung (Quelle: in Anlehnung an [Kar08])

dieser Schritt abweichen (z. B. LOM™, vgl. Abbildung 3-5). In der Regel werden die Konturen durch Schraffieren gefüllt (sog. Hatching). Jede einzelne Schraffurlinie wird später von der Fertigungsanlage erzeugt. Deshalb müssen beim Hatching Randbedingungen der Maschine, des Werkstoffs und des Fertigungsprozesses berücksichtigt werden. Darüber hinaus müssen weitere zwingend notwendige Parameter spezifisch für Bauteilgeometrie, Werkstoff, Maschine und Prozess häufig von Hand definiert werden, bevor die Herstellung eines Bauteils beginnen kann.

Zyklischer Aufbau von Schichten

Der physische additive Fertigungsprozess besteht aus zyklisch wiederholten elementaren Schritten zur Erzeugung einer Schicht. Wie genau die Schicht hergestellt wird, unterscheidet sich je nach betrachteter additiver Fertigungstechnologie. Am Beispiel des Laserstrahlschmelzens ist dies in Abbildung 3-2 dargestellt: Eine Schicht Metallpulver wird aufgetragen, lokal gezielt mit der darunterliegenden Schicht verbunden und die Bauplattform abgesenkt.

Geometriefreiheit

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus sind geometriespezifische Werkzeuge, wie Gussformen, deren Herstellung und Lagerung oft zeit- und kostenintensiv ist, nicht notwendig. Man spricht deshalb auch von direkt digitaler Fertigung. Konventionelle Beschränkungen für Bauteilgeometrien, zum Beispiel Hinterschneidungen oder Entformungsschrägen, erübrigen sich. Wie groß die Gestaltungsfreiheit und Maßhaltigkeit tatsächlich ausfällt, ist allerdings von verfahrensspezifischen Einschränkungen abhängig. Einige Technologien benötigen z. B. sogenannte Stützstrukturen, um auskragende Schichten und Überhänge gegen die Schwerkraft oder prozessbedingte Eigenspannungen zu stützen. Diese Strukturen müssen zugänglich sein, damit sie nach abgeschlossenem Bauprozess wieder entfernt werden können.

Verfahren der Additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren korrespondieren mit unterschiedlichen Fügeverfahren wie dem Zweikomponenten-Kleben auf der einen und dem Laserstrahlschweißen auf der anderen Seite. Je nach gewähltem Fügeprinzip lassen sich verschiedene Werkstoffe additiv verarbeiten – zum Beispiel duroplastische Kunststoffe oder Metalle. Abhängig von den nutzbaren Werkstoffen sind eine Reihe verschiedener Anwendungsgebiete und konkurrierende konventionelle Produktionstechnologien denkbar. Für Bauteile, die im Betrieb hohen Temperaturen ausgesetzt sind, eignen sich Kunststoffe beispielsweise weniger als Metalle. Während in der klassischen Fügetechnik vorgefertigte Werkstücke durch eine Nahtzone verbunden werden, erzeugt die Additive Fertigung Bauteile inkrementell ausschließlich aus miteinander verbundenen Nähten – meist ganz ohne vorgefertigte Elemente. Verfahren der Additiven Fertigung unterscheiden

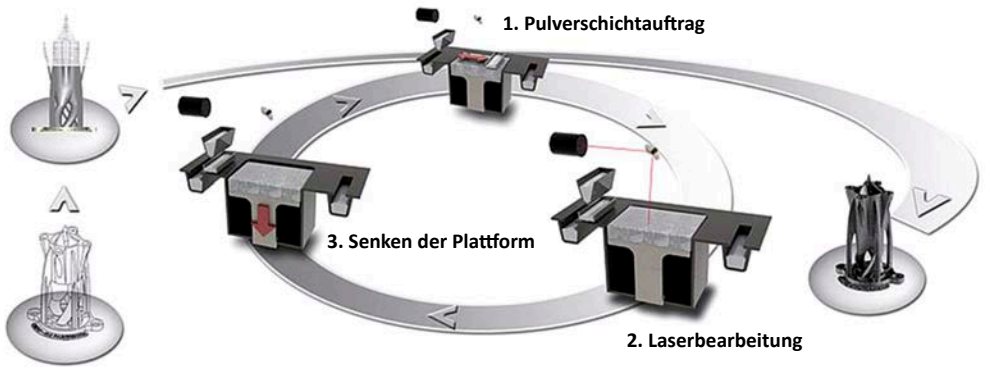


Abbildung 3-2: Zyklischer Ablauf der Schichterzeugung am Beispiel des Laserstrahlschmelzens (Quelle: [GWP13])

sich von Fügeverfahren meist durch die Größe der Fügezone und die Geschwindigkeit, mit der sie erzeugt wird. Daraus ergeben sich u. a. Detailauflösung und Produktivität eines additiven Fertigungsverfahrens.

Additive Verfahrensvarianten, die Werkstoff und Fügeprinzip gemeinsam haben, unterscheiden sich jedoch auch voneinander. Sie grenzen sich durch unterschiedliche anlagentechnische Umsetzungen von Werkstoffzufuhr und Konturgebung der Schichten ab. Das formlose Rohmaterial kann zum Beispiel als Pulver, Draht, Flüssigkeit oder Folie vorliegen. Um die Kontur jeder einzelnen Schicht zu erzeugen, werden beispielsweise Düsen oder Klingen an Linearachsen entlang bewegt, Laserstrahlen mit beweglichen Spiegeln gezielt abgelenkt oder Elektronenstrahlen mit Magnetfeldern geführt.

So deckt die Additive Fertigung heute eine große Spannbreite verschiedener Technologien ab. Alter und Reifegrad der einzelnen Verfahren unterscheiden sich erheblich [Lev03]; dasselbe gilt für die bereits etablierten Anwendungen, die zukünftigen Potenziale, die Intensität sowie die Dynamik von Forschung und Weiterentwicklung. Ob eine bestimmte Technologie für Heimanwender, einfache Werkstätten, spezialisierte Produktionslabore oder andere Zielgruppen geeignet ist, hängt unter anderem von der Höhe der notwendigen Investitionen ab. Die Anschaffungskosten für die Anlagen reichen von 500 Euro (Strangablegeverfahren) bis zu über 1 Million Euro (Laserstrahlschmelzen). Daneben setzen unterschiedliche Technologien auch unterschiedlich umfangreiche Vorkehrungen und Kenntnisse für einen sicheren Betrieb der Anlagen voraus (zum Beispiel Handhabung brennbarer und lungengängiger Metallstäube oder Laserschutz).

Die Vielfalt an additiven Technologien ist groß. Erschwerend kommt eine teilweise irreführende Terminologie hinzu. Nahezu alle Hersteller von additiven Fertigungsanlagen und auch viele Anwender versuchen, ihre eigenen markenrechtlich geschützten Bezeichnungen für teilweise identische Verfahren zu etablieren. Umgekehrt sind viele Begriffe nicht eindeutig. Die internationale Normung hinkt der sich schnell weiterentwickelnden Realität zwangsweise hinterher, ist nicht frei von Lobbyeinflüssen und Widersprüchen. Beispielweise legt die noch im Entwurfsstadium befindliche DIN EN ISO 17296-2 als Prozesskategorie „Pulverbettbasiertes Schmelzen“ fest, das mehrere Verfahren mit Kunststoff- oder Metallpulver und Elektronen- oder Laserstrahlung umfasst. Diese Verfahren sind nicht nur physikalisch, chemisch, werkstofflich, prozess- und anlagentechnisch sondern auch hinsichtlich ihrer industriellen Anwendungen grundverschieden. Gemeinsam ist ihnen die stark wachsende Relevanz, weshalb sie im Folgenden nicht zusammengefasst sondern differenziert bezeichnet werden. In der VDI Richtlinie 3405 werden einige Verfahren mit Anglizismen bezeichnet. Die acatech-Arbeitsgruppe hat sich darauf geeinigt in dieser Publikation deutschsprachige Langbezeichnungen zu verwenden und industriell etablierten Abkürzungen im Interesse der Verständlichkeit Vorrang zu gewähren. In der folgenden Technologieübersicht sind jeweils an erster Stelle die hier verwendete Langbezeichnung und Abkürzung genannt, anschließend unter Synonyme die gängigsten Markennamen, Prozessbezeichnungen aus VDI 3405 und Prozesskategorien aus DIN EN ISO 17296. Durch Schutzrechte auf Verfahren und Anlagen sind viele Technologien und deren Weiterentwicklung an einzelne Unternehmen gebunden. Ein Beispiel ist das Strangablegeverfahren, synonym auch Fused Deposition Modelling™ (FDM™), 1989 von *Stratasys*™ patentiert und in der industriellen Anwendung mit mehr verkauften Geräten als jede andere additive Fertigungstechnologie etabliert. Erst

nach dem Auslaufen des grundlegenden Patents 2009 eröffneten zahlreiche vereinfachte und um Größenordnungen preisgünstigere Nachahmerprodukte Forscherinnen und Forschern Zugang zum FDM™, aber auch Laien, die das Verfahren als Hobby anwenden wollen. Die dadurch enorm gestiegene Verbreitung des FDM™ ist maßgeblich für das aktuell große Interesse an der gesamten Additiven Fertigung verantwortlich.

Die kommerziell wichtigsten Technologien der Additiven Fertigung werden im Folgenden charakterisiert und zwar anhand des Fügeprinzips, der Art der Konturerzeugung in den Schichten und der Werkstoffe.

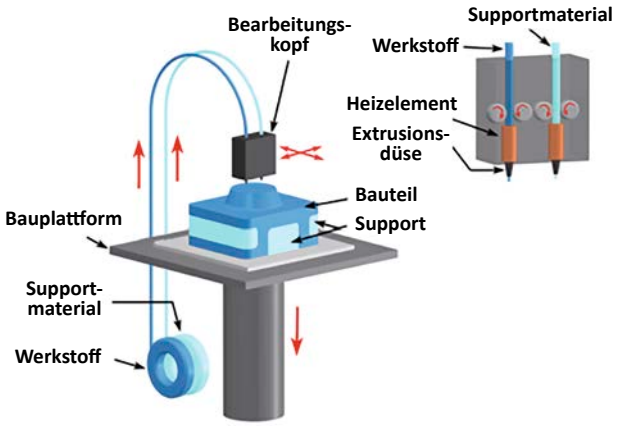


Abbildung 3-3: Strangablegeverfahren (FDM™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Strangablegeverfahren (FDM™)

Synonyme: Fused Deposition Modelling™ (FDM™), Fused Layer Manufacturing/Modelling (FLM)
Kategorie: Material Extrusion
Markteinführung: 1991
Patentiert: 1989 Scott Crump
Fügeprinzip: Schmelzkleben
Konturerzeugung: Extrusion z. B. von Kunststoffdraht aus verfahrbarer Düse
Werkstoffe: Filamente aus Kunststoffen, z. B. amorphe Thermoplaste (ABS[2], PC[3], PLA[4], PI[5])
Besonderheiten: Verfahren mit den meisten Anlagen im Markt.

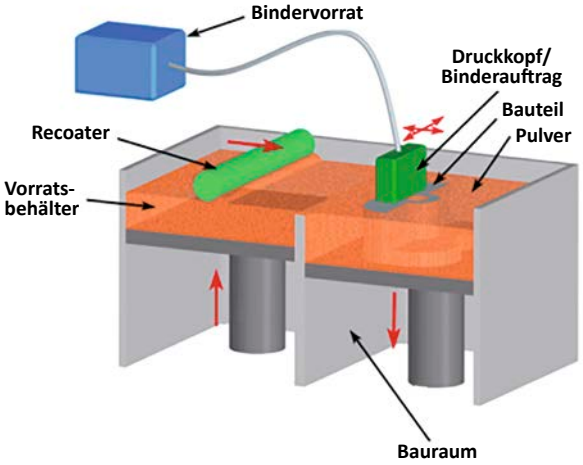


Abbildung 3-4: Binder-Druck (3DP) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Binder-Druck (3DP)

Synonyme: 3D-Printing™ (3DP), Binder 3D printing, ZCorp™, VoxelJet™
Kategorie: Binder Jetting
Markteinführung: 1993
Patentiert: 1993 Massachusetts Institute of Technology
Fügeprinzip: Verkleben von Pulver mit flüssigem Binder
Konturerzeugung: lokal kontrolliertes Aufbringen des Binders durch einen Tintenstrahldruckkopf
Werkstoffe: Gips, Stärke, PMMA[6], Sand
Besonderheiten: Der Binder kann eingefärbt und und über verschiedene Düsen gemischt werden. So lassen sich bunte Objekte drucken. Werden keramische Pulver verarbeitet, können Grünlinge aufgebaut und in weiteren Prozessschritten gesintert werden. Benötigt keine Stützen.

2 ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol.
3 PC: Polycarbonat.
4 PLA: Polymilchsäure.
5 PI: Polyimid.
6 PMMA: Polymethylmethacrylat.

Schichtlaminieren (LOM™)

Synonyme: Laminated Object Modelling™ (LOM™), Layer Laminated Manufacturing (LLM), Sheet Lamination
Kategorie: Schichtlaminierung
Markteinführung: 1991
Patentiert: 1987 Michael Feygin
Fügeprinzip: Verleimen von Papier oder Schmelzkleben von PVC[7]-Folie
Konturerzeugung: Zuschneiden mit Klinge (historisch, obsolet: mit Laserstrahl)
Werkstoffe: Papier, Leim, PVC-Folie
Besonderheiten: Papier kann zuerst bedruckt werden. So lassen sich farbige Objekte herstellen, die ähnliche Eigenschaften wie Holz aufweisen. Benötigt keine Stützen.

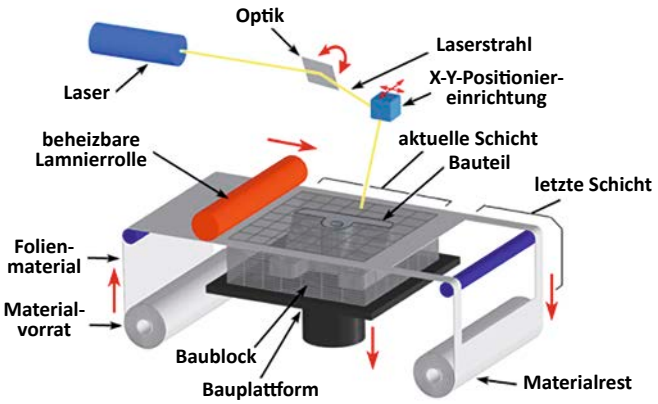


Abbildung 3-5: Schichtlaminieren (LOM™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Stereolithografie (SLA™)

Synonyme: Stereolithography™ (SLA™, STL), Stereolithografie
Kategorie: Vat Polymerization, Photopolymerisation im Bad mit Laserlichtquelle oder kontrollierter Flächenleuchte
Markteinführung: 1987
Patentiert: 1984 Charles Hull
Fügeprinzip: Photopolymerisation
Konturerzeugung: lokal kontrollierte Belichtung durch fokussierten Laserstrahl geführt von Scan-Spiegeln oder inkohärentes Licht geführt von Mikrospiegel-Arrays (DLP™, ähnlich Video-Beamern)
Werkstoffe: Duroplaste, typisch: Acryl- und Epoxidharze
Besonderheiten: Mit Keramikpulver vermischte Harze erlauben die Herstellung von Grünlingen, die nach weiteren Prozessschritten gesintert werden können.

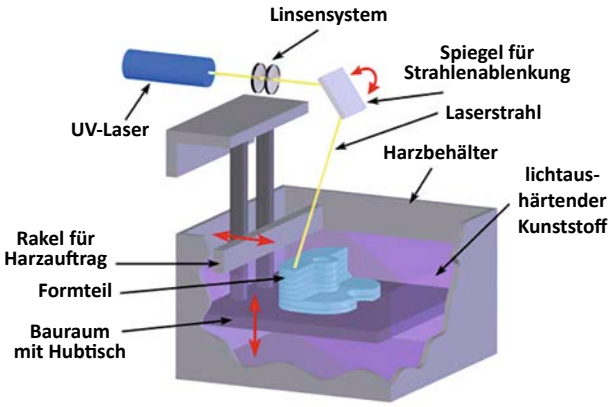


Abbildung 3-6: Stereolithografie (SLA™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Harz-Druck (PJM™)

Synonyme: Objet™, Polyjet™ Modelling (PJM™)
Kategorie: Material Jetting
Markteinführung: 2000
Fügeprinzip: Photopolymerisation
Konturerzeugung: lokal kontrolliertes Aufbringen von Photopolymer mit Tintenstrahldruckkopf
Werkstoffe: Duroplaste, typisch: Acryl- und Epoxidharze
Besonderheiten: Die Kombination verschiedener Duroplaste ist tröpfchenweise möglich, was gemischte Farben, gummiartige und harte Bereiche in einem Bauteil ermöglicht.

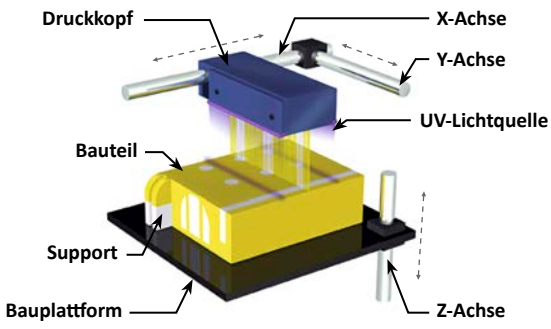


Abbildung 3-7: Harz-Druck (PJM™) (Quelle: Stratasys)

7 PVC: Polyvinylchlorid.

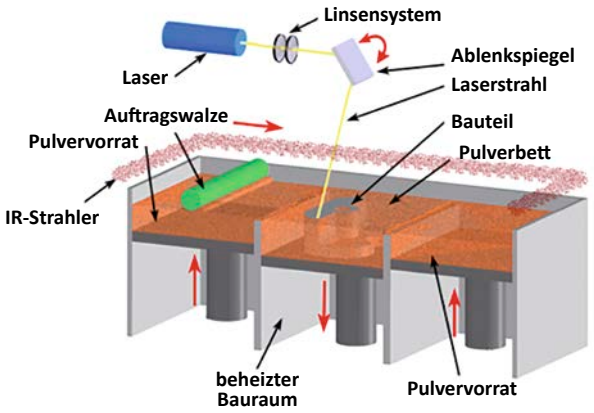


Abbildung 3-8: Kunststoff-Laser-Sintern (SLS™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Kunststoff-Laser-Sintern (SLS™)

Synonyme: Selective Laser Sintering™ (SLS™), Polymer-Laserstrahlschmelzen
Kategorie: Powder Bed Fusion, Pulverbettbasiertes Schmelzen
Markteinführung: 1992
Patentiert: 1986 Carl Deckard
Fügeprinzip: Flüssigphasensintern
Konturerzeugung: lokal kontrollierte Belichtung durch fokussierten CO_2-Laserstrahl, geführt mit Scan-Spiegeln
Werkstoffe: teilkristalline Thermoplaste, typisch: PA[8] 12, PA 11, PAEK[9]
Besonderheiten: benötigt keine Stützstrukturen.

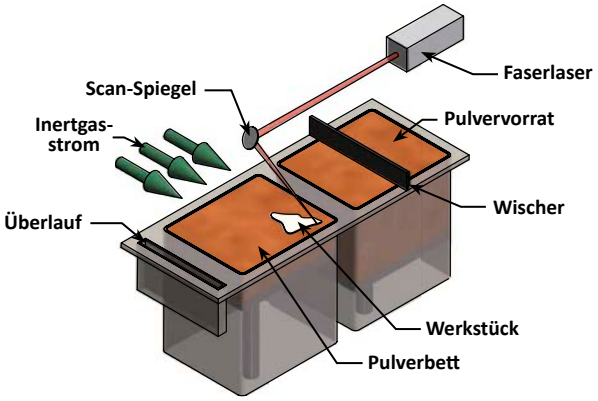


Abbildung 3-9: Laserstrahlschmelzen (SLM™) (Quelle: RAS)

Laserstrahlschmelzen (SLM™)

Synonyme: Selective Laser Melting™ (SLM™), Direct Metal Laser Sintering™ (DMLS™), LaserCUSING™, Laser Metal Fusion™ (LMF™), Direct Metal Printing™ (DMP™), Laser Beam Melting (LBM), Direct Metal Laser Melting
Kategorie: Powder Bed Fusion, Pulverbettbasiertes Schmelzen
Markteinführung: 1999
Patentiert: 1996 Wilhelm Meiners
Fügeprinzip: Schmelzschweißen
Konturerzeugung: lokal kontrolliertes Schweißen durch fokussierten Festkörperlaserstrahl, geführt mit Spiegeln
Werkstoffe: schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen in Pulverform
Besonderheiten: Werkstoffeigenschaften wie bei konventioneller Verarbeitung.

