

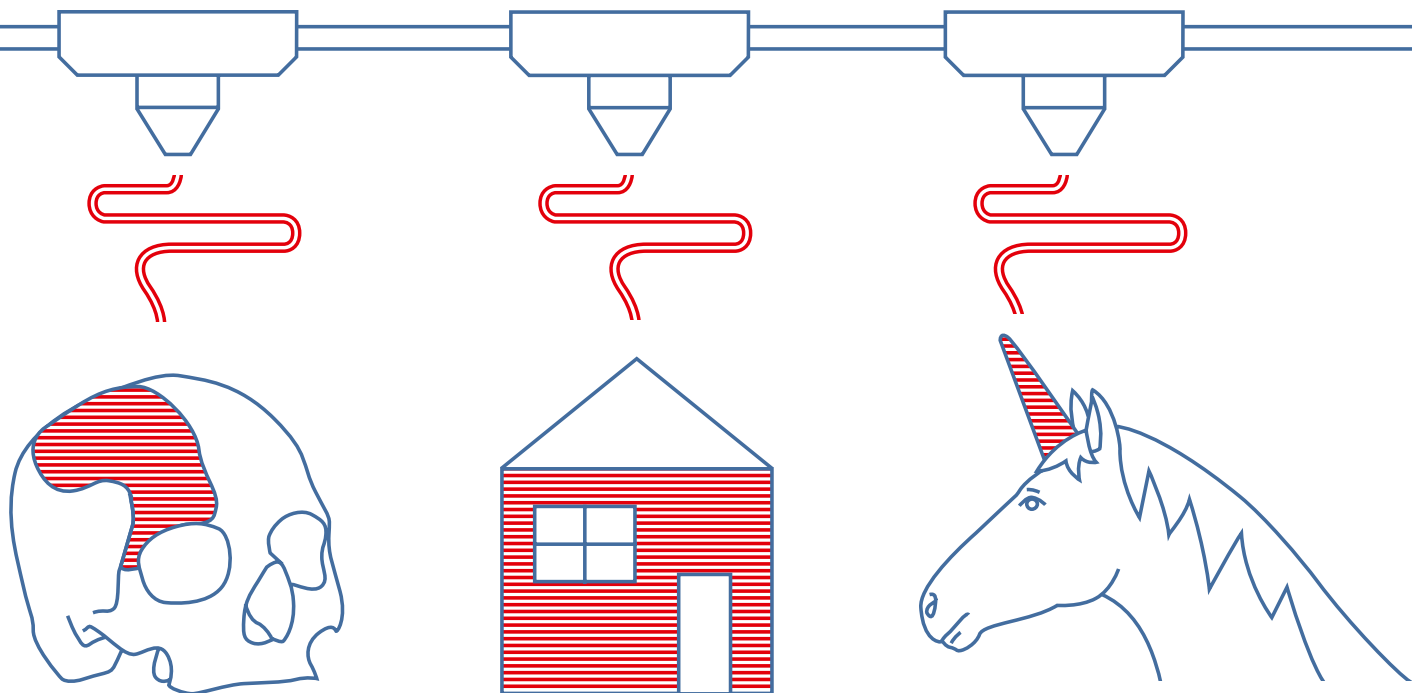


Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



2020
Stellungnahme

Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen



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

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

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
Residenz München, Karolinenplatz 4, 80333 München

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

Redaktion

Dr. Elke Witt, Dr. Christian Anton
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina,
Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft (Leitung: Elmar König)
Kontakt: politikberatung@leopoldina.org

Gestaltung und Satz

unicommunication.de, Berlin

Druck

druckhaus köthen GmbH & Co. KG
Friedrichstr. 11/12
06366 Köthen (Anhalt)

Lektorat

Jürgen Schreiber, TEXTKUSS – Werkstatt für Sprache und Struktur, Halle

Korrektorat

Annette Jünger, Grimma

Grafiken

Titelgrafik: Sisters of Design – Anja Krämer & Claudia Dölling GbR, Halle (Saale)
Infografiken: Sisters of Design – Anja Krämer & Claudia Dölling GbR, Halle (Saale)

ISBN: 978-3-8047-3636-8

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

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2020):
Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen.
Halle (Saale).