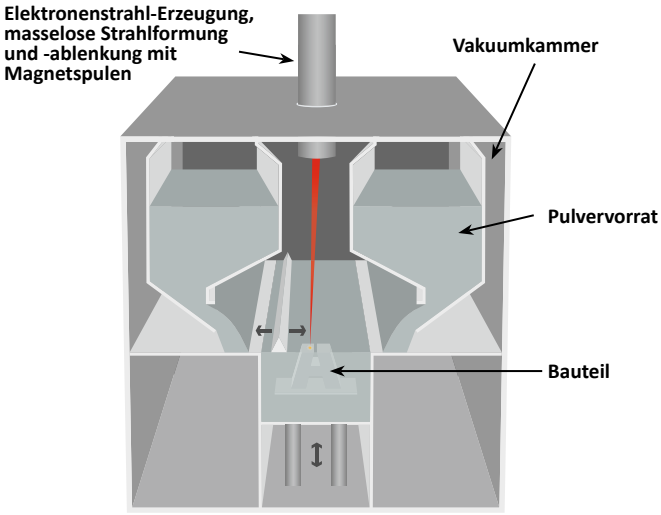


Abbildung 3-10: Elektronenstrahlschmelzen (EBM™) (Quelle: Arcam)

Elektronenstrahlschmelzen (EBM™)

Synonyme: Electron Beam Melting™ (EBM™)
Kategorie: Powder Bed Fusion, Pulverbettbasiertes Schmelzen
Markteinführung: 2004
Fügeprinzip: Schmelzschweißen
Konturerzeugung: lokal kontrolliertes Schweißen durch fokussierten Elektronenstrahl, geführt mit Magnetfeldern
Werkstoffe: sinter- und schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen in Pulverform
Besonderheiten: Werkstoffeigenschaften wie bei konventioneller Verarbeitung. Um elektrische Ladung kontrolliert abzuführen, muss umliegendes Pulver leicht versintert werden. Dadurch kann es nicht mehr so leicht aus Hohlräumen entfernt werden wie beim SLM™ und Oberflächen sind rauer.

8 Polyamid.
9 Polyaryletherketon.

Additives Auftragschweißen (LMD)

Synonyme: Direct Metal Deposition (DMD™), Laser Metal Deposition (LMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS™), Elektronenstrahlbasierte Additive Fertigung (EBAM™)

Kategorie: Directed Energy Deposition, Gerichtete Energiedeposition

Markteinführung: 1997

Fügeprinzip: Schmelzschweißen mit Laser- oder Elektronenstrahl

Konturerzeugung: Führen von Optik und Düse bzw. Drahtvorschub mit Linearachsen oder Knickarmrobotern

Werkstoffe: schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen, keramische Verstärkungspartikel

Besonderheiten: Schweißen von Metall, das als Pulver mittels Gasstrom in die Schmelze gefördert wird oder als Draht mittels Laser- oder Elektronenstrahl; Aufbau auf Freiformflächen möglich; Schichtweise Variation der Werkstoffzusammensetzung leicht umsetzbar

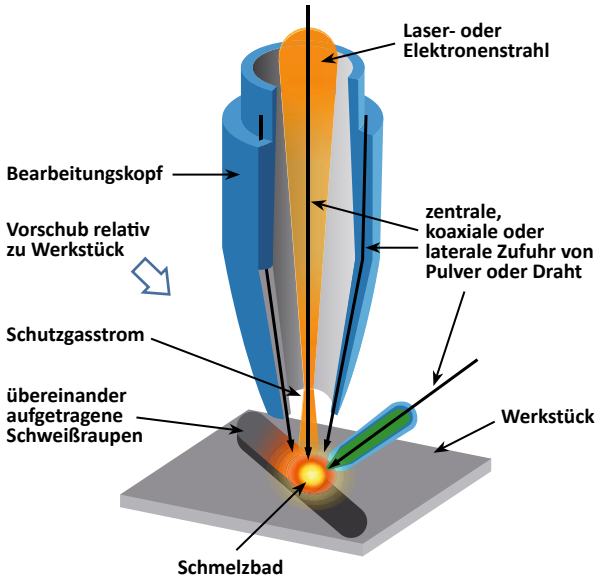


Abbildung 3-11: Additives Auftragschweißen mit Pulver oder Draht (Quelle: eigene Darstellung)

3.2 Heutige Anwendungsfelder

Im folgenden Kapitel werden die heutigen Anwendungsfelder der Additiven Fertigung als industrielle Fertigungstechnologie dargelegt. Im Wesentlichen sind dies der Prototypenbau, die Herstellung von Modellen und Formen, Hilfsmittel wie Vorrichtungen, Lehren und Bohrschablonen sowie last but not least die Herstellung von Endprodukten. Der sich entwickelnde Einsatz von Additiver Fertigung in weiteren Anwendungsbereichen (z. B. Medizin, Kunst, Heim-3D-Druck) liegt nicht im Fokus dieser Beschreibung.

Prototypenbau

Eines der ersten Einsatzgebiete für additive Fertigungsverfahren war der Prototypenbau, aus dem sie heute nicht mehr wegzudenken sind. Entscheidend sind in diesem Bereich vor allem die sehr kurzen Lieferfristen, die die Additive Fertigung bieten kann. Erhöhte Kosten sind dagegen tolerierbar.

Je nach Verwendungszweck unterscheidet man zwischen:

- Konzept- oder Visualisierungsmodellen mit rein ästhetischen Funktionen (3DP, LOM™, SLA™, PJM™, FDM™),
- Geometrieprototypen zum Beispiel für Einbauuntersuchungen (FDM™, PJM™, SLA™, SLS™),
- Funktionsprototypen, die einzelne definierte Funktionen des späteren Produkts erfüllen müssen (SLS™, FDM™, SLM™),
- sogenannten technischen Prototypen, die sich nur durch den Herstellweg vom Originalteil unterscheiden – aber nicht in Werkstoff, Geometrie und Funktionen (SLM™, EBM™).

Herstellung von Modellen und Formen

Additive Fertigungsverfahren selbst kommen zwar ohne Modelle und Formen aus und stellen das Bauteil direkt aus 3D-Daten her, aber sie werden in großem Umfang eingesetzt, um ebensolche herzustellen. Oftmals wäre die Alternative reine Handarbeit, so zum Beispiel beim Modellieren von Ausschmelzmodellen aus Wachs für den Feinguss (PJM™, SLA™) oder von Positivmodellen, mit deren Hilfe Sandformen oder Silikon-

gussformen hergestellt werden, siehe (Abbildung 3-12). Mit 3DP lassen sich auch mehrere Meter große Sandformen für den Metallguss herstellen und das mit höherer geometrischer Komplexität als konventionell.



Abbildung 3-12: Silikongussform für ein mit SLA™ hergestelltes Handygehäuse (Quelle: rpprototype.com)

Auch Formeinsätze aus Stahl für den Großserien-Thermoplast-Spritzguss oder den Leichtmetall-Druckguss werden additiv hergestellt (SLM™). Wasserdurchströmte Kühlkanäle werden, wie in Abbildung 3-13 dargestellt, so im Formeinsatz angeordnet, dass die Temperaturen im Betrieb möglichst gleichmäßig ausfallen (sog. Conformal Cooling). Mit SLM™ ist eine solche Optimierung möglich, während das konventionelle Bohren von Kühlkanälen an ihre Grenzen stößt, beispielsweise weil die Kühlkanäle immer exakt gerade sein müssen. Im Endeffekt erreichen die additiv hergestellten Formeinsätze eine bessere Maßgenauigkeit der Spritzlinge und kürzere Zykluszeiten, was bei typischen Spritzgießstückzahlen von einigen Hunderttausenden deutliche Einsparungen ermöglicht.

Vorrichtungen, Lehren, Bohrschablonen

Bei der Herstellung von Hilfsmitteln für Produktionsumgebungen und für chirurgische Operationen, werden additive Fertigungsverfahren ebenfalls seit Jahren eingesetzt. Durch moderne Bildgebungsverfahren lässt sich die patientenindividuelle Anatomie digital erfassen und zur Ableitung von anatomisch geformten Medizinprodukten verwenden. Dabei werden zum Beispiel Zahnimplantate anhand von computertomographischen Daten geplant. Anschließend wird eine Bohrschablone via SLA™ gefertigt, die den Bohrer gemäß der 3D-Planung führt und so den Operateur dabei unterstützt, schnell und präzise zu arbeiten. Ganz ähnliche Bohrschablonen für Operationen am Kniegelenk werden durch SLS™ hergestellt und klinisch angewandt.

Herstellung von Endprodukten

Zur individuellen Maßanfertigung von Im-Ohr-Hörgeräten oder hochwertigem Gehörschutz hat sich bis heute nahezu ausschließlich die SLA-Variante der Firma *Envisiontec*™ durchgesetzt. Eine im Vergleich dazu noch etwas geringere, aber stetig wachsende Marktdurchdringung erreicht die Fertigung der Gerüste von Zahnkronen (Abbildung 3-14), aus Kobalt-Chrom oder Goldlegierungen durch SLM™, die anschließend mit Keramik verblendet werden. Weitere

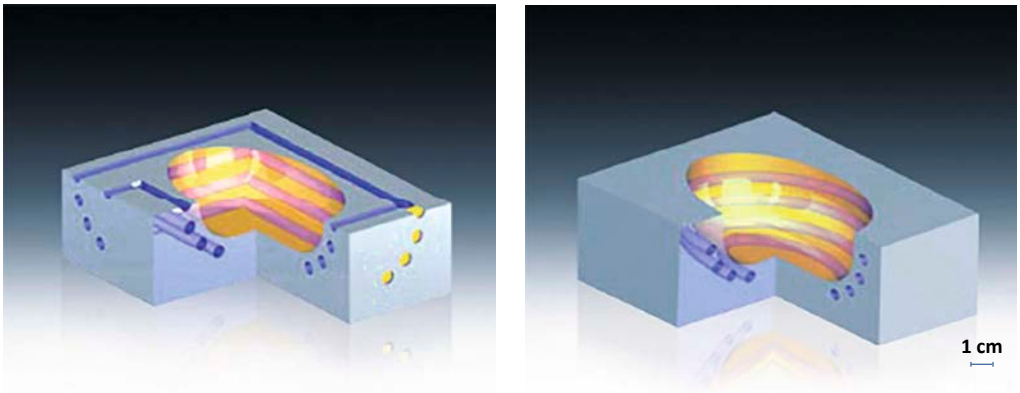


Abbildung 3-13: Links: klassisch gebohrte Kühlkanäle; rechts: konturangepasste Kühlung für die Herstellung durch Laser-Sintern™ (Quelle: EOS)

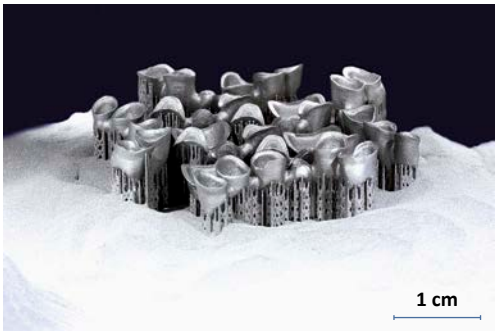


Abbildung 3-14: Kobalt-Chrom-Gerüste für Zahnprothesen auf Stützstrukturen, hergestellt mit SLM™ (Quelle: www.trident.ee)



Abbildung 3-15: Wasserpumpenrad aus dem Motorsport, hergestellt mit SLM™ (Quelle: BMWgroup.com)



Abbildung 3-16: Einspritzdüse für LEAP-Triebwerk, hergestellt mit SLM™ (Quelle: General Electric)

Anwendungen von Additiver Fertigung in der Medizintechnik werden in Band II der Stellungnahme vertieft beleuchtet. Die Abbildungen 3-15 und 3-16 zeigen Beispiele aus den Bereichen Motorsport (Wasserpumpenrad von *BMW*) und Luftfahrt (Einspritzdüse von *General Electric*). Bemerkenswert an dem Bauteil von *GE* sind nicht nur die in der Luftfahrt prinzipiell hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Herstellung, sondern auch die für additiv hergestellte Endprodukte vergleichsweise hohen Stückzahlen: über 100.000 Stück dieser Einspritzdüse sind allein durch bestehende Vorbestellungen für das LEAP-Triebwerk gesichert. Im Vorgängertriebwerk wurde diese Einspritzdüse aus 18 einzelnen Elementen zusammengefügt. SLM™ erlaubt die Fertigung aus einem einzigen Stück mit komplexerer Gestalt, sodass Gewicht und Produktionskosten gesenkt werden.

3.3 Rollen in Wertschöpfungsnetzen

Basierend auf der Additiven Fertigung haben sich facettenreiche Wertschöpfungsnetze ausgeprägt, aus denen sich charakteristische Rollen für die verschiedenen Akteure ergeben.

Werkstoffhersteller: Werkstoffhersteller produzieren das Ausgangsmaterial für die Additive Fertigung, das heißt Metall- oder Kunststoffpulver, Kunststofffilament, Photoharze, Binder etc. Hier finden sich etablierte Akteure aus der Chemieindustrie (z. B. *Evonik Industries*), wie auch kleine Spezialisten (z. B. *TLS Technik*). Besonders im Bereich der metallurgischen Legierungsentwicklung in Verbindung mit den hohen Reinheitsanforderungen für metallische Pulver zur Verwendung für die Additive Fertigung wie etwa im Falle von Titan- und Nickellegierungen ergeben sich neue anspruchsvolle Tätigkeitsfelder.

Komponentenhersteller: Sie liefern Bauteile und Baugruppen zur Herstellung von Maschinen zur Additiven Fertigung. Prozesskritische Komponenten sind insbesondere Laser, Steuerungstechnik, Beschichter, Spiegel und Komponenten zur Laser- bzw. Elektronenstrahlsteuerung sowie die Bauraumheizung. Ein beispielhafter Komponentenhersteller ist *IPG Photonics* (Laserhersteller).

Hersteller von Messtechnik: Die Additive Fertigung verleiht zerstörungsfreien Messverfahren starken Auftrieb, da mangels Vertrauen in die junge

Technologie oft eine 100 Prozent-Prüfung vorgeschrieben wird. Einerseits erfordert Fertigung in Losgröße 1 zwangsläufig das zerstörungsfreie Prüfen von Bauteilen. Andererseits wird Messtechnik (z. B. bildgebende Verfahren) bereits während des Bauprozesses genutzt, um Fehlern kontinuierlich entgegenzuwirken.

Maschinenhersteller: Diese stellen Maschinen zur schichtweisen Produktion von Bauteilen her. Meistens spezialisieren sich Maschinenhersteller auf eine oder wenige Fertigungstechnologien. Neben den Marktführern, die sich auf klassische Metall- und Kunststoffverfahren konzentrieren (z. B. *3D Systems, Stratasys, EOS*), etablieren sich derzeit auch kleinere Unternehmen mit dem Fokus auf Nischenverfahren (z. B. *Lithoz, Carbon3D*).

Anbieter von Software zur Datenaufbereitung: Stellen Software zur Verfügung, die die Zusammenführung von Geometrie- mit Prozess- und Werkstoff-Daten ermöglicht (siehe Kapitel 4-1). In der industriellen Anwendung ist hier das belgische Unternehmen *materialise* marktbeherrschend.

Online-Shop-Betreiber: Als Schnittstelle zwischen der eigentlichen Fertigungsdienstleistung und dem Endverbraucher unternehmen verschiedene Firmen den Versuch, Geschäftsmodelle aus dem E-Commerce auf die Additive Fertigung zu übertragen. Das zentrale Wertversprechen gegenüber dem Endkunden besteht hierbei u. a. aus der Individualisierung von Konsumgütern (hohe Variantenanzahl) und dem Angebot von andernorts gar nicht erhältlichen Produkten. In den meisten Fällen umfassen die entsprechenden Geschäftsmodelle eigene Fertigungskapazitäten, aber keine eigene Entwicklung, die vielmehr per Crowdsourcing durch unabhängige Designer erfolgt. Bekanntestes Beispiel dieses Modells ist die US-niederländische Firma *Shapeways*.

Dienstleister: Diese bieten überwiegend Auftragsfertigung mit additiven Verfahren an; viele verfügen über ein breites Technologieportfolio. Ihr Leistungsangebot umfasst daneben häufig Engineering und Prototypenbau. Sie sind ein wesentlicher Treiber der Technologie, da viele Unternehmen das Investitionsrisiko einer in-house-Fertigung scheuen. Beispielhafte Vertreter sind *materialise*, *FKM* und *citim*. Einzelne Dienstleister positionieren sich darüber hinaus auch zunehmend als Plattformen, die Prozesse und Daten über digitale Schnittstellen (APIs) öffnen und so als Grundlage für die Geschäftsmodelle anderer Akteure dienen.

Vermittler: Vor dem Hintergrund einer steigenden Zahl an Fertigungsdienstleistern haben sich Akteure etabliert, die eine vermittelnde Funktion zwischen Endkunden und Fertigungsdienstleistern einnehmen. Die Grundannahme hinter derartigen Angeboten ist der Bedarf nach sog. Spot-Märkten an denen eine standardisierte (Fertigungs-) Leistung gehandelt wird. Beispiele derartiger Anbieter sind derzeit u. a. *Kraftwürx*, *3D Hubs* und *Additively*.

Technologieanwender: Es handelt sich um Industrieunternehmen und Heimanwender, die Bauteile für den eigenen Bedarf additiv herstellen oder von Dienstleistern beziehen.

Weiterhin existieren wichtige Branchen-Befähiger, die das Branchen-Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung unterstützen.

Forschungsinstitute, Universitäten und Hochschulen: Diese betreiben interdisziplinäre Forschung im Themenfeld Additive Fertigung. In anwendungsnahen Projekten mit Industriebeteiligung übernehmen sie eine wichtige Katalysatorfunktion. Sie betreiben angewandte und Grundlagenforschung für das gesamte Wertschöpfungsnetz.

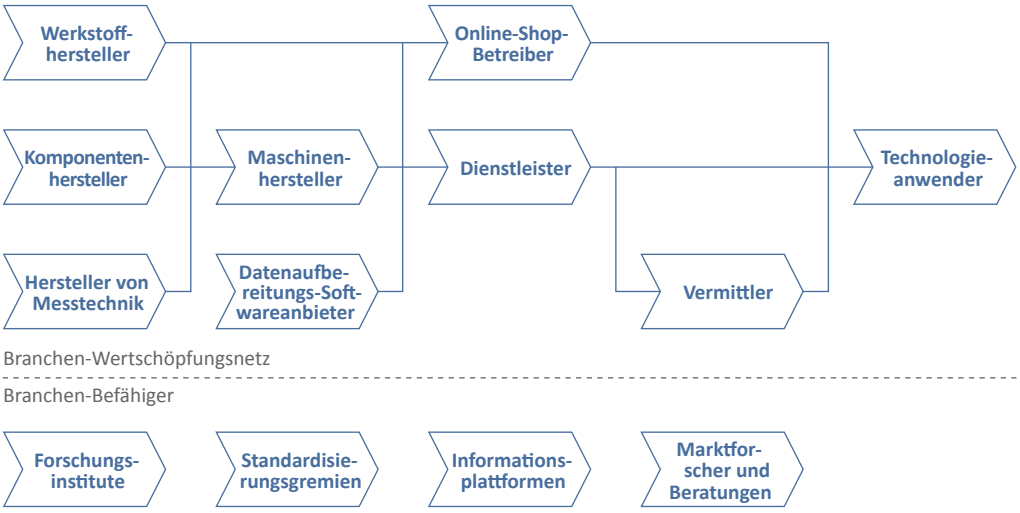


Abbildung 3-17: Generisches Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung inkl. Befähiger (Quelle: in Anlehnung an [BBM+14] und [Thi14])

Damit treiben Sie die Technologie voran und beschleunigen ihre Verbreitung (z. B. *DMRC, SFB 814, Fraunhofer Generativ, Rapid Technologies Center in Duisburg sowie mehrere Laserzentren*). Ferner qualifizieren sie Personal für die Anwendung der Technologie.

Standardisierungsgremien: Im Zuge der fortwährenden Bestrebungen, Additive Fertigung in industriellen Anwendungsgebieten mit hohen Anforderungen zu verwenden, werden die Verfahren weiter standardisiert. Wesentlich sind dabei international das ASTM Committee F42, das ISO TC 261 und das CEN TC 439 sowie in Deutschland der VDI Fachausschuss 105 Additive Manufacturing.

Informationsplattformen: Messen und Konferenzen zum Austausch von Wissen (z. B. AMUG, *formnext, inside3dprinting, Rapid.Tech in Erfurt, Solid Freeform Fabrication Symposium*).

Marktforscher und Beratungen: Bezugsquellen für belastungsfähige Informationen über die Technologie sowie Beratung zur Einführung der Technologie. Typischerweise haben diese sehr tiefe branchen- und technologiespezifische Expertise (z. B. *Wohlers Associates, T.A. Grimm & Associates*).

3.4 Geschäftsmodelle

In der Theorie wird häufig die These vertreten, dass die Additive Fertigung disruptive Geschäftsmodellinnovationen hervorbringen wird. In der gängigen Praxis ist dies bisher jedoch nur in einigen Fällen ansatzweise zu beobachten. Die Branche ist nach wie vor klassisch geprägt: Die wesentlichen Akteure sind Werkstoff- und Maschinenhersteller, Fertigungsdienstleister, Hersteller von Messtechnik sowie Technologieanwender. Die Geschäftsmodelle dieser Akteure entsprechen denen der etablierten Fertigungsindustrie. So produzieren Werkstoffhersteller weiter Werkstoffe und vertreiben diese entweder direkt oder über Distributoren an Kunden. Software wird weiterhin lizensiert, Hersteller von Messtechnik fertigen und verkaufen Messeinrichtungen etc. Die Akteure haben ihre bekannten Geschäftsmodelle beibehalten und lediglich neue Marktleistungen bzw. neues Know-how dazugewonnen. Beispielsweise haben Werkstoffhersteller Expertise zur Verdüsung von Pulvern aus Metallen aufbauen müssen. Dies findet aber kaum Niederschlag in den Geschäftsmodellen. Aus der bisherigen Praxis lassen sich die drei nachfolgend beschriebenen Befunde zur Auswirkung von Additiver Fertigung auf Geschäftsmodelle festhalten:

Anwendung etablierter Geschäftsmodellmuster

Anders als bei gängigen Fertigungsverfahren hat es sich als Besonderheit der Branche der Additiven Fertigung herausgebildet, dass Maschinenhersteller ihre Marktleistung um Werkstoffe und Prozessparameter erweitert haben. Dabei verfolgen viele Anbieter das aus dem Konsumentenbereich bekannte Geschäftsmodellmuster „Razor and Blade“[10] – das heißt komplementäre Marktleistungen, wie Werkstoffe und Prozessparameter müssen exklusiv bezogen werden. Die hohen Preise von Werkstoffen und Prozessparametern generieren einen erheblichen Teil des Umsatzes und eine hohe Marge. Ein weiteres Beispiel für ein Geschäftsmodellmuster ist das Muster Orchestrator, welches vom Unternehmen *additively* angewendet wird: Das Unternehmen selbst fertigt keine Bauteile mittels Additiver Fertigung, sondern vermittelt lediglich Produktionskapazitäten. Offenbar spielen in der Branche Additive Fertigung **etablierte Geschäftsmodellmuster** eine wichtige Rolle. Diese Beobachtung deckt sich mit der Erkenntnis von Gassmann et al., dass 90 Prozent aller Geschäftsmodelle auf einige wenige Muster zurückzuführen sind [GFC13].

Erweiterung von Schlüsselaktivitäten und Schlüsselpartnern

Geschäftsmodelle im Kontext Additive Fertigung erfordern oft eine Anpassung der nötigen **Schlüsselaktivitäten** oder **Schlüsselpartner**. Beispielsweise müssen Dienstleister ihre Auftraggeber häufig hinsichtlich der Gestaltung von Bauteilen beraten. Als Gründe hierfür lassen sich geänderte Konstruktive Freiheitsgrade, fehlende Standards und geringes Wissen über verfahrensabhängige Einschränkungen und die vorteilhafte Konstruktion von Bauteilen für additive Verfahren ausmachen. Diesen Herausforderungen wird durch den Einbezug externer Schlüsselpartner oder den Aufbau von tiefgehendem Prozessverständnis begegnet. Infolgedessen kommt Dienstleistern im Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung eine hohe Bedeutung zu. Es handelt sich bei ihnen keineswegs um austauschbare Ausführer, sondern um wesentliche Befähiger für die industrielle Verbreitung der Technologie.

Geschäftsmodelle mit individuellem Nutzenversprechen

Anbieter digitaler Dienste zur Herstellung von individuellen Bauteilen sind nicht grundsätzlich neu. So wurde bereits im Jahr 2003 das Unternehmen *eMachineShop* gegründet, welches Kunden eine einfach zu bedienende CAD-Software anbietet. Nachdem der Kunde selbstständig die CAD-Daten erstellt hat, fertigt *eMachineShop* die Bauteile im eigenen Maschinenpark und liefert sie aus. Auch in der Additiven Fertigung haben sich derartige Dienste schnell etabliert (zum Beispiel *Shapeways*, *i.materialise* etc.). Das Besondere ist hier jedoch, dass sie eine sehr direkte **Form der Kundeninteraktion** in Kombination **mit hohem Gestaltungsfreiraum** ermöglichen. Kunden können aus einem bestehenden Portfolio an CAD-Daten wählen und diese individualisieren. So bietet der Anbieter *trinckle 3D* einen cloud-basierten Marktplatz an, auf dem Anbieter von CAD-Daten exakt spezifizieren können, welche Freiheitsgrade Kunden haben, um Bauteile zu individualisieren (z. B. Abmessungen). In Verbindung mit intuitiven 3D-CAD Web-Applikationen können Produkte also bis auf Losgröße 1 maßgeschneidert werden, sodass sie den Kundenanforderungen bestmöglich gerecht werden. Eine weitere Entwicklung jüngeren Datums ist die Entstehung digitaler Schnittstellen, die sich nicht an Endanwender richten, sondern an Unternehmen, deren Geschäftsmodell auf einem automatisierten Outsourcing der Fertigung aufbaut. Ein Beispiel ist die *materialise API* des gleichnamigen Anbieters, die eine White-Label-Funktionalität bietet,

10 Auch „Lock-in“ oder „Bait and Hook“ genannt. Siehe Nespresso, Gillette oder HP [GFC13].

bei der die Fertigung von Materialise in Geschäftsmodelle Dritter integriert wird, ohne dass dies für den Kunden ersichtlich wäre.

3.5 Erfolgsfaktoren

Für die vorliegende Stellungnahme bewerteten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Unternehmensvertreterinnen und Unternehmensvertreter **14 Erfolgsfaktoren**, die starken Einfluss auf das Technologiefeld Additive Fertigung haben. Die Befragten schätzten zum einen die Bedeutung des Erfolgsfaktors für die industrielle Anwendung (Ordinate) ein und zum anderen die derzeitige Position Deutschlands in diesem Betrachtungsbereich (Abszisse).[11] Abbildung 3-18 stellt die Ergebnisse grafisch dar, danach ergeben sich drei charakteristische Bereiche im Erfolgsfaktorenportfolio:

- **Kritische Erfolgsfaktoren:** Hier handelt es sich um Faktoren, die eine hohe Bedeutung aufweisen, die Leistungsposition aber schwach bzw. nicht stark genug ist. Daraus ergibt sich für neun Faktoren ein Handlungsbedarf. Besonders bedeutend ist die Verfügbarkeit von robusten Maschinen mit reproduzierbarem Output. Maschinen und Anlagen der Additiven Fertigung werden diesem Anspruch derzeit nicht gerecht. Bauteile weisen oft unterschiedliche Bauteileigenschaften oder Geometrien auf, obwohl sie auf Basis der gleichen Daten gefertigt wurden. Ferner ist die Maschinenproduktivität

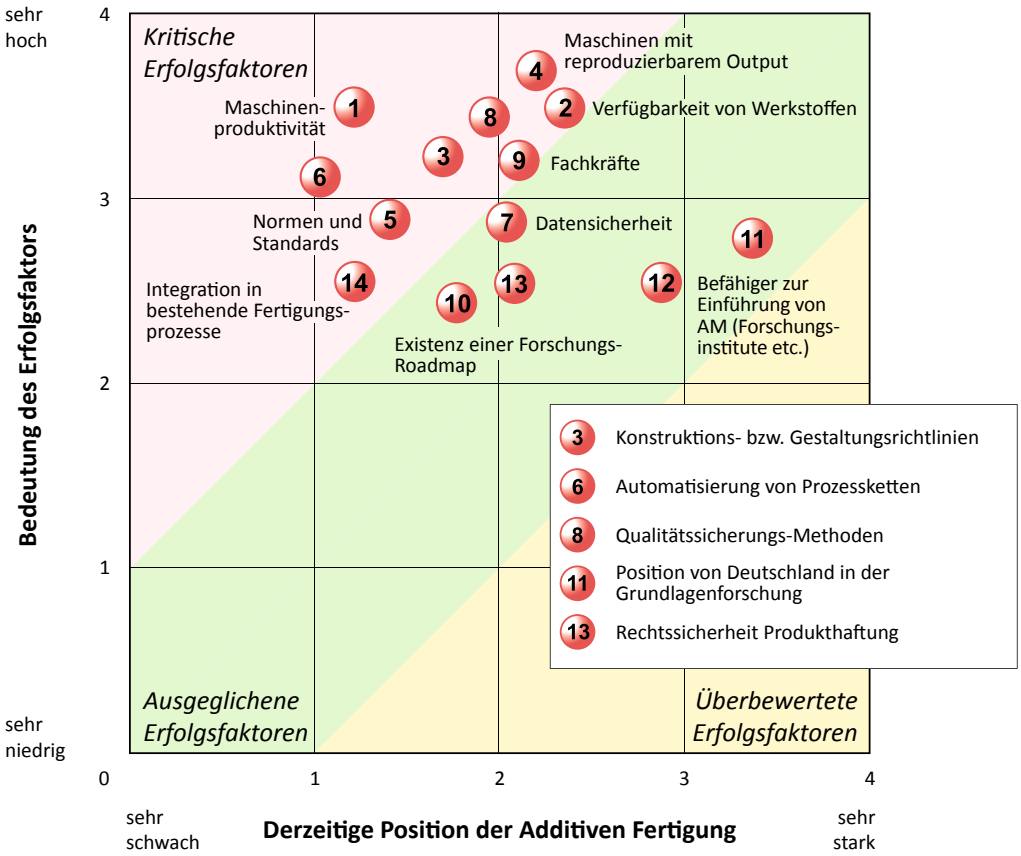


Abbildung 3-18: Erfolgsfaktorenportfolio für das Technologiefeld Additive Fertigung (Quelle: eigene Darstellung)

11 Zeitraum der Befragung: 18. Januar 2016 – 29. Januar 2016.
Anzahl der Befragten: 84 aus Wissenschaft und Industrie
Die Erfolgsfaktoren wurden im Rahmen eines Workshops der Projektgruppe bestimmt [Wor14b].

und Automatisierung der Prozessketten zu verbessern, so ein Ergebnis der Befragung. Weiterhin muss die Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe gewährleistet werden, um die industrielle Anwendung auszuweiten. Handlungsbedarf ergibt sich auch im Bereich der verfahrensspezifischen Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien (siehe auch [TDD+15]). Zur Verbreitung der Technologie im industriellen Maßstab mangelt es an automatisierten Prozessketten sowie Methoden zur Integration in bestehende Fertigungsprozesse. Die Existenz von Normen und Standards ist erfolgskritisch für die Additive Fertigung. Unter anderem, entwickeln der *VDI* und die internationale Standardisierungsorganisation *ASTM International* derzeit Standards[12]. Weiterhin müssen Methoden zur Qualitätssicherung entwickelt werden, um den Nachweis zu erbringen, dass additiv gefertigte Bauteile die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Um Additive Fertigung einsetzen zu können, bedarf es qualifizierter Fachkräfte. Diese sind bereits heute nicht in ausreichender Anzahl verfügbar.

- **Ausgeglichene Erfolgsfaktoren:** Hier besteht eine Balance zwischen der Bedeutung im Wettbewerb und der Position der Branche. Dazu zählen die fünf Faktoren: Existenz einer Forschungsroadmap, Rechtssicherheit hinsichtlich der Produkthaftung, Datensicherheit, Existenz von Befähigern zur Einführung von Additiver Fertigung und die Position Deutschlands in der Grundlagenforschung. Wenn der Fertigungsprozess zuverlässiger und schneller wird, Additive Fertigung in der industriellen Anwendung weiter verbreitet ist und das Angebot additiv gefertigter Produkte hoch ist, werden Erfolgsfaktoren wie die Rechtssicherheit bei der Produkthaftung und Datensicherheit in digitalen Prozessketten kritisch. Eine eindeutige Stärke ist die Grundlagenforschung in Deutschland. Dies gilt es auch in Zukunft sicherzustellen. Darüber hinaus existieren derzeit genügend Befähiger für Additive Fertigung. Im Wesentlichen sind dies Dienstleister, Forschungsinstitute und einschlägige Unternehmensberatungen.

- **Überbewertete Erfolgsfaktoren:** Dies wären Faktoren, die eine hohe Leistungsposition aufweisen aber weniger relevant sind. Es ist für eine junge Technologie typisch, dass in diesem Bereich zunächst keine Faktoren anzutreffen sind.

Insgesamt existieren keine signifikanten Unterschiede in den Bewertungen aus der Wissenschaft und der Industrie.

12 Weitere (internationale) Standardisierungsgremien finden sich in [VDI14].

4 Erwartete Entwicklungen

Der Reifegrad der Technologie Additive Fertigung nimmt stetig zu, die Branche verzeichnet seit Jahren Wachstumsraten in der Größenordnung von etwa 30 Prozent [Woh16]. Vieles deutet darauf hin, dass sich Additive Fertigung als gängige Fertigungstechnologie neben den bislang etablierten flächendeckend durchsetzen wird, wenngleich es derzeit keine belastbaren Indikatoren gibt, dass Additive Fertigung die industrielle Produktion revolutionieren wird. Dieses Kapitel stellt die technologische Entwicklung bis 2025 dar. Die entsprechenden Aussagen beruhen auf einer Analyse der einschlägigen Literatur, Workshops und Befragungen von Expertinnen und Experten sowie auf Arbeiten der Mitglieder der Projektgruppe, in denen sie beispielsweise Zukunftsszenarien der erwarteten technologischen Entwicklung sowie der Märkte und Geschäftsmodelle erarbeiteten [GEK+11], [GEK+12], [GEW13].

4.1 Fertigungstechnologien

Die Wechselwirkung von Technology Push und Market Pull hat zu einer hohen Vielfalt an Anwendungsfeldern geführt; diese Entwicklung dürfte sich fortsetzen. Im Folgenden wird beleuchtet, welche technologischen Entwicklungen bis 2025 zu erwarten sind. Die Entwicklung der Fertigungstechnologien fußt dabei auf zwei Innovationsrichtungen: Erstens werden die bestehenden Anlagen bis zu den physikalischen Grenzen weiterentwickelt. Zweitens zeichnen sich vor dem Hintergrund der intensiven Forschungsarbeit in der Maschinenentwicklung bis 2025 weitere Verfahren ab, mit denen neue Anwendungsfelder erschlossen werden können [TSE+15]. Treiber dieser Entwicklungen sind (staatlich) geförderte Forschungsaktivitäten und Market-Pull-Effekte aus der Industrie [GE13]. Weitere relevante Fortschritte in der Fertigungstechnologie ergeben sich aus der Automatisierung, der Entwicklung hybrider Fertigungsanlagen, der Erweiterung des Werkstoffspektrums und Weiterentwicklungen der Software für Additive Fertigung.

Verbesserung der Anlagenleistungsfähigkeit in den bekannten Dimensionen

Die Leistungsfähigkeit der Fertigungsanlagen wird in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich beträchtlich zunehmen [PWC13], [RAE13]. Eine differenzierte Betrachtung der technischen Parameter ist nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung. Verschiedene Quellen erwarten insbesondere in der metallverarbeitenden Additiven Fertigung Steigerungen der Aufbauraten zwischen Faktor 4 und Faktor 100 in den kommenden zehn Jahren [GEW13], [Sie14], [KTH+12]. In etablierten Fertigungstechnologien sind solche Produktivitätszuwächse um Größenordnungen nicht zu erwarten. Leistungssteigerungen in diesen Dimensionen sind voraussichtlich jedoch nur durch Grundlagenforschung und den Markteintritt neuer Akteure zu erreichen. Das gegenwärtige Marktwachstum lastet die Produktionskapazitäten der meist mittelständisch geprägten Maschinenhersteller voll aus – Verbesserungen der Maschinen geschehen vor diesem Hintergrund nur zögerlich. Neben der technologischen Komplexität werden Maschinenhersteller zukünftig stark mit der Skalierung ihrer Geschäftsmodelle kämpfen müssen.

Auch zukünftig werden die wesentlichen Differenzierungsmerkmale von Maschinenherstellern schnellere Bauzeiten, höhere Qualität und größerer Bauraum sein. So wirbt der deutsche Maschinenhersteller *ConceptLaser* in seiner neusten Maschinengeneration mit einem um 27 Prozent vergrößerten Bauraum und versucht damit seine Marktposition als Anbieter von Metallmaschinen mit großen Baukammern weiter zu festigen [CL16a-ol]. In Südafrika entsteht durch starke staatliche Förderung derzeit sogar eine SLM™-Maschine mit einer 2000 mm x 600 mm x 600 mm großen Baukammer [Wat15-ol]. Gegenüber dem heutigen Stand der Technik wäre dies eine Vergrößerung um etwa Faktor 20.

Technologieanwender bemängeln bisweilen auch die geringe Verfügbarkeit der Maschinen: Grund dafür sind mitunter unerwartete Wartungseingriffe und allgemein kurze Wartungsintervalle zum Wechsel von z. B. Filtern. Maschinenhersteller werden entsprechend reagieren und beispielsweise größere Filter verbauen, um die Maschinenverfügbarkeit zu erhöhen [CL16b-ol]. Des Weiteren enthalten die neuesten Generationen von Metall-Laserschmelzanlagen bereits mehrere Laser und werden zukünftig um automatische Fördersysteme ergänzt [SLM15-ol].

Maschinen und Anlagen der Additiven Fertigung werden in Zukunft als gekapselte, autarke Systeme verfügbar sein – die Anwender stehen mit dem Pulver nicht in Kontakt, das Handling von Pulver und Bauteil geschieht vollautomatisch [EOS16-ol]. Auch sogenannte Online-Überwachungsfunktionen werden zunehmend in bestehende Maschinen eingebracht [Wor14b], [AI15-ol]. So ist zu erwarten, dass zukünftig bereits während des Bauprozesses die Qualität der Erzeugnisse überprüft werden kann. Die Automatisierung der Maschinen und Anlagen der Additiven Fertigung wird eine der zentralen technologischen Entwicklungen sein. Hintergrund ist, dass Additive Fertigung derzeit sehr viele manuelle Prozessschritte bedingt – sowohl im Kernprozess, wie auch in vor- und nachgelagerten Operationen. Einhergehend mit der Automatisierung von Maschinen und Anlagen für Additive Fertigung wird auch die Menge der zu verarbeitenden Prozess- und Bauteildaten exponentiell wachsen. Maschinenhersteller werden daher mittelfristig Lösungen für Big Data in ihr Marktleistungsportfolio aufnehmen müssen. Grund dafür ist die marktseitige Forderung nach stabilen und reproduzierbaren Prozessen.

Zunahme der Technologievielfalt

Ein Charakteristikum der technologischen Entwicklung der Additiven Fertigung ist, dass die Verfahren weitestgehend auf unterschiedliche Anwendungsfelder abzielen – das heißt ein Unternehmen hat bisher nur in Ausnahmefällen die Wahl, welches Verfahren es verwenden kann. Zu spezifisch sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren. Das wird sich wohl auch in naher Zukunft nicht ändern [Wor14b]. Von Zeit zu Zeit entstehen allerdings neue Verfahren, die das Grundprinzip des schichtweisen Werkstoffaufbaus durch andere Lösungsprinzipien realisieren. Diese neuen Verfahren öffnen das Anwendungsspektrum. Als Beispiel dafür kann das kürzlich bekannt gewordene Clipping-Verfahren angeführt werden. Durch die Erweiterung des etablierten DLP™-Photopolymerisations-Verfahrens um ein sauerstoff- und lichtdurchlässiges Projektorfenster und angepasste Werkstoffe konnte die Baugeschwindigkeit beträchtlich gesteigert werden [TSE+15]. Ein weiteres Charakteristikum vieler additiv hergestellter Bauteile ist die Anisotropie der Werkstoffkennwerte, d. h. dass z. B. die Festigkeit stark von der Belastungsrichtung eines Bauteils abhängt, diese Eigenschaft ist Folge der Orientierung eines Bauteils im Bauraum während der Herstellung [NLR+13]. Dies kann mitunter auch vorteilhaft genutzt werden, z. B. für Bauteile, die hauptsächlich in wenigen Vorzugsrichtungen belastet

werden. Es bedarf zukünftig jedoch geeigneter Software, um derartige Eigenschaften bereits bei der Bauteilkonstruktion zu berücksichtigen.