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	6
2	Einleitung.....	8
2.1	Verbindende Charakteristika Additiver Fertigungsverfahren	8
2.2	Prozessketten	9
2.2.1	Aufbau der digitalen Objektbeschreibung	9
2.2.2	Planung des additiven Fertigungsprozesses	10
2.2.3	Additive Objektherstellung und Nachbereitung.....	12
2.2.4	Prüfung der Objektqualität	14
3	Systemtechnische Herausforderungen der Additiven Fertigung	15
3.1	Anforderungen an die Software für Objektdesign und -produktion sowie an Konstruktionsparadigmen.....	15
3.1.1	Digitale Datenmodelle für die Gestaltung additiv gefertigter Produkte.....	15
3.1.2	Datenmodellierung zur Vorhersage von Produkteigenschaften.....	17
3.1.3	Datenmodellierung zur Planung des Herstellungsprozesses.....	19
3.1.4	Empfehlungen zur Entwicklung von Simulationsmethoden und Software ...	20
3.2	Anforderungen an Normung, Qualitätssicherung, Zuverlässigkeit und Zulassung	23
3.2.1	Qualitätssicherung, Standardisierung und Simulation	23
3.2.2	Empfehlungen zur Normung und Prüfung	27
3.3	Herausforderungen bei der Synthese neuer Materialien und Materialkombinationen	29
3.3.1	Zentrale Felder der Materialforschung.....	31
3.3.1.1	Rohstoffe	31
3.3.1.2	Hilfsmittel	32
3.3.1.3	Anschließende Prozessierung.....	33
3.3.1.4	Verbundwerkstoffe	33
3.3.1.5	Metamaterialien.....	33
3.3.1.6	Multimaterialien bzw. Werkstoffverbunde.....	34
3.3.1.7	Gradientenwerkstoffe.....	34
3.3.2	Empfehlungen zur Entwicklung neuen Materialien	35
3.4	Herausforderungen bei der Additiven Fertigung von aktiven, multifunktionalen Bauteilen	36
3.4.1	Integration elektronischer Komponenten und Systeme.....	38
3.4.2	Fertigungstechnische Lösungen und Systeme.....	39
3.4.3	Empfehlungen zur Entwicklung multifunktionaler Bauteile.....	40

4	Neue Anwendungsgebiete der Additiven Fertigung.....	42
4.1	Additive Fertigung in der Medizin.....	42
4.1.1	Herstellung patientenindividualisierter Komponenten.....	42
4.1.2	3D-Bioprinting von Gewebeersatz	43
4.1.3	Herstellung von Modellen.....	46
4.1.4	Akzeptanz und ethische Aspekte.....	47
4.1.5	Empfehlungen zur weiteren Etablierung der Additiven Fertigung in der Medizin	48
4.2	Additive Fertigung in der Architektur und im Bauwesen	50
4.2.1	Architekturmodelle	50
4.2.2	Bauwesen / Hochbau und Brückenbau	51
4.2.2.1	Additive Verfahren im Bauwesen	51
4.2.2.2	Anwendungsbeispiele der Additiven Fertigung im Bauwesen	53
4.2.3	Empfehlungen zur Förderung der Additiven Fertigung im Bauwesen.....	54
4.3	3D-Druck für Privatpersonen	57
4.3.1	3D-Druck als Gegenstand visionärer Erwartungen.....	57
4.3.2	3D-Drucker als gemeinschaftlich genutzte Technologie im „Makerspace“ ...	58
4.3.3	3D-Druck als Mittel der Technikkommunikation und Bildung.....	59
4.3.4	3D-Druck als Konsumprodukt.....	60
4.3.5	Die mediale Popularisierung des 3D-Drucks	62
4.3.6	Empfehlungen zur stärkeren Nutzung von Potenzialen der Additiven Fertigung im privaten Bereich	64
4.4	Digitalisierung und Additive Herstellung im Bereich der Archäologie und der Kulturgutpflege	65
4.4.1	Voraussetzungen, Chancen, Herausforderungen	65
4.4.2	Empfehlungen zur weiteren Nutzung der Additiven Fertigung im Bereich der Kulturgutpflege	66
4.5	Additive Fertigung von Nahrung	69
4.5.1	Individualisierung von Grundnahrungsmitteln.....	69
4.5.2	Ergänzung von Grundnahrungsmitteln	69
4.5.3	Akzeptanz additiv gefertigter Lebensmittel.....	70
4.5.4	Empfehlungen zur weiteren Etablierung additiver Verfahren in der Lebensmittelproduktion	71

5	Wechselwirkungen zwischen der Additiven Fertigung und der Gesellschaft.....	72
5.1	Akzeptanz und Akzeptabilität.....	72
5.1.1	Privatpersonen als Nutzerinnen und Nutzer von 3D-Druckern	74
5.1.2	Privatkunden als Zielgruppe für additiv gefertigte Produkte	75
5.1.3	Gewerbliche Nutzung.....	75
5.1.4	Additive Fertigung und Innovationskultur.....	76
5.1.5	Empfehlungen zur Aufrechterhaltung von Akzeptanz und Akzeptabilität additiver Fertigungstechnologien.....	77
5.2	Veränderungen in der Arbeitswelt.....	77
5.2.1	Neue (Ausbildungs-)Berufe, Fortbildung.....	77
5.2.2	Qualifizierungsbedarf für die Additive Fertigung	78
5.2.3	Integration additiver Fertigungsverfahren in das Berufsbildungssystem	79
5.2.4	Berufe und Qualifikationen in der Additiven Fertigung.....	80
5.2.5	Kooperationen zwischen Schulen, Unternehmen und Institutionen	81
5.2.6	Auswirkungen auf Arbeitsmarkt und Arbeitskräfte.....	81
5.2.6.1	Digitalisierung, Automatisierung und Geschäftsmodelle	81
5.2.6.2	Auswirkungen auf die Arbeitnehmermobilität durch neue Geschäftsmodelle.....	82
5.2.6.3	Qualifikationsniveau	82
5.2.6.4	Fachkräftegewinnung	83
5.2.7	Arbeits- und Gesundheitsschutz	83
5.2.8	Empfehlungen zur Anpassung der Arbeitswelt an die Anforderungen der Additiven Fertigung.....	85
5.3	Nachhaltigkeit der Technologie.....	87
5.3.1	Energie- und Materialbedarf der Produkte Additiver Fertigung über ihren gesamten Lebenszyklus	87
5.3.2	Handlungsempfehlungen zum nachhaltigen Einsatz additiver Fertigungstechnologien	89