Verbreitung hybrider Fertigungsmaschinen und -anlagen

Additive Fertigung zeigt ihre Vorzüge insbesondere dort, wo es gilt, komplexe Geometrien zu erstellen. Allerdings erreicht die Technologie die Produktivität konventioneller Fertigungsverfahren noch nicht: Etablierte Verfahren wie das Drehen und Fräsen zeichnen sich durch hohe Genauigkeit und Oberflächengüten sowie kurze Bearbeitungszeiten aus [MAV14-ol], [DMG15-ol]. Dies haben Maschinenhersteller erkannt und ergänzen Additive Fertigung mit konventionellen Fertigungstechniken. Dafür steht der Begriff hybride Fertigungsmaschine bzw. -anlage. Diese Maschinen bieten hohe Genauigkeiten und Oberflächengüten, jedoch muss eine gewisse Einschränkung der Geometriefreiheit in Kauf genommen werden. Bei hybriden Fertigungsmaschinen zeichnen sich zwei Strömungen ab:

Bearbeitung in einer Baukammer: Dabei handelt es sich um Maschinen, welche die Bearbeitung in einer einzelnen, geschlossenen Baukammer ermöglichen. Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal dieser Maschinenart ist die Möglichkeit, Nachbearbeitungsoperationen an Bereichen durchzuführen, die am Fertigteil nicht mehr erreichbar sind. Das heißt nach jeder Schicht können klassische Bearbeitungsoperationen stattfinden. Beispielhafte Anbieter solcher Maschinen sind *DMG Mori* oder *Matsuura*.

Bearbeitung in mehreren Baukammern: Hier sind Maschinen der Additiven Fertigung in einer automatisierten Anlage integriert. Darin lassen sich der Additiven Fertigung vor- und nachgelagerte Prozessschritte nach Bedarf konfigurieren. Die Bauteile werden also in unterschiedlichen Baukammern bzw. Arbeitsräumen bearbeitet [AI15-ol]. Dies kompensiert einen wesentlichen Nachteil hybrider Fertigungsmaschinen mit nur einer Baukammer: Die deutlich unterschiedlichen Bearbeitungszeiten von additiver und konventioneller Fertigung, welche zu langen Stillstandszeiten von z. B. Fräsköpfen führen. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für derartige Anlagen ist die Modularisierung der einzelnen Bearbeitungsschritte. Ein Anbieter, der solche Anlagen zukünftig zur Verfügung stellen möchte, ist *Additive Industries*.

Steigende Werkstoffvielfalt

Um die Anforderungen neuer Anwendungsfelder (wie der Automobilindustrie) zu erfüllen, werden dedizierte Werkstoffe entwickelt [Str15], [WEG15], [Yad09]. Da in der Additiven Fertigung vermehrt Endbauteile gefertigt werden, steigen die Anforderungen an Pulver, Filamente, Harze etc. Heute existieren bereits anspruchsvolle Werkstoffe für einzelne Anwendungsbereiche, wie die Luftfahrt. Probleme bereiten bis heute jedoch Hochleistungswerkstoffe, die z. B. schwer schweißbar sind. Um Additive Fertigung auch für Hochtemperaturanwendungen einsetzen zu können, müssen neue Werkstoffe oder andere Verfahren entwickelt werden.

Zukünftig werden Kombinationen von Werkstoffen gleicher Art (zweier Metalle) oder unterschiedlicher Art (zum Beispiel Kunststoffe mit glasfaserverstärkten Kunststoffen) erprobt und angewendet. So lassen sich neue Eigenschaften in Bauteilen durch die eingesetzten Werkstoffe realisieren. Darüber hinaus werden maßgeschneiderte Werkstoffe entwickelt, die in Kombination mit standardisierten Prozessbedingungen vorteilhafte Bauteileigenschaften erzeugen [Wor14b]. Derzeit wird die Verarbeitung von Titanaluminiden [SK14], Formgedächtniswerkstoffen [HMF12] und metallischen Gläsern erforscht [KAH+15]. Besonders bei diesen Werkstoffen ist, dass sie bei konventionel-

ler Fertigung Geometriebeschränkungen unterliegen und typischerweise sehr hohe Kosten in der Verarbeitung aufweisen.

Ein weiterführendes Beispiel lieferten Forscher des *Massachusetts Institute of Technology* Ende 2014: Sie entwickelten sog. *programmable* bzw. *architectured materials*“ (Metamaterialien), die sich ausschließlich additiv fertigen lassen. Diese sind in der Lage, ihre Geometrie durch Licht, Schall oder elektrische Impulse zu verändern [Thi15-ol].

Verbreitung von Software für technologiespezifisches CAD

Die Datenaufbereitung für Additive Fertigung ist derzeit noch ein aufwändiger, mehrschrittiger Prozess (siehe Kapitel 3.1 und 3.3). Zukünftig ist zu erwarten, dass CAD-Software verfügbar ist, die die spezifischen Randbedingungen der Technologien direkt bei der Erstellung des 3D-Modells berücksichtigt. Das bedeutet: Die Datenaufbereitung für Additive Fertigung wird zukünftig teilweise in CAD-Software integriert. Erste Ansätze dazu finden sich bereits heute: So hat der CAD-Software-Hersteller *Autodesk* im Jahr 2015 den AM-Softwarehersteller *netfabb* aufgekauft, u. a. mit dem Ziel, die eigene CAD-Software für Additive Fertigung weiterzuentwickeln. Dies ist ein Indiz dafür, dass Additive Fertigung mittlerweile auch für große Akteure eine relevante Marktgröße erreicht hat. Über die reine CAD Anwendung hinaus werden auch neue Simulationswerkzeuge und Schnittstellen zu Managementsoftwaresystemen erforderlich und verfügbar sein. Aktuelle Entwicklungen im Bereich von Simulationswerkzeugen für die Additive Fertigung bestätigen diesen Trend. Das Unternehmen *Altair Engineering* bietet beispielsweise bereits Software zur optimierten Auslegung und Analyse von additiv zu fertigenden Bauteilen an. In Zukunft werden die CAD-Software-Hersteller ebenfalls diese Funktionalitäten zur zielorientierten additiven Fertigung in ihre Software implementieren. Es wird eine Unterstützung für den Anwender vorliegen, welche ihn von Anfang der Konstruktion oder Aufnahme einer Punktewolke bis hin zur Generierung des Maschinencodes zur direkten Herstellung der Bauteile auf der Maschine technologie- und wissensbasiert begleitet.

Im Zuge der Reifung von Software-Anwendungen für Additive Fertigung ist ferner zu erwarten, dass die Rahmenbedingungen von Additiver Fertigung in einschlägiger Software für Produktdatenmanagement und unternehmensplanerische Aufgaben abgebildet werden können.

4.2 Anwendungen und Märkte

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich Anwendungen und Märkte der Additiven Fertigung entwickeln werden. Zunächst werden die wesentlichen Treiber dieser Entwicklungen erläutert, danach werden die generellen Charakteristika eines wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes von Additiver Fertigung zusammengefasst. Schließlich werden die sich daraus ergebenden Fortschritte in heutigen und das Entstehen von neuen Anwendungsfeldern dargelegt.

Treiber

Auch zukünftig werden die **flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten** von Bauteilen der zentrale Treiber für die Verbreitung der Additiven Fertigung sein. Wie in Kapitel 3.2 anhand zahlreicher Beispiele dargelegt, können Endbauteile mithilfe der Technologie in bisher kaum möglicher Gestalt gefertigt werden. Darüber hinaus beschleunigt die Additive Fertigung bestehende Prozesse. Beispielsweise kann der Vertrieb einem potenziellen Kunden schnell ein physisches Anschauungsobjekt zeigen. Weiterhin wird der Additiven Fertigung ein starkes öffentliches Interesse zuteil. Die Zunahme von anwendungsnahen Konferenzen

(z. B. *inside3Dprinting*) sowie auch die Vielzahl an Veröffentlichungen in diesem Themenfeld belegen dies. Grund für das starke öffentliche Interesse ist unter anderem die **Heimanwendung**. Wie keine andere Technologie profitiert die Additive Fertigung von der Verfügbarkeit von „3D-Druckern" für den Hausgebrauch. Durch ihre neuartige Gestalt erfahren Bauteile aus Hobbywerkstätten in einschlägigen Online-Communities große Aufmerksamkeit und fördern zudem das Interesse der Industrie. Für die weitere Verbreitung der Additiven Fertigung wird es wichtig sein, im industriellen Umfeld überzeugende Anwendungsfälle zu finden und diese öffentlichkeitswirksam zu kommunizieren (siehe hierzu auch Band II dieser Stellungnahme unter der Federführung der Leopoldina).

Als weiterer Treiber für die zukünftige Verbreitung der Additiven Fertigung zeichnet sich **Mass Customization** ab, was die Herstellung von kundenindividuellen Erzeugnissen zu Preisen der Massenproduktion bezeichnet [Pil06]. Ein Beispiel dafür sind kundenspezifischer Sohlen für Laufschuhe: Der US-amerikanische Sportartikelhersteller *New Balance* z. B. fertigt auf Basis biomechanischer Messdaten Schuhsohlen, die auf den Laufstil des Läufers angepasst sind [WC13]. Durch das Angebot solcher kundenindividueller Lösungen differenzieren sich Unternehmen von Wettbewerbern und vermeiden die sog. Commodity-Falle – eine Situation, in der die Differenzierung hauptsächlich über den Preis stattfindet. Für solche kundenindividuellen Marktleistungen ist Additive Fertigung Schlüsseltechnologie [CMM+14]. Im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren ist die Additive Fertigung insbesondere bei kleinen Stückzahlen profitabel. Grund dafür ist, dass die Technologie werkzeuglos funktioniert, Rüstzeiten entfallen weitgehend. So können Hersteller kundenindividuelle Wünsche bei der Produktgestaltung erfüllen, Kleinserien können einfacher produziert werden. Allerdings werden vorerst Endprodukte nur in Ausnahmen individualisiert. Der hohe Aufwand für Nachbearbeitungsoperationen, z. B. für eine hohe Oberflächenqualität, steht dieser Idee derzeit im Weg.

Ein weiterer Treiber wird die **dezentrale Fertigung** sein: Die schnelle Distribution von digitalen Daten macht es theoretisch möglich, überall auf der Welt bedarfsgerecht zu produzieren, da in der Additiven Fertigung wie in keiner anderen Fertigungstechnologie zukünftig das gesamte Knowhow von der Konstruktion (3D-CAD-Daten) über die Werkstoffe, Prozessparameter und Nachbehandlungsverfahren digital vorliegt. In der Praxis sind dieser Vision allerdings Grenzen gesetzt (siehe Kapitel 3.5). Nach wie vor müssen Maschinen, Werkstoffe und Personal dezentral vorgehalten werden. Prädestiniert für die Anwendung der dezentralen Fertigung ist die Luftfahrt: Sie ist charakterisiert durch einen globalen Ersatzteilbedarf, lange Produktlebenszyklen, hohe Lagerkosten und die Notwendigkeit, die Zeit der Flugzeuge am Boden zu minimieren. Überall auf der Welt müssen Flugzeugersatzteile vorrätig gehalten werden, um im Bedarfsfall schnell ausgetauscht werden zu können. Zukünftig könnten einzelne Ersatzteile bei Bedarf lokal gefertigt und verbaut werden, wenn Verfahren und Bauteile Zulassungsbedingungen erfüllen können. Dies senkt Lager- und Transportkosten und reduziert die Wartezeiten in der Instandsetzung. Gefördert wird diese Entwicklung durch unterentwickelte Transportinfrastrukturen, was für viele Drittweltländer gilt. Hier kann sich selbst die Herstellung von einfachen Objekten mit Additiver Fertigung lohnen und neue Wertschöpfungsstrukturen schaffen. Durch 3D4D (3D for Development) können so dringend benötigte, einfache Gebrauchsgüter (z. B. Laborequipment) nah am Ort der Verwendung hergestellt werden [Hom16].

Diese unterschiedlichen Faktoren wirken sich auch als starke Treiber auf die den Prozessen der Additiven Fertigung zugrunde liegenden Fügeprinzipien aus. Besonders bei sicherheitsrelevanten Bauteilkomponenten werden sehr hohe Anforderungen an die Pulverform, chemische Zusammensetzung sowie Reinheit der zugrundeliegenden Werkstoffe gestellt.

Charakteristika für den wirtschaftlichen Einsatz der Additiven Fertigung

- Geringe Stückzahlen (derzeit etwa <1000 Stück pro Jahr)
- Kleine Bauteilabmessungen
- Einsatz teurer oder konventionell schwer zu verarbeitender Werkstoffe
- Bauteile oder Komponenten sind zu schwer
- Hohe Kosten durch (geplante und ungeplante) Stillstandszeit von komplexen Produktionsanlagen
- Hoher Zerspanungsgrad bei konventioneller Konstruktion
- Sehr lange Produktentwicklungszeiten durch z. B. Werkzeugbau
- Hohe Betriebskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten (vgl. Flugzeug)
- Dezentraler Ersatzteilbedarf
- Einschränkungen der Konstruktion durch konventionelle Fertigungstechnologien (vgl. Wärmetauscher) – Geometrien, die anders nicht herzustellen sind
- Kundenindividuelle Sachleistungen (vgl. Hörgeräte)
- Konventionell aufwändige mehrstufige Fertigungsprozesse (vgl. Hörgeräte)
- Mehrstufige Montageoperationen von Einzelteilen aus demselben Werkstoff (vgl. *General Electric* Einspritzdüse – Kapitel 3.2)

Entwicklung in heutigen Anwendungsfeldern

Die Additive Fertigung wird sich in den etablierten Anwendungsfeldern weiter durchsetzen, vorausgesetzt, die kritischen Erfolgsfaktoren der Technologie werden erfüllt (siehe Kapitel 3.5). Der vorausgesagte Verdrängungswettbewerb mit anderen Technologien wird jedoch größtenteils ausbleiben; zu unterschiedlich sind die Leistungsprofile der Technologien. So wird die Additive Fertigung zum Beispiel in der **Luftfahrt** weiter an Raum gewinnen und dort im Wesentlichen für die sogenannte Sekundärstruktur verwendet werden (das heißt Anbauteile am tragenden Flugzeugrumpf) [Woh16]. Die wesentlichen Vorteile der Additiven Fertigung in der Luftfahrt werden auch in Zukunft der Leichtbau und die Reduktion der sog. buy-to-fly ratio sein: Das Verhältnis aus beschaffter Werkstoffmenge und der Werkstoffmenge der Komponenten im Einsatz. Dabei gilt es auch die Energiebilanz zur Herstellung von Pulvern im Vergleich zu Massivmaterial ins Kalkül zu ziehen. Zukünftig könnte es möglich sein, Leiterbahnen und einfache Elektronikkomponenten bereits während des Herstellungsprozesses in Bauteile zu integrieren. In der **Raumfahrt** werden zukünftig Bauteile direkt im All gebaut, so kann der begrenzte Raum von Trägerraketen besser genutzt werden [Del14a].

In der **Automobilindustrie** wird die Additive Fertigung derzeit selten zur Herstellung von Endbauteilen verwendet, jedoch seit Langem zur Herstellung von Prototypen und Montagehilfen. Insbesondere die geringe Produktivität und hohe Investitionskosten verhindern hier derzeit die Anwendung der Technologie für Serienbauteile. Zukünftig könnten auch ausgewählte Anbauteile additiv gefertigt werden, z. B. Instrumententafeln und eingebettete Elektronikbauteile [Del14b]. Wenn die von der Automobilindustrie geforderten Preissenkungen für Maschinen und Werkstoffe sowie die Steigerung der Aufbauraten tatsächlich von den Maschinenherstellern sukzessive erreicht werden können, dann wird in der Automobilindustrie, vom Premiummodellen startend bis hin zu Volumenmodellen, bis 2035 Additive Fertigung in großem Maßstab eingesetzt.

Auch in der **Medizin- und Dentaltechnik** wird die Nutzung der Technologie weiter voranschreiten, insbesondere zur Herstellung von Prothesen, Orthesen, Zahnkronen, Implantaten und medizinischen Geräten [EOS13], [Woh16].

Entstehen neuer Anwendungsfelder

Neben den etablierten Anwendungsfeldern erwarten Experten, dass Additive Fertigung zukünftig auch neue Bereiche durchdringt (mit diesen Themen wird sich Band II der Stellungnahme unter Federführung der Leopoldina detailliert befassen):

In naher Zukunft werden Maschinen der Additiven Fertigung genutzt, um mikroskopisch kleine Gegenstände herzustellen – dies wird gemeinhin als **Nanoprinting** bezeichnet [RAE13]. Bereits heute ist es durch Additive Fertigung möglich, die Funktionalität kompletter Laboreinrichtungen auf Kreditkartengröße zu skalieren (sog. lab-on-a-chip). Dies ermöglicht es zum Beispiel in entlegenen Gebieten schnell Diagnosen für Krankheiten zu stellen [Hom16]. In der Medizin werden Anwendungen von der Herstellung von menschlichem Gewebe bis hin zum vollständigen Organ erarbeitet (sog. **Bioprinting**).

In der **Architektur** wird die Additive Fertigung bereits seit Jahren zum schnellen Bau von Modellen verwendet. Auf diese Weise lassen sich komplexe Architekturmodelle von Gebäuden und ganze Städtebaumodelle anfertigen, was die ganzheitliche Beurteilung architektonischer Entwürfe erleichtert [Sto13]. Es entstehen derzeit bereits die ersten schichtweise gebauten Häuser [Woh16], [RAE13]. Aktuelles Beispiel ist ein in Dubai gefertigtes Bürohaus, mit 250 m² Nutzfläche [Nic16].

Für das **Bauingenieurwesen** hat Kalifornien weltweit eine Vorreiterrolle übernommen: Dort wird bereits seit mehr als 10 Jahren der praktische Einsatz von Additiver Fertigung zum Häuserbau (sog. Contour Crafting) erprobt und kontinuierlich verbessert [Kho04], [Mol13-ol]. Beim Contour Crafting handelt es sich um eine Abwandlung des Strangablegeverfahrens, bei dem Betonstränge punktgenau abgelegt werden können. Forscher erhoffen sich davon, dass mit Hilfe dieses Verfahrens zukünftig Zeit- und Kostenvorteile durch Material-, Gewichts- und Energieeinsparungen beim Häuserbau realisiert werden können.

Auch im Bereich der **Kunst und Kultur** etabliert sich Additive Fertigung zunehmend. Der Entwurf und die Modellierung von Kunstobjekten am Computer unter Zuhilfenahme von CAD-Software sowie CAD-Scannern findet unter Künstlern immer öfter Anhänger [Mon16], [Pan13-ol]. Ebenfalls wird Additiver Fertigung vielfach bei der Herstellung von Repliken verschollener, verwitterter, absichtlich oder unabsichtlich zerstörter Gemälde oder Kunstgegenstände angewendet, insbesondere in der Archäologie.

Daneben zeichnen sich auch für Spezialanwendungen mit geringen Stückzahlen und hohen Lebenszykluskosten für den Endkunden (TCO: Total Cost of Ownership) erhebliche Nutzenpotenziale ab, die durch die erwartete technologische Entwicklung ausgeschöpft werden könnten. So ist davon auszugehen, dass Additive Fertigung zum Beispiel auch im **Sondermaschinenbau** (niedrige Stückzahlen, geringer Zertifizierungsaufwand von Bauteilen und Fertigungsprozessen) zur Anwendung kommt. Ferner ist zu erwarten, dass auch Branchen mit Kataloggeschäft und traditionell hohen Stückzahlen, wie zum Beispiel die **mechanische Verbindungstechnik,** Additive Fertigung für die Herstellung von Varianten mit geringen Stückzahlen (zum Beispiel Spezialverbinder) nutzen und so neue Marktsegmente erschließen [Wor14a]. Auch in der **Kälte- und Klimatechnik** werden Anwendungen erprobt. So hängt z. B. die Effektivität von Wär-

metauschern im Wesentlichen von ihrer Geometrie und dem genutzten Werkstoff ab. Der Gestaltung von Wärmetauschern sind jedoch durch klassische Fertigungsverfahren Grenzen gesetzt. Durch Additive Fertigung könnte es zukünftig möglich sein, den Wirkungsgrad von Wärmetauschern deutlich zu erhöhen [MW15-ol].

In der **Elektronikindustrie** ergeben sich zukünftig viele Nischen, in denen Additive Fertigung wirtschaftlich genutzt werden kann. Es handelt sich um Anwendungen mit geringen Stückzahlen und hohem Potenzial für Funktionsintegration. So werden z. B. Tonabnehmer für Schallplatten mit Hilfe des SLM™ Verfahrens hergestellt. Durch geschickte Gestalt des Bauteils können ungewollte Vibrationen vermieden werden, ohne den Tonabnehmer unnötig schwer auszulegen [Ort16-ol]. Seit einigen Jahren wird auch das Einbringen von Leiterbahnen in massive Bauteile durch Additive Fertigung erforscht – auf diese Weise könnten Sensoren an unzugänglichen Stellen platziert werden [GWP13], [Woh16]. Derzeit steht dieser Vision die mangelnde Verfügbarkeit von leitfähigen und isolierenden Werkstoffen, die auf derselben Maschine zu einem kombinierten Bauteil verarbeitet werden können, entgegen.

Auch die **Mineralölindustrie** kann von Additiver Fertigung profitieren: Selbst kürzeste Ausfälle von Förderprozessen verursachen hier hohe Kosten. Darüber hinaus müssen Ersatzteile (z. B. Rohrverbinder) weltweit vorrätig gehalten werden, um im Bedarfsfall schnell verbaut werden zu können. Zukünftig wäre es denkbar, geeignete Ersatzteile direkt vor Ort herzustellen [Woh16].

In den meisten Anwendungsfeldern wird sich Additive Fertigung als ergänzende Fertigungstechnologie etablieren; nur in Ausnahmefällen substituiert sie bestehende Technologien. Von der Substitution betroffen sind weniger die Hersteller standardisierter Massenprodukte, da deren Fertigungsprozesse sehr ausgereift sind, sondern vielmehr Hersteller, die handwerkliche Prozesse ausführen [FLT14]. Ein radikales Beispiel für den schnellen Wandel stellt die **Hörgeräteindustrie** dar – in etwa 500 Tagen ist die ganze Branche in den USA auf Additive Fertigung umgestiegen [Dav15]. Die Herstellung von Hörgerätegehäusen war bis vor kurzem ein sehr aufwändiger, verketteter Prozess, bei dem verschiedene Verfahren zum Einsatz kamen, wie zum Beispiel der Schleuderguss [Del14c]. Durch Additive Fertigung konnte dieser Prozess drastisch verkürzt werden: Zunächst wird ein Abdruck der Ohrmuschel angefertigt; dieser wird im Anschluss von einem Laser abgetastet, digitalisiert und von einer additiven Fertigungsanlage hergestellt. Die Elektronik wird erst im Anschluss in den dafür vorgesehenen Hohlraum eingebracht.

Die Beispiele zeigen, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt Akteure aus vielen Branchen nach Anwendungen der Additiven Fertigung suchen. Es ist daher zu erwarten, dass die Technologie in Zukunft auch in sehr verschiedenen Anwendungsfeldern zum Einsatz kommt.

4.3 Entwicklungsoptionen in Wertschöpfungsnetzen

Wie in Kapitel 3.3 dargelegt, sind um den Kernprozess der Additiven Fertigung Wertschöpfungsnetze mit vielfältigen Rollen entstanden. Für die Veränderung von Wertschöpfungsnetzen lassen sich gemäß Abbildung 4-1 drei wesentliche Entwicklungsoptionen erkennen. Für die Entwicklungsoptionen Verdrängung und Erweiterung lassen sich gegenwärtig bereits Beispiele anführen.

Verdrängung: Neue Akteure besetzen bekannte Rollen

Mit zunehmender Industrialisierung der Additiven Fertigung steigen etablierte

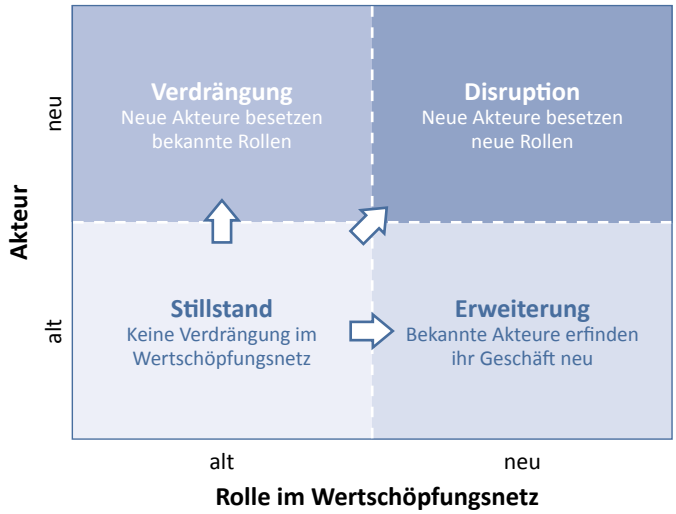


Abbildung 4-1: Entwicklungsoptionen in Wertschöpfungsnetzen (Quelle: eigene Darstellung)

Player aus dem Maschinen- und Anlagenbau in die Branche ein. Sie nutzen Kompetenzen aus anderen Branchen, um neue Maschinen zu entwickeln oder bestehende zu verbessern und zu automatisieren. Ein Beispiel dafür sind Unternehmen aus dem 2D-Druck: Sie bieten im gewerblichen Bereich Maschinen für Additive Fertigung an. Der Einstieg von *Hewlett Packard* in diesen Markt war nur der Anfang einer Reihe weiterer Markteintritte. Additive Fertigung zieht aber auch Akteure fernab des Maschinenbaus an. Unternehmen, die Schnittstellenkompetenz beweisen und die Logistik oder den (End-) Kundenzugang kontrollieren, nutzen insbesondere im Konsumentengeschäft ihre Schlüsselposition aus. Vorstellbar wäre folgendes Szenario: Mit Auslösen der digitalen Bestellung verteilen Online-Versandhäuser Fertigungsaufträge an Logistikdienstleister. Diese nutzen ihre dezentrale Fertigungsinfrastruktur und liefern das Produkt aus, soziale Netzwerke dienen als Plattform für den Austausch von Daten und Modellen. Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, steigen auch Softwarehersteller, wie *Autodesk* in die Additive Fertigung ein. Da das wesentliche Know-how bei der Technologie digital vorliegt, könnte Softwareherstellern zukünftig eine höhere Marktmacht zukommen, als dies bei vergleichbaren Fertigungstechnologien der Fall ist.

Erweiterung: Bekannte Akteure erfinden ihr Geschäft neu

Im Wettbewerb von morgen werden die heutigen Akteure immer mehr Fertigungsstufen im eigenen Unternehmen wahrnehmen (Vorwärts- und Rückwärtsintegration). Obwohl es keinen allgemeingültigen Zusammenhang zwischen der Wertschöpfungstiefe und dem Unternehmenserfolg gibt, kann davon ausgegangen werden, dass die durchschnittliche Wertschöpfungstiefe je Unternehmen eher steigen wird. Grund für diese Annahme ist, dass die Fokussierung meist in den späten Phasen der technologischen Reife zunimmt, wenn es schwieriger wird, sich durch Produktinnovationen zu differenzieren [Deu14]. Als Beispiel für eine derartige Erhöhung der Wertschöpfungstiefe kann *materialise* angeführt werden. Ursprünglich handelt es sich bei dem Unternehmen um einen Fertigungsdienstleister, der seine Wertschöpfungsaktivitäten über Softwareherstellung, Betreiber eines Online-Shops sowie digitale Web-Services erweitert hat. Das Unternehmen agiert somit nicht mehr nur als klassischer Fertigungsdienstleister, sondern als vollständiger Befähiger für Geschäftsmodelle von Partnern. Diese können sich dadurch auf Kundeninteraktion und das Produktdesign konzentrieren und erhalten Echtzeitzugriff auf additive Fertigungskapazitäten. Auch *trinckle 3D* wurde ursprünglich als Plattformbetreiber und Dienstleister gegründet. Mittlerweile bietet das Unternehmen eine cloudbasierte Software zur Individualisierung von CAD Daten an. Das Unternehmen hat also ebenfalls seine Wertschöpfungstiefe erhöht. Auch die geplante Übernahme der Maschinenhersteller *Concept Laser* und *arcam* durch *General Electric* kann der Entwicklungsoption Erweiterung zugewiesen werden, war doch *General Electric* bisher Kunde für die Maschinen der genannten Anbieter [Reu16-ol].

Disruption: Neue Akteure besetzen neue Rollen

Im Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung entstehen völlig neue Rollen, welche

von neuen Akteuren besetzt werden. Dabei können die neu geschaffenen Rollen in anderen Branchen bereits etabliert sein. Eine visionäre Idee für eine solche Rolle wäre ein Crowdsourcing-Maschinenentwickler: In offenen Ideenwettbewerben lädt er Interessierte dazu ein, neue Maschinenkonzepte zu entwerfen oder bestehende Maschinen weiterzuentwickeln. Fertig entwickelte Maschinen werden vom Kunden unter Anleitung von Fachpersonal montiert. So könnten anspruchsvolle Maschinen geschaffen werden, welche den Anforderungen der gewünschten Anwendung uneingeschränkt gerecht werden. Theoretische Basis dafür ist das Konzept „Bottom-Up-Ökonomie“ [Red11]. Ein vielzitiertes Beispiel für die Anwendung dieses Konzepts ist der US-amerikanische Automobilhersteller *Local Motors*, der es Laien ermöglichen will, Autos zu entwickeln und diese in lokalen Fabriken (sog. Micro-Factories) zu fertigen [LM16-ol]. Im Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung widerstrebt diese Idee der dominanten Marktlogik: Maschinen und Anlagen für industrielle Additive Fertigung werden von einzelnen Akteuren oder in geschlossenen Entwicklungspartnerschaften entwickelt. Weiterhin ist nicht klar, ob die wesentlichen Erfolgsfaktoren, 1) heterogene Kundenanforderungen an eine Maschine und 2) Bewältigung der technologischen Komplexität, zukünftig erfüllt sind.

Disruptionen lassen sich nur schwer antizipieren. Sie werden von neuartigen Technologien getrieben (Technology Push), bzw. beruhen auf Ideen, welche als Cross-Industry-Innovationen Branchengrenzen überwinden [Ech14]. Innerhalb der nächsten fünf Jahre sind derartige Disruptionen eher unwahrscheinlich. Grund dafür ist, dass die wesentlichen Leistungsparameter der Technologie (Produktivität, Zuverlässigkeit etc.) zunächst durch Akteure in bekannten Rollen (siehe Abbildung 3-17) weiterentwickelt werden. Vorerst werden Verdrängung und Erweiterung die dominierenden Entwicklungsoptionen sein.

4.4 Geschäftsmodelle

Der Technologie Additive Fertigung wird oftmals attestiert, dass sich durch sie bestehende Geschäftsmodelle nachhaltig verändern und sogar völlig neue Geschäftsmodelle entstehen (vgl. Kapitel 3.4) [RS14], [RB15], [BHB16], [KPM14]. Allerdings hat sich dies bisher noch nicht bestätigt. Zum Einfluss der Additiven Fertigung auf zukünftige Geschäftsmodellinnovationen lassen sich im Kern zwei Beobachtungen festhalten [FLT14]:

Erprobte Geschäftsmodelle anderer Branchen werden weiter adaptiert

Die Wettbewerber differenzieren sich bislang primär über Produktinnovationen – das heißt Maschinen und Anlagen werden in ihrer Leistungsfähigkeit gesteigert. Der noch relativ niedrige Reifegrad der Technologie begünstigt dies. Geschäftsmodellinnovationen werden derzeit nur zögerlich vorangetrieben; eher scheinen Geschäftsmodelle zunächst anhand von bewährten Mustern aus anderen Branchen innoviert zu werden. Ein Beispiel dafür ist das Unternehmen *Stratasys*, das ein auf dem Muster „Razor and Blade“ basierendes Geschäftsmodell verfolgt; das Unternehmen erzielt einen beträchtlichen Umsatzanteil durch den Verkauf von teurem Filament. Ein weiteres Beispiel für ein adaptiertes Geschäftsmodell ist der Aufbau eines Systemgeschäfts ausgehend von Maschinen der Additiven Fertigung: So bietet der Hersteller *3D Systems* neben Werkstoff und Maschine eine Konstruktionssoftware, einen Druckservice sowie einen Online-Shop für CAD-Modelle an. Ferner lassen sich sogenannte komplementäre Geschäftsmodelle beobachten. Dies sind Geschäftsmodelle, die für sich allein nicht tragfähig sind, jedoch ein anderes Geschäftsmodell verstärken. Ein Beispiel dafür ist die Online-Plattform *thingiverse*, die vom Maschinenhersteller *Stratasys* betrieben wird. Auf dieser werden CAD-Modelle kostenlos zum Download angeboten, um so den Erwerb von Konsumentenmaschinen zu fördern [FLT14], [JKP16].

Additive Fertigung als Katalysator für Geschäftsmodellinnovationen

Auch wenn es sich aktuell nicht abzeichnet, könnten durch die Additive Fertigung durchaus völlig neue Geschäftsmodelle entstehen und zukünftig auch in anderen Branchen adaptiert werden. Grund dafür ist, dass durch Additive Fertigung prinzipbedingt Rüstzeiten weitgehend entfallen. In Folge kann Mass Customization auch in Märkten realisiert werden, in denen dies aufgrund traditioneller Verfahren nicht möglich war; ebenso können sich Produktlebenszyklen verkürzen, da der Wechsel von einer Produktvariante zur nächsten kostengünstiger möglich wird. Des Weiteren können Anwender der Technologie theoretisch sehr viele Märkte bedienen und in ihnen jeweils unterschiedliche Geschäftsmodelle erproben: Geschäftsmodelle zur Additiven Fertigung könnten im Sinne von Trial and Error schnell auf Tauglichkeit überprüft werden und bei Erfolg in andere Märkte übertragen werden [RS14], [PS13]. Der Begriff „Cross Industry Business Model Innovation" bringt das zum Ausdruck. Im Folgenden ein einfaches Beispiel: Im Sinne einer Marktentwicklung bietet ein Hersteller von Halterungen und Zahnrädern seine Produkte zukünftig auch für kleine Sondermaschinenbauer an. Dabei nutzt er unterschiedliche Geschäftsmodelle: Zur Herstellung individueller Halterungen bindet er den Kunden in den Entwicklungsprozess mit ein, beispielsweise über eine Online-Plattform. Zahnräder hingegen werden mittels klassischer Auftragsfertigung hergestellt.

4.5 Prognostiziertes Marktwachstum und Förderinitiativen

Wie in den zurückliegenden Kapiteln dargestellt, sind für die Additive Fertigung in Zukunft eine deutliche technologische Leistungssteigerung sowie neue Märkte und Anwendungsfelder zu erwarten. Das folgende Kapitel beziffert das prognostizierte Marktwachstum der Additiven Fertigung und stellt dar, welche Förderinitiativen zur Etablierung der Additiven Fertigung existieren.

Prognostiziertes Marktvolumen

Der Markt der Additiven Fertigung ist seit dem Jahr 2000 mit durchschnittlich 15,6 Prozent im Vergleich zum Vorjahr gewachsen – von 2013 auf 2014 sogar mit 35,2 Prozent. Im Jahr 2015 wurden weltweit 4,5 Milliarden Euro mit Produkten und Dienstleistungen im Kontext der Additiven Fertigung umgesetzt. Dies umfasst Maschinen, Werkstoffe sowie Umsätze aus Dienstleistungen im Industrie- wie im Konsumentenbereich [Woh16]. Einzelne Maschinenhersteller konnten so im Geschäftsjahr 2015 die Anzahl der Auftragseingänge für Maschinen um bis zu 65 Prozent steigern [SLM16-ol].

Diese Wachstumszahlen beflügeln Prognosen hinsichtlich des zukünftigen Marktvolumens der Additiven Fertigung. Einer Studie der Unternehmensberatung *Roland Berger* zufolge wird sich das globale Marktvolumen der Technologie im Jahr 2020 auf etwa 6 Milliarden Euro belaufen [RB15]. Die Unternehmensberatung *Wohlers Associates* hingegen schätzt das Marktvolumen im Jahr 2020 sogar auf 19,1 Milliarden Euro [Woh15]. Offensichtlich existieren noch erhebliche Unsicherheiten in den Prognosen. Noch 2011 ging *Wohlers Associates* von einem globalen Marktvolumen von 4,6 Milliarden Euro für das Jahr 2020 aus [Woh11]. Einer Schätzung des McKinsey Global Institutes zufolge beträgt der gesamtvolkswirtschaftliche Einfluss durch Additive Fertigung bis zu 480 Milliarden Euro bis 2025 [CSS14-ol].

Obwohl sich die Schätzungen des Marktvolumens in den Veröffentlichungen um Additive Fertigung stark unterscheiden, besteht jedoch Einigkeit darin, dass das globale Marktvolumen der Additiven Fertigung auch zukünftig weiter stark wachsen wird.

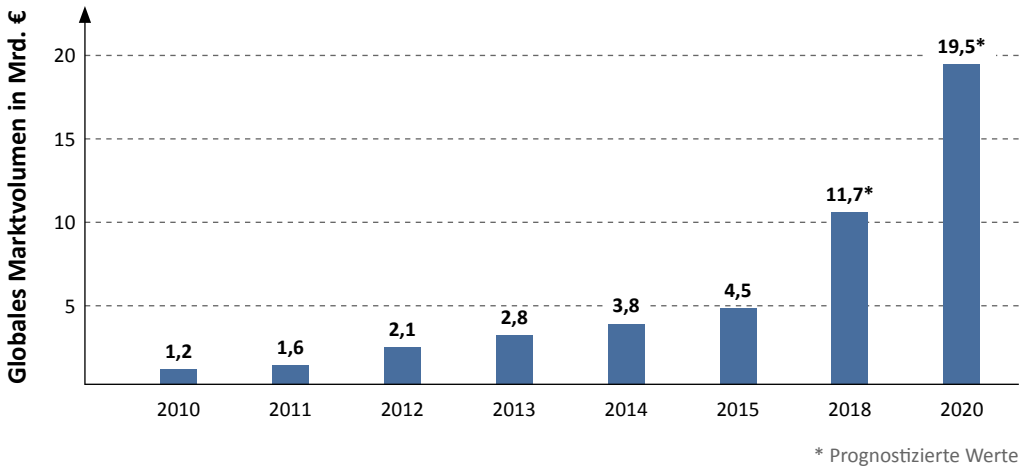


Abbildung 4-2: Globales Marktvolumen der Additiven Fertigung (Quelle: [Woh16])

Förderinitiativen in Deutschland und im internationalen Vergleich

Mehrere Länder sehen in der Additiven Fertigung ein wichtiges Innovationsfeld zur Sicherung ihres Wohlstandes und unterstützen deshalb die einheimische Industrie mit erheblichen Fördermitteln [Ens14], [EFI15]. Gerade Länder, die in den letzten Jahrzehnten die Zukunft im Dienstleistungssektor gesehen haben, betrachten mittlerweile die Additive Fertigung als einen zentralen Baustein für die Re-Industrialisierung [Ens14].

Deutschland

In Deutschland wurden in den letzten Jahren mehrere Ausschreibungen zur Additiven Fertigung, sowohl im Fachbereich Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, als auch in der Produktionsforschung veröffentlicht. So fördert die Ausschreibung „Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D)“ Forschungs- und Entwicklungsprojekte in beiden Fachbereichen. Im Rahmen des Regionalförderprogramms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung ferner im Projekt „Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter (Agent 3D)“ Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungsinstitutionen in Ostdeutschland [Bmb13-ol], [Bmb15-ol]. Der Sonderforschungsbereich 814 – Additive Fertigung startete im Jahr 2011 und ist 2015 mit rund 10 Millionen Euro Förderung durch die DFG in die zweite Förderphase eingetreten [SFB16-ol]. Auch in DFG-Schwerpunktprogrammen (z. B. SPP 1542: Leicht Bauen mit Beton) ist Additive Fertigung in Teilprojekten enthalten.

In den BMBF-Rahmenprogrammen „Vom Material zur Innovation“ und „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ werden im „M-era.Net II“ Call 2016 im Themenschwerpunkt „Materialien für die Additive Fertigung“ transnationale Forschungsprojekte in länderübergreifenden Kooperationen europäischer Forschergruppen aus Wirtschaft und Wissenschaft gefördert. Europaweit stehen für den Call ca. 40 Millionen Euro zur Verfügung.

EU

Nach Ansicht der EU-Kommission ist Additive Fertigung ein Treiber des digitalen Wandels in Europa und bietet die Chance, den produzierenden Sektor in Europa zu stärken [EFI15]. 2012 wurde die Additive Fertigung in der „Industrial Policy Communication“ der Europäischen Kommission als einer der wichtigsten Bestandteile der „Industrial Landscape Vision 2025“ hervorgehoben [EK12-ol]. Im Europäischen Rahmenprogramm FP7 förderte die

EU mehr als 60 Projekte mit 160 Millionen Euro. Im EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizon 2020“ zählt die Additive Fertigung zu den Key Enabling Technologies (KETs) [Tor14].

USA

Die USA fördern neben der industriellen Anwendung Additiver Fertigung auch das sogenannte Maker Movement. Das 2012 gestartete „National Network of Manufacturing Innovation“ (NNMI) beinhaltet *America Makes*, eine öffentlich-private Partnerschaft, die mit etwa 50 Millionen Dollar ausgestattet ist. Im Februar 2014 wurde ein zweites nationales Forschungslabor „Digital Lab for Manufacturing“ gegründet, das eine staatliche Startfinanzierung von 70 Millionen US-Dollar erhält [Ens14]. Mit weiterer Förderung aus Industrie, Hochschulen und öffentlichen Geldern soll das Institut insgesamt mit 320 Millionen Dollar ausgestattet werden. Ein Schwerpunkt ist auch die Additive Fertigung [MH14-ol]. Einen Einblick in die US-amerikanische Förderung liefert der Bericht des Institutes for Defense Analyses, der die Rolle der National Science Foundation (NSF) bei der Entwicklung der Additiven Fertigung in den USA beschreibt [IDA13-ol]. Förderung erfahren ebenfalls Projekte im Bereich Contour Crafting von Gebäudestrukturen an der Southern University of California [Kho04], nicht zuletzt deshalb, weil die dort entwickelte Fertigungstechnologie langfristig für die Raumfahrt nutzbar gemacht werden soll.

China

China befürchtet, dass es durch die Re-Industrialisierung in den USA und Europa als Produktionsstandort an Attraktivität verlieren könnte [EFI15]. Daher versucht die Regierung eine starke heimische Industrie aufzubauen. Für drei Jahre investiert die Regierung insgesamt 245 Millionen US-Dollar in Institute der staatlich geförderten *Asian Manufacturing Association* und in mehrere chinesische Universitäten [Ens14].

5 Thesen

Im folgenden Kapitel werden 21 Thesen zur Additiven Fertigung dargelegt und erläutert. Bei den Thesen handelt es sich um Befunde, die sich im Wesentlichen aus der Analyse der Ausgangssituation und den erwarteten Entwicklungen ergeben. Sie stellen die Ergebnisse der Kapitel 3 und 4 prägnant dar. Die Thesen bilden die Grundlage zur Formulierung von Handlungsempfehlungen (Kapitel 6). Zunächst werden Thesen zu den industriellen Rahmenbedingungen dargelegt (Kapitel 5.1). Es folgen Thesen zu den Bereichen Technologie (Kapitel 5.2), Wertschöpfungsnetze (Kapitel 5.3) und gesellschaftsrelevanten Aspekten (Kapitel 5.4).

5.1 Rahmenbedingungen

These 1: Additive Fertigung und Industrie 4.0 verstärken sich gegenseitig.

Unter Industrie 4.0 wird die Ad-hoc-Vernetzung von intelligenten Maschinen, Betriebsmitteln, Produkten/Werkstücken sowie Lager- und Transportsystemen via Internet zu leistungsfähigen Wertschöpfungsnetzen verstanden. Mithilfe der intelligenten, digital vernetzten Systeme wird eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion möglich. So sollen individuelle Produkte in geringen Stückzahlen bis hin zu Losgröße 1 zu Kosten der Massenproduktion in kürzester Zeit hergestellt werden können.

Additive Fertigung und Industrie 4.0 haben eine Schnittmenge an gemeinsamen Fähigkeiten, wie zum Beispiel ein hoher Individualisierungs- und Vernetzungsgrad sowie hohe Energie- und Ressourceneffizienz. Die Integration von Verfahren der Additiven Fertigung unterstützt wesentliche Charakteristika von Industrie 4.0, wie Ad-hoc-Konfigurieren von Wertschöpfungsnetzen, Mass-Customization sowie Logistik- und Materialflussinnovationen. Dementsprechend wird die Kombination von Additiver Fertigung und Industrie 4.0 die Individualisierung und Flexibilisierung der industriellen Produktion im weiteren Sinne stark befeuern.

These 2: Additive Fertigungsverfahren sind heute sehr Know-how-intensiv; die wesentliche Herausforderung liegt in der Beherrschung des Daten-Tripels:

- **Digitale 3D-Modelle**
- **Werkstoffrezepturen und**
- **Prozessparameter**

Wesentliche Eingangsgrößen der Additiven Fertigung sind 3D-Modelle, Werkstoffrezepturen und Prozessparameter. 3D-Modelle beschreiben die Gestalt des herzustellenden Bauteils; Werkstoffrezepturen und Prozessparameter, wie Laserintensität und Scangeschwindigkeit, beeinflussen die Bauteileigenschaften. Im Hinblick auf die geforderten Bauteileigenschaften und die Reproduzierbarkeit kommt es auf richtige Kombinationen der drei Eingangsgrößen an, die sich gegenseitig beeinflussen; dazu ist erhebliches Erfahrungswissen notwendig. Eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Additiver Fertigung ist es, Wissensmanagement als Lernprozess zu etablieren und den entsprechenden Zyklus aus Externalisierung, Kombination, Internalisierung und Sozialisation auch in der Unternehmenskultur zu verankern [NT97].

These 3: Bauteile können nah am Ort der Verwendung hergestellt werden; transportiert wird das Daten-Tripel.

Für produzierende deutsche Unternehmen kann zukünftig ein strategischer Vorteil in der Wettbewerbsfähigkeit erzielt werden, wenn durch additive Fertigungstechnologien die Produktion flexibel und effizient gestaltet werden kann. Anstatt Bauteile zu lagern, können diese im Bedarfsfall am Ort der Verwendung hergestellt werden unter der Voraussetzung, dass Maschinen und Werkstoffe verfügbar sind. So können beispielsweise Lagerhaltungskosten, Wiederbeschaffungszeiten und Lieferwege reduziert werden. Die benötigten Daten liegen in der Regel zentral in Clouds oder auf Unternehmensservern ab und werden an den Ort der Verwendung gesendet oder gestreamt.

These 4: Additive Fertigung setzt sich nur dann durch, wenn die Bauteile definierte Qualität stets erreichen und die Qualität reproduzierbar ist.

Die Technologie ist noch relativ jung und in hohem Maße von individuellem Erfahrungswissen geprägt. Additive Fertigung wird sich nur dann durchsetzen, wenn es gelingt, Qualität zu definieren und diese stets und wiederholbar zu erzeugen. Das erfordert ein tiefes Verständnis des Wirkgefüges der Fertigungssysteme auf der Basis von mathematischen Modellen bzw. auf verhaltensbasierten Modellen der künstlichen Intelligenz.

These 5: Produktpiraten konzentrieren sich vermehrt auf das Daten-Tripel.

Die Kopie eines physischen Produkts ist aufwändig und im Resultat häufig minderwertig. Daten hingegen sind ohne Qualitätsverlust unbegrenzt kopierbar. Besitzen Produktpiraten das gesamte Daten-Tripel, ist die Erstellung eines qualitativ hochwertigen Imitats deutlich aufwandsärmer; vorausgesetzt, die Fälscher sind im Umgang mit den Fertigungstechnologien ausgebildet. Daher rückt das Daten-Tripel in den Fokus von Produktpiraten und Wettbewerbern. Obwohl dieses Problem prinzipiell auch auf andere Produktionsmethoden zutreffen könnte ist es in der Praxis vor allem bei der Additiven Fertigung relevant, da hier zukünftig das gesamte Knowhow der Prozesskette im Datentripel vollständig digitalisiert vorliegt.

These 6: Die neuen Möglichkeiten der Gestaltungsfreiheit erfordern Gestaltungsrichtlinien.

Die Gestaltungsmöglichkeiten gehen weit über die der klassischen Fertigungsverfahren hinaus, gleichwohl gibt es bei der Additiven Fertigung verfahrensspezifische Grenzen. Gestaltungsrichtlinien helfen Konstrukteuren, Produkte so auszulegen, dass die Vorteile der Additiven Fertigung im vollen Umfang ausgeschöpft und nachteilige Strukturen vermieden werden. Entsprechende Ansätze finden sich bereits in den VDI Richtlinien 3404 und 3405; sie geben einen guten Überblick über die derzeitigen Möglichkeiten der Additiven Fertigung. Bestehende Gestaltungsrichtlinien haben jedoch oft nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich und sind nicht ohne weiteres auf individuelle Bauteilgestalten übertragbar [Ada15].

These 7: Innovations-Lethargie und unlauterer internationaler Wettbewerb bedrohen Deutschlands Spitzenposition als Leitanbieter von Additiver Fertigung.

Besonders im Zusammenhang mit der Additiven Fertigung nehmen mittelständische deutsche Maschinenhersteller international eine technologische Spitzenposition ein. Die hohe industrielle Nachfrage können sie derzeit kaum bedienen. Weiterentwicklungen der Verfahren sowie die engere und abgestimmte Kopplung zwischen Werkstoff und Prozessfortschritten scheinen vor diesem Hintergrund eine untergeordnete Rolle zu spielen. Es reicht einigen Akteuren am Markt, die bestehenden Anlagen lediglich inkrementell zu verbessern. Durch technologische Schlüsselpatente sind die etablierten Maschinenhersteller vor neuen

Wettbewerbern geschützt, Markteintritte sind oft nur durch Kreuzlizensierung von Patenten möglich. International entstehen derzeit jedoch neue Konkurrenten, u. a. durch massive staatliche Förderungen. Diese sind eng verknüpft mit eigenen Forschungsinstituten und ignorieren dabei mitunter wesentliche Patente der etablierten Akteure. Gelingt es deutschen Maschinenherstellern und Werkstoffentwicklern nicht, gleichzeitig mit dem Marktwachstum Schritt zu halten und die Verfahren signifikant weiter zu verbessern sowie zu einer intensiveren Integration von Werkstoffentwicklung, Reinheitsverbesserung und Prozessen zu gelangen, drohen ihnen internationale Wettbewerber langfristig den Rang abzulaufen.

5.2 Technologie

These 8: Additive Fertigung eröffnet neue Gestaltungsmöglichkeiten.

Der schichtweise Aufbau eliminiert prinzipiell Einschränkungen konventioneller Verfahren, wie zum Beispiel die Zugänglichkeit für abtragende Werkzeuge oder die Entnehmbarkeit aus einer Form. Dadurch können komplexe Geometrien und Hohlstrukturen in einem Schritt hergestellt werden, die konventionell aus vielen Einzelteilen zusammengefügt werden müssen. Unvermeidlich ist jedoch der Treppenstufeneffekt, analog zu Pixelstufen in 2D. Je nach Technologie stößt die Additive Fertigung an weitere Grenzen: Überhänge benötigen beispielsweise oft Stützstrukturen, um entweder die Gravitation oder Eigenspannungen, die von Temperaturgradienten herrühren, zu kompensieren; Stützen müssen nach dem Aufbau wieder entfernt werden und dafür zugänglich sein. Design to Additive Manufacture ist also nur verfahrensspezifisch und unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette sinnvoll möglich. Zur prozessgerechten Konstruktion sind bisher nur wenige grundlegende Faustregeln veröffentlicht.

These 9: Die Prozessketten in der Additiven Fertigung unterscheiden sich von denen anderer Fertigungsverfahren.

Die Prozessketten der Additiven Fertigung werden besonders stark durch Daten geprägt. Physisch vorhandene formgebende Werkzeuge als Träger von Gestalt und Prozess-Know-how, wie beispielsweise im Kunststoff-Spritzgießen, existieren in der Additiven Fertigung nicht. Für die speziellen Gegebenheiten der digitalisierten Schritte in der Additiven Fertigung existieren bisher keine Standards bzw. Instrumente, die mit Lösungen für andere Fertigungstechnologien vergleichbar wären. Das gilt im Wesentlichen für Datenschutz für alle Beteiligten, Ausfallsicherheit, Sicherheit gegen Manipulationen Dritter, Nachverfolgbarkeit, Datenkonsistenz und Interoperabilität bei heterogenem Maschinenpark.

These 10: Additive Fertigung hat sich in Spezialfeldern durchgesetzt; Defizite gegenüber Konkurrenztechnologien stehen der weiteren Verbreitung entgegen.

In Nischen hat sich die Additive Fertigung bereits etabliert. Gleichwohl bestehen erhebliche Wachstumschancen. Je nach Anwendungsfall muss sich die Additive Fertigung mit konventionellen Produktionstechnologien hinsichtlich der Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeitaufwand messen lassen. Ein wichtiges Kriterium ist die effiziente Fertigung hoher Stückzahlen, bei dem traditionelle Fertigungsverfahren noch überlegen sind. Darüber hinaus ist das Einhalten von Qualitätsmerkmalen eine entscheidende Zielgröße, die gerade bei höheren Stückzahlen ausschlaggebend ist. Auch hier sind weitere Potenziale der Additiven Fertigung zur erschließen, wie etwa durch geschlossene Regelkreise für den Additiven Fertigungsprozess und der Offenheit der gesamten Prozesskette vom CAD-System zum numerischen Steuerungscode für die Additive Fertigungsmaschine.

These 11: Die Variation von Werkstoffrezepturen und Prozessparametern ermöglicht spezifische Bauteileigenschaften.

Charakteristisch für alle additiven Fertigungsverfahren ist ein definiertes Zusammenspiel von Werkstoff und Prozessbedingungen, die maßgeblich von der Anlagentechnik, der prozessgerechten Werkstoffentwicklung und der Reinheit der zugeführten Werkstoffe sowie der Verfahrensumgebung bestimmt werden. Daraus resultierende Produkteigenschaften entscheiden über die möglichen Einsatzgebiete und die Konkurrenzfähigkeit gegenüber der konventionellen Fertigung. Die publizierten Erkenntnisse über die ausschlaggebenden Zusammenhänge liegen bei vielen additiven Technologien weit hinter dem Erfahrungswissen der einschlägigen Unternehmen zurück. Teils sind auch Ansätze von Monopolen zu beobachten, die die Verbreitung des Wissens nicht fördern. Des Weiteren ist es noch nicht möglich, sog. Multimaterialbauteile aus wichtigen Konstruktions- und Funktionswerkstoffen simultan additiv herzustellen. Eine vielversprechende Vision ist die Herstellung von Objekten mit gradierten Eigenschaften, wonach für jedes Raumelement nicht mehr nur binär zwischen Material oder keinem Material gewählt werden kann, sondern auch Abstufungen nahezu beliebiger Werkstoffeigenschaften (zum Beispiel elektrische, optische, mechanische oder chemische) angegeben werden können.

5.3 Wertschöpfungsnetze

These 12: Additive Fertigung sorgt für eine starke Veränderungsdynamik in Wertschöpfungsnetzen. Charakteristika wie Marktleistungen (Sach- und Dienstleistungen), Angebot und Nachfrage, Ziele und Macht der Akteure sowie das Auftauchen neuer Akteure in der Wettbewerbsarena werden sich erst noch herausbilden.

Additive Fertigungsverfahren entwickeln sich ständig weiter. Dadurch ergeben sich neue Wertschöpfungsimpulse für Unternehmen und Kooperationsnetzwerke. Die Unternehmensprozesse Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung sind künftig enger vernetzt. Die entsprechenden starken Abhängigkeiten der Wertschöpfungsbereiche verändern die Strukturen der Wertschöpfungsnetze zur Additiven Fertigung. Auf diese Weise können Lagerkapazitäten reduziert und Durchlaufzeiten verkürzt werden. Darüber hinaus ergeben sich möglicherweise neue Geschäftsmodelle wie „AM as a service“ durch Dienstleister in der Ersatzteillogistik. Dies wird das Ringen um Wertschöpfungsanteile verstärken. Die neuen industriellen Endanwender sind über die Chancen dieser Entwicklung noch nicht voll im Bilde. Des Weiteren wird die starke Veränderungsdynamik auf der Ebene additiv gefertigter Bauteile und Produkte zu neuen Akteuren in der Wettbewerbsarena führen. Neuartige Produkte sowie die Möglichkeiten Bauteile individuell und in Losgröße 1 wirtschaftlich zu fertigen, lassen eine relativ zuverlässige Produktionsprogrammplanung kaum zu.

These 13: Additive Fertigung revolutioniert in bestimmten Bereichen das Ersatzteilwesen, insbesondere die Ersatzteillogistik.

Ein Vorteil der Additiven Fertigung liegt in der örtlichen Unabhängigkeit der Produktion. Hieraus entstehen Vorteile in der Ersatzteilfertigung. Heute werden Ersatzteile oft über weite Distanzen beschafft, falls sie für ältere Modelle überhaupt noch verfügbar sind. Die Additive Fertigung ermöglicht eine Produktion der Ersatzteile in Kundennähe oder im Falle von einzelnen und nicht zu großen Ersatzteilen eine Produktion beim Kunden selbst. So lassen sich Ausfallzeiten und -kosten verringern. Es müssen lediglich die 3D-CAD-Modelle sowie die Datensätze für Werkstoffrezepturen und Maschinenparameter digital transferiert werden, um dann an einem beliebigen Ort weltweit mittels einer additiven Fertigungsanlage hergestellt zu werden.

These 14: Die Digitalisierung der Prozessketten fördert neue Geschäftsmodelle.

Die Prozessketten zur additiven Fertigung erlauben den Vergleich mit den Mechanismen und dem Vorgehen aus anderen digital geprägten Industrien, beispielsweise der digitalen Musik- oder Filmindustrie. Die Erschaffung neuer Online-Plattformen für industrielle Zwecke und den Privatgebrauch stellt hohe Anforderungen an die gesamte Daten- und Informationsverarbeitung. Diese Online-Plattformen ermöglichen einen Marktplatz für 3D-CAD-Modelle, Werkstoffrezepturen sowie Prozessparameter, welche über einen einmaligen Download bzw. Kauf oder über ein Streaming-Abonnement bezogen werden können, ähnlich wie bei digitalen Musikmedien oder Filmen. Hier gilt es Fragen hinsichtlich der Sicherheit, Urheberrechten sowie Standardisierung zu klären. In der digitalen Musikindustrie wurden diese Aspekte beispielsweise bereits bei der Einführung und dem Handling mit dem MP3-Datenformat beantwortet und Standards gebildet. Um den Herausforderungen auch bei der Additiven Fertigung zu begegnen, werden Hersteller von Fertigungsanlagen, Entwickler und Anwender eng zusammenarbeiten müssen, um so eine durchgängige, standardisierte Informationslogistik des Daten-Tripels zu gewährleisten. Hierdurch wird ein Kompetenznetzwerk entstehen, welches Expertise hinsichtlich Sicherheit, Datenschnittstellen, Flexibilität und Interoperabilität über die gesamte Wertschöpfungskette aufweisen wird.

These 15: Lieferanten von Bauteilen, die nicht maßgeblich an deren Entwicklung beteiligt sind, sind leicht austauschbar.

Die Basis für Additive Fertigung bilden digitale 3D-CAD-Modelle, Werkstoffrezepturen sowie die Fertigungsanlage mit den relevanten Parameterwerten. Durch die Digitalisierung dieses Datensets, die in der Additiven Fertigung deutlich weiter automatisiert ist als in traditionellen Fertigungsmethoden, können Fertigungsdienstleistern Differenzierungsmöglichkeiten verloren gehen. Die Folge ist, dass Fertigungsdienstleister zunehmend austauschbar sind. Dem kann durch ein Engagement in der fertigungsgerechten, auf Additive Fertigung fokussierten Bauteilentwicklung und –konstruktion entgegengewirkt werden, weil diese Know-how-intensiv ist, fertigungsbezogenes Wissen enthält und hier das Datenset kreiert wird.

These 16: Additive Fertigung birgt in Kombination mit Industrie 4.0 ein großes Geschäftspotenzial für neuartige Marktleistungen.

Um additive Fertigungsverfahren am Markt einzuführen und zu etablieren, muss das Vertrauen der Anwender in die Verfahren gewonnen werden. Hier können neue Dienstleistungen der Anlagenhersteller und -anbieter helfen. So könnte z. B. ein Maschinenhersteller additiver Fertigungsanlagen einem Unternehmen, das Strukturbauteile fertigt, Bauteile in einem ersten Schritt additiv fertigen. Hierdurch erfährt das belieferte Unternehmen neue Möglichkeiten und Wege für seine Produktion. Auf diese Weise werden die Eintrittsbarrieren in die neue Fertigungstechnologie erheblich reduziert und eine Vertrauensbasis für die Vereinbarung innovativer Leistungen auf Basis neuer Geschäftsmodelle geschaffen. Beispielsweise kann durch die Verbindung von Industrie 4.0-Lösungsansätzen und Additiver Fertigung ein hybrides Leistungsbündel gebildet werden, mit dem auf der Basis von intelligenten Fertigungsmaschinen eine vorausschauende Wartung angeboten wird. In der Folge würden sich eine Steigerung der Verfügbarkeit und eine hohe Kundenbindung ergeben.

5.4 Gesellschaftsrelevante Aspekte

These 17: Die ganzheitliche ökonomische, ökologische und soziale Bilanzierung von Additiver Fertigung wird noch nicht durchgeführt.

Additive Fertigungsverfahren versprechen gegenüber konventionellen Verfahren

vielfältige Effizienzsteigerungen, bezüglich der Kosten sowie des Werkstoff- und Energieeinsatzes. Additive Fertigung ermöglicht aufgrund größerer Freiräume bei der Wahl der Produktgestalt und der einfachen Herstellung von Leichtbaustrukturen eine Materialeinsparung von bis zu 60 Prozent im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungstechnologien. Was die Nutzung der Erzeugnisse angeht, reduzieren leichtere Bauteile die bewegten Massen, was im Falle von Verkehrsmitteln zu einem geringeren Energiebedarf führt. Ferner ergeben sich auch Möglichkeiten zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen. Um die Nutzenpotenziale der Additiven Fertigung zu erschließen, benötigen die Unternehmen ein Instrumentarium zur ganzheitlichen Bilanzierung der positiven und negativen Effekte der Additiven Fertigung.

These 18: Konzertierte, strategiegeleitete Forschungsaktivitäten erhalten die Position Deutschlands in der Weltspitze.

Die Forschung zur Additiven Fertigung hat in den letzten Jahren weltweit stark zugenommen. In Deutschland existieren eine Vielzahl von Forschungsprogrammen, Ausschreibungen, Schwerpunktprojekten, Gremien und Konsortien, die die Additive Fertigung adressieren. Vorhandene Kompetenzen relevanter Fachgebiete sollten gebündelt und weiße Flecken in der Forschungslandschaft sollten identifiziert werden. Es sollte deshalb eine Strategie entwickelt werden die darlegt, wie durch eine Bündelung der F&E-Kräfte des Landes eine führende Stellung in weltweitem Wettbewerb erhalten und ausgebaut werden kann.

These 19: Additive Fertigung erfordert eine konzertierte Aktion in schulischer, beruflicher und akademischer Aus- und Weiterbildung.

Für neue Technologiefelder ist die Gewinnung von Arbeitskräften naturgemäß besonders schwierig, da sich die Berufsbilder erst abzeichnen und die neuen Technologien in den Bildungsinstitutionen nicht voll etabliert sind. Der Mangel an Fachkräften betrifft das gesamte Wertschöpfungsnetz und behindert die breite Anwendung von Additiver Fertigung. Auf dem Weg zur Überwindung dieser Situation sollten auch Visionen wie „Jeder wird zum Designer“ Beachtung finden. Ferner ist auch mehr denn je der Produktlebenszyklus bereits in der Produktplanung und -entwicklung zu antizipieren, um die Anforderungen und Randbedingungen des Wettbewerbs von morgen zu erkennen. Die Digitalisierung und der schnelle Wissenszuwachs stellen weitere Anforderungen an zukünftige Berufsbilder. Vor diesem Hintergrund ist ein Masterplan von den wesentlichen Stakeholdern zu erarbeiten und umzusetzen, der die gesamte Bandbreite schulischer, beruflicher und akademischer Aus- und Weiterbildung auf dem Gebiet Additive Fertigung umfasst.

These 20: Additive Fertigung verändert Qualifizierungsprofile von Fachkräften.

Das Qualifizierungsprofil von Fachkräften in der industriellen Produktion, insbesondere von Facharbeitern erweitert sich in Richtung des Einsatzes und der Bewertung von Additiver Fertigung. Diese Entwicklung wird durch die zwei Treiber Kundenorientierung und Lebenszyklusbetrachtung bestimmt. Für die Kundenorientierung ergeben sich neue Gestaltungsfelder aus der Digitalisierung der industriellen Wertschöpfung und der zunehmenden Vernetzung von Unternehmen mit Kunden. Eine Lebenszyklusbetrachtung in den Dimensionen Ökonomie, Ökologie und sozio-technische Gestaltung eröffnet neue Perspektiven und Erfolgspotenziale für die industrielle Wertschöpfung von morgen.

These 21: Trotz hoher Popularität kommt Additive Fertigung im privaten Sektor aus einem Schattendasein nicht heraus.

Den Entwicklungen der Kundenseite, wie „Mass Customization“, zunehmende Variantenvielfalt und Nachfrage nach individuellen Produkten kann mit Additiver Fertigung begegnet werden und führt zu einer

hohen Popularität der Technologie. Additive Fertigung bietet den Menschen auf dem ersten Blick neue faszinierende Möglichkeiten an Produktionsprozessen selbst mitzuwirken. Harte Anforderungen an die „privaten Produzenten“, wie Gewährleistung, Produkthaftung, Zertifizierung etc. dämpfen deren Euphorie. Derzeit muss davon ausgegangen werden, dass private Produktion im Vergleich zu industrieller Produktion vernachlässigbar ist.

6 Handlungsempfehlungen

Um die Entwicklung der Technologien zur Additiven Fertigung voranzutreiben, neue Einsatzfelder zu erschließen und die industriellen Anwendungen zu optimieren, lassen sich eine Reihe von Handlungsempfehlungen formulieren. Sie zielen darauf, durch gezielte Forschungsförderung derzeit noch bestehende praktische Hindernisse der Produktionsverfahren zu überwinden, durch eine Etablierung von Normen und Standards Entwicklungsprozesse zu vereinfachen und den Austausch zwischen den verschiedenen Akteuren zu fördern.

Adressaten der Handlungsempfehlungen sind damit neben den staatlichen Institutionen der Forschungsförderung in erster Linie die führenden Unternehmen, in denen Additive Fertigung perspektivisch zunehmend eine Rolle spielen wird. Diese können nicht nur mit eigener Forschung zur Entwicklung von Werkstoffen und Verfahren beitragen, ihnen kommt vor allem die Aufgabe zu, bereits frühzeitig notwendige Infrastrukturen zu schaffen, um die neuen Verfahren möglichst effizient in ihre Produktionsprozesse einzubinden. Die Politik kann durch die Schaffung von geeigneten Bedingungen für junge Start-Up Unternehmen und durch die Anpassung von Schul- und Ausbildungscurricula, ein geeignetes Umfeld für zukünftige Entwicklungsprozesse etablieren. Insgesamt wäre es förderlich, wenn sich Forschung und Industrie in diesem Bereich stärker miteinander vernetzen würden. Hierzu können auch normgebende Institutionen wie DIN/ISO beitragen.

Forschung

Um die Produktivität der Additiven Fertigung zu steigern und die Defizite gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren zu reduzieren, sollten Produktionsprozesse, Werkstoffe und Bauteileigenschaften erforscht werden und entsprechendes Wissen in die Anlagentechnik einfließen.

Der Maschinenstundensatz industrieller additiver Fertigungsanlagen ist im Vergleich zu konventionellen Verfahren sehr hoch. Weiterhin reichen Bauteilfestigkeit und -qualität additiv gefertigter Produkte nur in Ausnahmen an konventionell gefertigte Bauteile heran. Auch das Werkstoffverhalten variiert und ist noch nicht in der Tiefe erforscht. Das sind Haupthindernisse auf dem Weg zur wirtschaftlichen industriellen Anwendung mit größeren Stückzahlen und qualitativ hochwertigen Bauteilen. Andererseits sind die Technologien noch längst nicht ausgereizt. Die Anwender der Technologie insbesondere in der Automotive- und Luftfahrtbranche haben bereits Pläne für die Produktion in großen Serien ausgearbeitet.

Konkrete, verfahrensübergreifende Gestaltungsrichtlinien sollten systematisch erforscht werden, um die neuen Möglichkeiten der Gestaltungsfreiheit auszunutzen.

Auch wenn die Gestaltungsfreiheit der Additiven Fertigung groß ist, stößt sie an gewisse Grenzen, zum Beispiel durch eventuell nötige Stützstrukturen und die Notwendigkeit von Nacharbeiten am Bauteil. Gezieltes Design für Additive Fertigung hängt vom Verfahren ab und muss die gesamte Prozesskette berücksichtigen. Neben wenigen grundlegenden

Faustregeln gibt es zur prozessgerechten Konstruktion bisher keine Richtlinien. Diese müssen geschaffen werden und zusammen mit dem zugrunde liegenden Erfahrungswissen in die einschlägige Aus- und Weiterbildung übernommen werden.

Neue Datenformate für Additive Fertigung sollten kurzfristig entwickelt werden.

Das derzeitige Standard-Dateiformat .STL weist Mängel auf, da bei der Konvertierung von 3D-CAD Daten wichtige Informationen verloren gehen und Inkonsistenzen auftreten können. Dies bedingt oft umfangreiche Nacharbeiten am Datensatz. Ferner existieren viele proprietäre Datenformate, um Informationen zu transportieren, die in .STL nicht speicherbar sind. Im Vorfeld der Standardisierung von Datenformaten sind konzertierte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten erforderlich. Neue Datenformate müssen Interoperabilität zwischen Geräten unterschiedlicher Hersteller gewährleisten und Zugänglichkeit von Informationen für den Anwender sicherstellen. Ferner muss eine Anbindung an bestehende IT-Systeme (PDM, ERP) möglich sein. Nur wenn diese Anforderungen erfüllt sind, kann breite Akzeptanz auf industrieller Ebene und in der Maker-Community geschaffen werden. Mit neuen, offenen Datenformaten, z. B. .3MF, gibt es bereits Bemühungen in dieser Richtung.

Das Veränderungspotenzial und die Auswirkungen Additiver Fertigungsverfahren auf Wertschöpfungsnetze, Wirtschaft und Gesellschaft sollten analysiert werden.

Die Analysen sollten vor- und nachgelagerte Fertigungsprozesse, die Produktnutzung und das Recycling umfassen. Aufgrund veränderter Wertschöpfungsstrukturen sind soziale, ökonomische und ökologische Nachhaltigkeitspotenziale hinsichtlich einer dezentralen und bedarfsorientierten Herstellung von Produkten zu bewerten. Ein Beispiel ist die Reduktion von kostenintensiver Lagerhaltung und Logistik bei der Ersatzteilversorgung.

Umsetzung

Das Daten-Tripel aus digitalen 3D-Modellen, Werkstoffrezepturen und Prozessparametern ist zu standardisieren.

Die von industriellen Anwendern geforderten Verbesserungen von Produktivität und Bauteilqualität erfordern langfristig ein standardisiertes und allgemein akzeptiertes Datenformat, das 3D-Modelle, Werkstoffrezepturen und Prozessparameter vereint. Ferner müssen treffende Qualitätsmerkmale (z. B. Kennzahlensysteme) für Additive Fertigung erarbeitet werden. Nur so ist u.a. die Qualifizierung von Daten, Werkstoffen, Prozessen und Bauteilen möglich. Teilweise fehlt auch heute noch das technisch-physikalische Verständnis von Additiven Fertigungsverfahren, so dass ein erheblicher Forschungsbedarf zur Erzeugung des Daten-Tripels besteht. Gelingt die Verbreitung des angestrebten Daten-Tripels, ist die Erstellung eines hochwertigen Imitats durch Produktpiraten deutlich aufwandsärmer. Für den Schutz des Daten-Tripels sind daher die Identifizierung des individuellen Bedrohungspotenzials und die Realisierung ganzheitlicher Schutzkonzeptionen essenziell.

Additive Fertigung benötigt dedizierte Methoden und Verfahren zur Qualitätssicherung.

Zum Nachweis der Qualität von Bauteilen müssen Methoden und Verfahren zum Messen, Testen und Prüfen entwickelt werden. In diesem Zuge müssen relevante Prozessbedingungen zunächst identifiziert und dann überwacht und in laufenden Prozessen auf der Basis eines Prozessmodells geregelt werden.

Umsetzung von Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung beschleunigen.

Ein Ansatz ist die Intensivierung der vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschung durch den Bund und die Industrie. Ferner kann der Aufbau von Demonstrationszentren und Technologieclustern in den Bundesländern den Transfer in die

Praxis stark fördern. So können durch erfolgreiche Pilot-Implementierungen und branchenspezifische Anwendungen die Chancen und Risiken sowie die heute schon mögliche Breite der Anwendungen aufgezeigt werden. Ein weiterer konkreter Ansatzpunkt ist die Umsetzung großer Verbundprojekte im Rahmen von Public-private-Partnerships. Last but not least ist zu überprüfen, ob es in der in Deutschland relativ schwach ausgeprägten Gründerszene Potenziale für die Verbesserung von Additiver Fertigung gibt.

Für Additive Fertigung werden Konzeptionen für die Integration in umfassende klassische Produktionssysteme benötigt.

Die Integration von Additiven Fertigungsverfahren in bestehende Fertigungsprozesse muss auf der Entwicklung von Standardroutinen, prozessorientiertem Qualitätsmanagement und neuen Maschinensystemen für eine robuste Fertigung basieren. Ein zentraler Aspekt ist die Anhebung des Automatisierungsgrads der Maschinen und Anlagen der Additiven Fertigung auf das heute und in Zukunft erwartete Niveau der klassischen Fertigungssysteme. Dabei spielt sicher auch die sich abzeichnende Entwicklung der industriellen Wertschöpfung im Kontext Industrie 4.0 eine wesentliche Rolle.

Schaffung zukunftsorientierter Entscheidungsgrundlagen zur strategischen Planung im Kontext Additive Fertigung.

Sollten Visionen wie die dezentrale Fertigung und das Paradigma „Prosumer“ Wirklichkeit werden, werden sich Wertschöpfungsnetze von Grund auf verändern. Um darauf vorbereitet zu sein, müssen Szenarien für die beteiligten Akteure in veränderten Wertschöpfungsnetzen entwickelt werden. Ferner muss ein Instrumentarium geschaffen werden, das die ökonomische, ökologische und soziale Bilanzierung von Additiver Fertigung ermöglicht. Szenarien und Bilanzierungs-Instrumentarium sind dringend benötigte Entscheidungsgrundlagen für die strategische Positionierung der Akteure in der industriellen Wertschöpfung.

Belebung und Förderung einer dynamischen Start-up-Szene zur Ausschöpfung der hohen Innovationspotenziale von Additiver Fertigung.

Da Deutschland viel Know-How in den Bereichen Produktionsforschung und Industrieautomatisierung besitzt, ist die Ausgangssituation zur Verbesserung bestehender Maschinen und Anlagen gut. Völlig neue Technologien und Geschäftsmodelle der Additiven Fertigung werden aber auf dieser gewachsenen Basis kaum entstehen. Das Potenzial dazu haben sowohl etablierte Akteure aus anderen Branchen als auch Start-ups. Insbesondere im Start-up-Bereich sind stimulierende Maßnahmen und Förderangebote seitens der öffentlichen Fördermittelgeber notwendig, um das Innovationspotenzial auszuschöpfen und eine neue, vitale Unternehmensszene entstehen zu lassen.

Bildung

Klassische Berufsbilder von Facharbeiterinnen und Facharbeitern sollten durch neue Qualifikationen für Additive Fertigungstechnologien erweitert werden.

Additive Fertigung wird zukünftig gleichberechtigt mit anderen Fertigungsverfahren in vielen Branchen zur Anwendung kommen. In Folge muss Additive Fertigung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung verankert werden, wozu zunächst Lehrpersonal für die beruflichen Schulen auszubilden ist. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der schnelle technologische Wandel dar: Digitale Plattformen für Lehre und Lernen sowie neue Ansätze zur Wissensvermittlung wie Massive Open Online Courses (MOOC) sind zu verwirklichen. Ferner ist zu prüfen, ob Zertifikate der Weiterbildung zeitlich zu befristen sind, um der Innovationsdynamik des Technologiefelds Additive Fertigung gerecht zu werden.

Die Potenziale der Additiven Fertigung für die MINT-Ausbildung in den Schulen ausschöpfen.

Additiven Fertigungstechnologien weisen für die schulische Ausbildung erhebliche Potenziale auf. Sie können als anschauliches Vehikel zur Gestaltung und Herstellung von Artefakten eingesetzt werden. Sogenannte living labs, in denen Schülerinnen und Schüler mit 3D-CAD-Systemen und 3D-Druckern für den Home-Anwenderbereich selbst arbeiten können, bieten die Chance, Technik greifbar zu machen und junge Menschen für MINT-Fächer zu begeistern.

Förderpolitik

Forschungsprogramm zur Verwirklichung der Dualen Strategie: Deutschlands Position als Leitanbieter und Leitmarkt für Additive Fertigung festigen.

Bereits heute nehmen Maschinen- und Anlagenhersteller sowie Werkstoffentwickler aus Deutschland international eine Spitzenposition als Anbieter von Additiver Fertigung und der zugrundeliegenden Werkstoffe ein. Zugleich versuchen deutsche Anwenderunternehmen mit Hilfe Additiver Fertigung ihre Wettbewerbsposition zu verbessern. Zukünftig gilt es, Deutschlands Position einerseits als Leitanbieter für Additive Fertigung zu festigen und andererseits die notwendigen Voraussetzungen zu schaffen, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen durch Additive Fertigung zu erhöhen. Die Herausforderungen auf dem Weg dazu wurden in dieser Stellungnahme dargelegt. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert erhebliche und gut abgestimmte Forschungsanstrengungen. Das entsprechende Programm sollte folgende Themenbereiche adressieren:

1) Automatisierung der Prozessketten
2) Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Werkstoff- und Prozesswissenschaften
3) Neue, auf diese Prozesse ausgerichtete Legierungen und thermomechanische Behandlungen
4) Produktivitätssteigerung
5) Standardisierte Ausgangswerkstoffe hoher Reinheit und angepasster Morphologie
6) Qualitätsregelung
7) Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften
8) Gezielte Beeinflussung und Variation der Bauteileigenschaften (gradierte Bauteileigenschaften)
9) Multimaterialverarbeitung
10) Datenintegrität (Datenschutz, Datensicherheit und Datenkonsistenz)
11) Safety und Security in Cyber-Physischen Produktionssystemen
12) Prävention von Produktpiraterie
13) Auswirkungen einer dezentralen Fertigung auf Wertschöpfungsnetze und ganzheitliche Bilanzierung

Beteiligte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler

Mitglieder der Projektgruppe

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn (Projektleitung)
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt	Lehrstuhl für Photonische Technologien, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und Bayerisches Laserzentrum (Projektleitung)
Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl	Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt
Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens	Institut für Werkstoffwissenschaft, Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid	Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik, Universität Paderborn
Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger	Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Frank Straube	Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Petra Winzer	Fachgebiet Produktsicherheit und Qualitätswesen, Bergische Universität Wuppertal

Des Weiteren wurde die Projektgruppe in zwei World-Café-Workshops durch folgende Fachleute unterstützt:

André Batz	Schmersal
Dr.-Ing. Ursula Beller	Technologie-Transfer-Ring Handwerk NRW
Andreas Berkau	citim
Andreas Brumby	Umicore
Dr. Stefan Doch	International Transfer Center for Logistics
Christian Dülme	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler	Technische Universität Berlin
Inga Fischer	Brose Fahrzeugteile
Dr. Dr. Albrecht Fritzsche	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Peter Hoffmann	Erlas Erlanger Lasertechnik
Dr. Klaus Glasmacher	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr.-Ing. Ingomar Kelbassa	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Dr.-Ing. Eric Klemp	voestalpine
Martin Kolbe	Kühne + Nagel
Matthias Kuom	Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Mischa Leistner	Karlsruher Institut für Technologie
Roland Leitermann	Krallmann
Dr. Blanka Lenczowski	EADS
Dr. Felix Loske	Harting

Dr. Bernhard Mais	ECKA Granules Germany
Stefan Marchlewitz	Bergische Universität Wuppertal
Dr.-Ing. Erik Marquardt	Verein Deutscher Ingenieure
Carsten Merklein	Schaeffler Technologies
Piotr Pacholak	Krallmann
Martin Schäfer	Siemens
Heinz Schmersal	Schmersal
Dr. Dieter Schwarze	SLM Solutions
Prof. Dr.-Ing. Frank Straube	Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin
Dr. Alexander Tettenborn	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann	Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Franz-Josef Villmer	Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Dr.-Ing. Marina Wall	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Prof. Gerd Witt	Universität Duisburg-Essen

Ferner unterstützte Herr Prof. Axel Thallemer der National University of Singapore die Projektgruppe. Die Vor- und Nachbereitung der Projektgruppensitzungen und der Workshops oblag dem Projektteam bestehend aus folgenden wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern:

Alexander Arndt	Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt
André Bergmann	Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
Daniel Eckelt	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Dr.-Ing. Anna Figiel	Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin
Anna Lisa Junge	Fachgebiet Logistik, Technische Universität Berlin
Martin Kage	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn
Michael Karg	Lehrstuhl für Photonische Technologien, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr. Martina Kohlhuber	acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Bernd Muschard	Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin
Stefan Peter	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

Externe Gutachterinnen und Gutachter:

Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova	Leiterin des Instituts für Informationsmangement im Ingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe	Leiter des Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) in Aachen, Professor für Lasertechnik an der RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt	Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Institut für Produkt Engineering an der Universität Duisburg Essen

Die Arbeitsgruppe "Additive Fertigung und 3D-Druck" unter Federführung der Leopoldina hat die vorliegende Stellungnahme ausführlich kommentiert. Besonderer Dank gilt dem Projektleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dierk Raabe (MPI für Eisenforschung), Herrn Dr. Eric Jägle (MPI für Eisenforschung) und Frau Dr. Elke Witt (Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft).

Literaturverzeichnis

[Ada15] Adam, G.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additive Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers, Band 1, Paderborn, 2015

[AI15-ol] Additive Industries: Metal Fab 1 Industrial Additive Manufacturing System. Unter: http://additiveindustries.com/Industrial-am-systems/Metalfab1, letzter Zugriff: 30. November 2015

[BBM+14] Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Ganschar, O.: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, Studie, Fraunhofer IAO und Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., 2014

[BER+12] Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: Additive Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufcaturing. Europa Lehrmittel Verlag, 1. Auflage, 2013

[BHB16] Bogers, M.; Hadar, R.; Bilberg, A.: Additive Manufacturing for Consumer-centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing. In: Technological Forecasting & Social Change, Vol. 102, S. 225-239

[Bmb13-ol] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter. Unter: http://www.unternehmen-region.de/de/7649.php, letzter Zugriff: 3. März 2016

[Bmb15-ol] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bekanntmachung „Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien (ProMat_3D)“. Unter: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=1037 , letzter Zugriff: 3. März 2016

[BLW03] Burschel, C., Losen D. Wiendl, A.: Nachhaltige Entwicklung und ökonomische Theorie – Eine Skizze der Anschlussmöglichkeiten und Grenzen; In: Umweltwirtschaftsforum; 11; 2003/3

[CMM+14] Conner, B.P.; Manogharan, G.P.; Martof, A.N.; Rodomsky, L.M.; Rodomsky, C.M.M Jordan, D.C.; Limperos, J.W.: Making Sense of 3-d Printing: Creating a Map of Additive Manufacturing Products and Services. In: Additive Manufacturing, Vol. 1, 2014

[CL16a-ol] Concept Laser: X line 2000® is Impressing the Market. Unter: http://newsroom.concept-laser.com/news/cl/article/detail/x-line-2000rR-is-impressing-the-market.html, letzter Zugriff: 6. Januar 2016

[CL16b-ol] Concept Laser: New M2 Cusing. Unter: http://newsroom.concept-laser.com/news/cl/article/detail/new-m2-cusing.html, letzter Zugriff: 5. Januar 2016

[CSS14-ol] Cohen, D.; Sargeant, M.; Somers, K.: 3-D Printing Takes Shape. Unter: http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/3-d-printing-takes-shape, 2014, letzter Zugriff: 25. August 2016

[Dav15] D'Aveni: The 3-D Printing Revolution. In: Harvard Business Manager, Mai 2015

[Del14a] Deloitte: 3D Opportunity in Aerospace and Defense – Additive Manufacturing Takes Flight, 2014

[Del14b] Deloitte: 3D Opportunity in the Automotive Industry, 2014

[Del14c] Deloitte: 3D Opportunity in Medical Technology – Additive Manufacturing Comes to Life, 2014

[Deu14] Deutskens, C.: Konfiguration der Wertschöpfung bei disruptiven Innovationen am Beispiel der Elektromobilität, Dissertation, RWTH Aachen, Apprimus Verlag, 2014

[DMG15-ol] DMG Mori: Intelligent kombiniert: Laserauftragsschweißen & Fräsen – Generative Fertigung in Fertigteilqualität. Unter: http://de.dmgmori.com/produkte/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d, letzter Zugriff: 30. November 2015

[DYK2003] Dylliick, T.: Konzeptionelle Grundlagen unternehmerischer Nachhaltigkeit. In: Linne, G. und Schwarz, M.: Handbuch Nachhaltige Entwicklung Wie ist eine nachhaltiges Wirtschaften machbar?; Verlag Leske-Budrich; Oplanden 2003

[EK12-ol] Europäische Kommission: Stellungnahme zum Thema „Eine stärkere europäische Industrie bringt Wachstum und wirtschaftliche Erholung, Aktualisierung der Mitteilung zur Industriepolitik. Unter: http://toad.eesc.europa.eu/viewdoc.aspx?doc=ces/ccmi/ccmi108/de/ces1094-2013_00_00_tra_ac_de.doc, letzter Zugriff: 31. März 2016

[Ech14] Echterhoff, N.: Systematik zur Entwicklung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014

[EFI15] Expertenkommission Forschung und Innovation (Hrsg.): Gutachten 2015. Berlin 2015

[Ens14] Ensthaler, J.; Grimm, T.; Günther, B.; et al.: Statusreport Additive Fertigungsverfahren September 2014. VDI Verein Deutscher Ingenieure. 2014. S 1-19

[EOS13] EOS Electro Optical Systems: Additive Manufacturing in the Medical Field, 2013

[EOS16-ol] EOS Electro Optical Systems: Werkstoffmanagement für EOS Metallsysteme. Unter: http://www.eos.info/werkstoffmanagement-metall, letzter Zugriff: 6. Januar 2016

[FLT14] Fleisch, E.; Legner, C.; Thiesse, F.: Informationstechnologie-basierte Geschäftsmodelle – Stand und Ausblick, In: Brenner, W.; Hess, T. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik in Wissenschaft und Praxis, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014

[GE13] GE Capital: Additive Manufacturing – Redefining What's Possible, Industry Research Monitor, 2013

[GFC13] Gassmann, O.; Frankenberger, K.; Csik, M.: Geschäftsmodelle entwickeln – 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Busines Model Navigator. Hanser Verlag, München, 2013

[GEK+11] Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Kokoschka, M.; Wall, M.: Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries. Study for the Direct Manufacturing Research Center, Paderborn, 2011

[GEK+12] Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Kokoschka, M.; Wall, M.: Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing – Future Applications. Study for the Direct Manufacturing Research Center, Paderborn, 2012

[GEW13] Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Wall, M.: Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements. Study for the Direct Manufacturing Research Center, Paderborn, 2013

[GK16] Gausemeier, J.; Kage, M.: Innovationsroadmapping am Beispiel der Additiven Fertigung. In: Moehrle, M.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2016

[GWP13] Gausemeier, J.: Wall, M.; Peter, S.: Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing – Exploring the Research Landscape. Study for the Direct Manufacturing Research Center, Paderborn, 2013

[Hom16] Hommel, E.-M.: Fortschritt Marke Eigenbau. In: Technology Review, April 2016

[HMF12] Haberland, C.; Meier, H.; Frenzel, J.: On the Properties of Ni-Rich NiTi Shape Memory Parts Produced by Selective Laser Melting. Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, USA, September 2012

[IDA13-ol] IDA Paper P-5091, The Role of the National Science Foundation in the Origin and Evolution of Additive Manufacturing in the United States, Institute for Defense Analyses, 4850 Mark Center Drive, Alexandria, Virginia, U.S.A. Unter: https://www.ida.org/idamedia/Corporate/Files/Publications/STPIPubs/ida-p-5091.ashx, letzter Zugriff: 24. Juni 2016

[JKP16] Jiang, R.; Kleer, R.; Piller, F.T.: The Future of Additive Manufacturing: A Delphi-based Analysis for 2030. ISPIM Innovation Forum, Boston, 2016

[KAH+15] Karg, M.; Ahuja, B.; Hentschel, O.; Schmidt, M.: Local Hardness Variation of Ti50Cu32Ni15Sn3 Processed by Laser Beam Melting (LBM). In: International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT. Vol. 3, Nr. 1, 2015

[Kar08] Karg, M.: Direktes Metall-Laser-Sintern von strukturoptimierten Implantaten aus 3D-Gittern, Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Medizintechnik, 2008

[Kor10] Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution, John Wiley & Sons, 2010

[Kho04] Khoshnevis, B.: Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. In: Journal of Automation in Construction – Special Issue: The best of ISARC 2002, Vol 13, Issue 1, January 2004, pp 5-19

[KPM14] KPMG: Global Manufacturing Outlook – Performance in the Crosshairs, 2014

[KTH+12] Kempen, K.; Thijs, L.; Van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Mechanical Properties of ALSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. In: Physics Procedia, Nr. 39, S. 439 – 446, 2012

[Levy03] Levy, G. N.; Schindel, R.; Kruth, J.-P.: Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. In: Annals of the CIRP

[LL16] Lachmayer, R.; Lippert, R.B.: Chancen und Herausforderungen für die Produktentwicklung. In: Lachmayer, R.; Lippert, R.B., Fahlbusch, T. (Hrsg.): 3D-Druck beleuchtet, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2016

[LM16-ol] Local Motors – A World Of Vehicle Innovations. Unter: https://localmotors.com/about/, letzter Zugriff: 4. Januar 2016

[MAV14-ol] Onlinemagazin MAV – Innovation in der spanenden Fertigung: Auftragen und Spanen in einer Aufspannung. Unter: http://www.mav-online.de/interview/-/article/32571331/38941447/Auftragen-und-Spanen-in-einer-Aufspannung/art_co_INSTANCE_0000/maximized/, letzter Zugriff: 6. Januar 2015

[MH14-ol] Molitch-Hou, M.: President Obama Announces Two New Advanced Manufacturing Hubs. Unter: http://3dprintingindustry.com/2014/03/03/president-obama-advanced-manufacturing-hubs, letzter Zugriff am 3. März 2016

[Mol13-ol] Molitch-Hou; M.: 3d Printing Industry, The Realization of 3D Printed Houses, September 30, 2013. Unter: http://3dprintingindustry.com/news/university-south-california-realization-3d-printed-houses-17632/, letzter Zugriff: 20. September 2016

[Mon16] Mongeon, B.: 3D Technology in Fine Art and Craft, Exploring 3D Printing, Scanning, and Milling, Focal Press, Burlington, MA 01803, USA, 2016

[MW15-ol] Million-Weaver, S.: 3D-printed Parts Could be Hot New Technology for Keeping Power Plants Cool. Unter: http://phys.org/news/2015-09-3d-printed-hot-technology-power-cool.html, letzter Zugriff: 30. März 2016

[Nic16-ol] Nickel, K.: Unter drei Wochen Bauzeit – In Dubai steht das erste 3D-gedruckte Bürohaus WIRED.de, Condé Nast Verlag GmbH, München, 26.05.2016. Unter: https://www.wired.de/collection/life/unter-drei-wochen-bauzeit-dubai-steht-das-erste-3d-gedruckte-buerohaus, letzter Zugriff: 24. Juni 2016

[NLR+13] Niendorf, T.; Leuders, S.; Riemer, A.; Richard, H.-A.; Tröster, T.; Schwarze, D.: Highly Anisotropic Steel Processed by Selective Laser Melting. In: Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 44, Nr. 4, S. 794-796, 2013

[Ort16-ol] Ortofon: A95 Moving Coil Cartridge. Unter: http://www.ortofon.com/mc-a95-p-155, letzter Zugriff: 30. März 2016

[Pan13-ol] Pander, J.: Ford-Torino-Skultptur, SpiegelOnline Auto. Unter: http://www.spiegel.de/auto/aktuell/kunst-aus-dem-3d-drucker-die-auto-skulptur-des-kuenstlers-ioan-florea-a-928309.html, letzter Zugriff: 24. Juni 2016

[Pil06] Piller, F. T.: Mass Customization – Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. Auflage, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2006

[PS13] Petrick, I.; Simpson, T.W.: 3D Printing Disrupts Manufacturing – How Economies of One Create New Rules of Competition. In: Research-Technology- Management, November-Dezember 2013

[PWC13] PricewaterhouseCoopers: 3D Printing: A Potential Game Changer for Aerospace and Defense. In: GainingAltitute, Issue 7, 2013

[RAE13] Royal Academy of Engineering: Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints. Zusammenfassung der Ergebnisse des Roundtable Forums, 23. Mai 2013

[RAS] Rasch, M.: Konstruktive Gestaltung einer Forschungsanlage für das Laserstrahlschmelzen von Metallen aus dem Pulverbett. Masterarbeit, Lehrstuhl für Photonische Technologien, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

[RB15] Roland Berger: Additive Manufacturing – Opportunities in a Digitalized Production, Präsentation bei der Additive Manufacturing European Conference, Brüssel, 23. Juni 2015

[Red11] Redlich, T.: Wertschöpfung in der Bottom-Up-Ökonomie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011

[Reu16-ol] Reuters: GE Buy Germany's Concept Laser After SLM Bid Fails. Unter: http://www.reuters.com/article/us-ge-3dprinting-germany-idUSKCN12R0JT, letzter Zugriff: 9. November 2016

[RS14] Rayna, T.; Striukova, L.: The Impact of 3D Printing Technologies on Business Model Innovation. In: Digital Enterprise Design & Management, Vol. 261, S. 119-132

[SFB16-ol] Sonderforschungsbereich 814 – Additive Fertigung: Fertigungstechnologien der Zukunft. Unter: http://www.sfb814.forschung.uni-erlangen.de/, letzter Zugriff: 27. April 2016

[Sie14] Siemens AG: 3D Printing: Facts & Forecasts. Unter: http://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/innovation/pictures-of-the-future/industry-and-automation/other-assets/140708_SAG-POF_RelaunchInfographic.jpg.adapt.916.high.jpg/1433337247320.jpg, letzter Zugriff: 7. Januar 2015

[SLM15-ol] SLM Solutions: SLM 500 HL, Produktbeschreibung. Unter: http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_de, letzter Zugriff: am 25. November 2015

[SLM16-ol] SLM Solutions: Annual Report 2015. Unter: http://www.stage.slm-solutions.com/download.php?f=f5978358638f20ee88714034879cdd52, letzter Zugriff: 28. April 2016

[SK14] Schwerdtfeger, J.; Körner, C.: Selective Electron Beam Melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and Aluminium Loss. In: Intermetallics, Nr. 49, S. 29-35, 2014

[Sto13] Stokes, M.B.: 3D Printing for Architects with MakerBot, Pakt Publishing Ltd., ISBN 978-1-78355-075-3, Birmingham B3 2PK, UK

[Str15] Stratasys Direct, Inc.: Trend Forecast – 3D Printing's Imminen Impact on Manufacturing.

[TDD+15] Thallemer, A.; Danzer, M.; Diensthuber, D.; Kostadinov, A.; Rogler, B.: Absolute Designfreiheit durch additiv-generative Fertigung? Vergleich anhand bionischer vs. technischer Pneumatik-Greifer. In: Gausemeier, J.(Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 11. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 29. und 30. Oktober 2015, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 347, Paderborn 2015

[Thi14] Thiesse, F.: Die Zukunft des 3D-Drucks. Präsentation beim Alphaform-Investorentag, Feldkirchen, 5. Februar 2014

[Tor14] Torre, C.: Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014. European Commission. Brüssel. 2014. S. 7

[TSE+15] Tumbleston, J.R.; Shirvanyants, D.; Ermoshkin, N.; Janusziewicz, R.; Johnson, A.R.; Kelly, D.; Chen, K.; Pinschmidt, R.; Rolland, J.P.; Ermoshkin, A.; Samulski, E.T.; DeSimone, J.;M.: Continuous Liquid Interface Production of 3D objects. In: Science Magazine, Vol 347, Issue 6228, 2015

[Thi15-ol] Thimmesch, D.: MIT Develops a Method for 4D Printing Programmed Carbon Fiber & Wood. Unter: http://3dprint.com/19092/mit-self-assembly-4d-print/, letzter Zugriff: 4. Dezember 2015

[VDI14] Verein Deutscher Ingenieure: Statusreport "Additive Fertigung", September 2014

[Wat15-ol] Waterman, P.J.: 3D Printing Thinks Really Big. Unter: http://www.deskeng.com/de/3d-printing-thinks-really-big/, letzter Zugriff: 27. April 2016

[WC13] Wohlers, T.; Caffrey, T.: Additive Manufacturing: Going Mainstream. In: Manufacturing Engineering, Vol. 150, No. 6

[Web16] Weber, L.: Schicht für Schicht. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, Nr 45, 23. Februar 2016, S. T1

[WEG15] Wegner, A.; Harder, R.; Witt, G.; Drummer, D.: Determination of Optimal Processing Conditions for the Production of Polyamide 11 Parts using the Laser Sintering Process. In: International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT

[Woh11] Terry Wohlers: Wohlers Report 2011 – Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry – Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates Inc. 2011

[Woh16] Terry Wohlers: Wohlers Report 2016 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates Inc. 2016

[Wor14a] 1. Workshop der acatech Projektgruppe additive Fertigung, 3. März 2014

[Wor14b] 2. Workshop der acatech Projektgruppe additive Fertigung, 14. Juli 2014

[Yad09] Yadroitsev, I.: Selective Laser Melting: Direct Manufacturing of 3D-Objects by Selective Laser Melting of Metal Powders. Dissertation, Ecole Nationale d' Ingénieurs de Saint Etienne

Abkürzungsverzeichnis

3D-CAD	dreidimensionales Computer Aided Design
3DP	3D-Printing
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AM	Additive Manufacturing (Additive Fertigung)
CAD	Computer Aided Design, rechnerunterstütztes Konstruieren
DLP™	Digital Light Processing™
DMD™	Direct Metal Deposition™
DMLS™	Direct Metal Laser Sintering™
EBAM™	Elektronenstrahlbasierte Additive Fertigung
EBM™	Electron Beam Melting™
ERP	Enterprise Resource Planning
FDM™	Fused Deposition Modelling™
FLM	Fused Layer Manufacturing
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
LBM	Laser Beam Melting
LENS™	Laser Engineered Net Shaping™
LLM	Layer Laminated Manufacturing
LMD	Laser Metal Deposition
LOM™	Laminated Object Modelling™
PC	Polycarbonat
PDM	Produktdatenmanagement
PI	Polyimid
PLA	Polymilchsäure (Polylactic acid)
PMMA	Polymethylmethacrylat
SLA™, STL	Stereolithography
SLM™	Selective Laser Melting™
SLS™	Selective Laser Sintering™
STL	Standard Triangulation Language, Stereolithography oder Surface Tesselation Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Begriffsgebäude der Additiven Fertigung	10
Abbildung 1-2	Der Weg zu den Handlungsempfehlungen	11
Abbildung 3-1	Prozesskette der Datenaufbereitung	13
Abbildung 3-2	Zyklischer Ablauf der Schichterzeugung am Beispiel des Laserstrahlschmelzens	14
Abbildung 3-3	Strangablegeverfahren	16
Abbildung 3-4	Binder-Druck	16
Abbildung 3-5	Schichtlaminieren	17
Abbildung 3-6	Stereolithografie	17
Abbildung 3-7	Harz-Druck	17
Abbildung 3-8	Kunststoff-Laser-Sintern	18
Abbildung 3-9	Laserstrahlschmelzen	18
Abbildung 3-10	Elektronenstrahlschmelzen	18
Abbildung 3-11	Additives Auftragschweißen	19
Abbildung 3-12	Silikongussform für ein Handygehäuse	20
Abbildung 3-13	Links: klassisch gebohrte Kühlkanäle; rechts: konturangepasste Kühlung	20
Abbildung 3-14	Kobalt-Chrom-Gerüste für Zahnprothesen auf Stützstrukturen, hergestellt mit SLM™	21
Abbildung 3-15	Wasserpumpenrad aus dem Motorsport, hergestellt mit SLM™	21
Abbildung 3-16	Einspritzdüse für LEAP-Triebwerk, hergestellt mit SLM™	21
Abbildung 3-17	Generisches Wertschöpfungsnetz der Additiven Fertigung inkl. Befähiger	23
Abbildung 3-18	Erfolgsfaktorenportfolio für das Technologiefeld Additive Fertigung	25
Abbildung 4-1	Entwicklungsoptionen in Wertschöpfungsnetzen	35
Abbildung 4-2	Globales Marktvolumen der Additiven Fertigung	38

Ausgewählte Publikationen der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

Wissenschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung bevölkerungsweiter Längsschnittstudien (2016)

Staatsschulden: Ursachen, Wirkungen und Grenzen (2015)

Mit Energieszenarien gut beraten – Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung (2015)

Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 (2015)

Zur Gesundheitsversorgung von Asylsuchenden (2015)

Chancen und Grenzen des genome editing (2015)

Medizinische Versorgung im Alter – Welche Evidenz brauchen wir? (2015)

Public Health in Deutschland: Strukturen, Entwicklungen und globale Herausforderungen (2015)

Perspektiven der Quantentechnologien (2015)

Akademien nehmen Stellung zu Fortschritten der molekularen Züchtung und zum erwogenen nationalen Anbauverbot gentechnisch veränderter Pflanzen (2015)

Die Energiewende europäisch integrieren – Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik (2015)

Palliativversorgung in Deutschland – Perspektiven für Praxis und Forschung (2015)

Individualisierte Medizin – Voraussetzungen und Konsequenzen (2014)

Akademien fordern Konsequenzen aus der Ebolavirus-Epidemie (2014)

Frühkindliche Sozialisation – Biologische, psychologische, linguistische, soziologische und ökonomische Perspektiven (2014)

Zur Gestaltung der Kommunikation zwischen Wissenschaft, Öffentlichkeit und den Medien – Empfehlungen vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen (2014)

Klinische Prüfungen mit Arzneimitteln am Menschen – Ad-hoc-Stellungnahme zum „Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über klinische Prüfungen mit Humanarzneimitteln und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/20/EG“ (2014)

Tierversuche in der Forschung – Empfehlungen zur Umsetzung der EU-Richtlinie 2010/63/EU in deutsches Recht (2012)

Präimplantationsdiagnostik (PID) – Auswirkungen einer begrenzten Zulassung in Deutschland (2011)

Alle Publikationen der Schriftenreihe sind auf den Internetseiten der Akademien als kostenfreies pdf-Dokument verfügbar.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-867
Fax: (0345) 472 39-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: (089) 52 03 09-0
Fax: (089) 52 03 09-900
E-Mail: info@acatech.de

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: (06131) 218528-10
Fax: (06131) 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-3676-4