6	Anhang	91
	Regulatorische Aspekte	91
	A Immaterialgüterrecht (R. M. Hilty)	91
	A.1 Ausgangslage	91
	A.2 Übernahme eines vorbestehenden Gegenstandes	91
	A.2.1 Patentrecht, Gebrauchsmusterrecht	91
	A.2.2 Urheberrecht, Designrecht	92
	A.2.3 Markenrecht	93
	A.2.4 Übernahme einer vorbestehenden „Anleitung“	93
	A.2.5 Schutz des Gegenstandes der Additiven Fertigung	95
	A.2.6 Schutz der „Anleitung“ zur Additiven Fertigung	96
	A.2.7 Kommerzielle vs. private Nutzung	96
	B Schutz von 3D-Modellen (J. Ensthaler)	97
	B.1 Patent- und Urheberrecht	97
	B.2 Haftungsfragen	99
7	Glossar	101
8	Literatur	106
9	Mitglieder der Arbeitsgruppe „Additive Fertigung“	114
10	Gutachterinnen und Gutachter	115
11	Dank	115

1 Vorwort

Die Additive Fertigung ist ein junges, sehr dynamisches Feld der Technologieentwicklung. An die hiermit bezeichneten technischen Verfahren, die es ermöglichen, Objekte mit sehr variablen Formen und inneren Strukturen durch einen schichtweisen Auftrag von Material zu erzeugen, werden große Erwartungen geknüpft. Die damit verbundenen Anwendungsmöglichkeiten können etablierte Prozesse und Strukturen in den Bereichen Industrie und Medizin, aber auch im privaten Sektor tiefgreifend verändern.

Um einen Überblick über die zukünftigen Einsatzfelder und Nutzungspotenziale der Additiven Fertigung zu gewinnen und die damit einhergehenden zu erwartenden Umbrüche besser abschätzen zu können, haben die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften zwei Arbeitsgruppen ins Leben gerufen. Diese haben den aktuellen Stand der Entwicklung und Anwendung additiver Fertigungstechnologien unter unterschiedlichen Gesichtspunkten analysiert und jeweils Stellungnahmen mit Empfehlungen zur weiteren Etablierung und zum gesellschaftlich nutzbringenden Einsatz dieser Technologien erarbeitet.

Die bereits 2016 veröffentlichte Stellungnahme „Additive Fertigung“¹ behandelt die Schwerpunkte industrielle Produktion, Wertschöpfungsnetze und Geschäftsmodelle. Sie beschreibt einerseits den Status quo beim Einsatz additiver Ferti-

gungsverfahren in der Industrieproduktion und skizziert vor dem Hintergrund zunehmender Digitalisierung und Vernetzung andererseits zukünftig zu erwartende Entwicklungen in diesem Tätigkeitsfeld. Zudem befasst sie sich mit den ökonomischen Auswirkungen der Additiven Fertigung auf Wertschöpfungsketten.

Die vorliegende Stellungnahme „Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen“ konzentriert sich hingegen auf die Darstellung der besonderen Anforderungen sowohl an die Grundlagen- als auch an die angewandte Forschung für eine erfolgreiche Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren. Dabei setzt sie sich auch mit zukünftigen Anwendungspotenzialen solcher Verfahren auseinander, die sich jenseits einer industriellen Nutzung ergeben könnten, und befasst sich darüber hinaus mit Fragen zu den gesellschaftlichen Auswirkungen eines breiten Einsatzes additiver Verfahren.

Die beteiligten Wissenschaftsakademien sprechen auf Grundlage dieser Analyse Empfehlungen aus, wie sich die Nutzungsmöglichkeiten der Additiven Fertigung erweitern und ihre positiven Effekte für die Gesellschaft weiter befördern lassen.

Empfehlungen mit unmittelbarem Forschungsbezug richten sich dabei insbesondere an Forschende in Wissenschaft und Industrie. Ziel ist es, darauf hinzuwirken, die Forschung stärker zu verzahnen, gemeinsam Standards zu entwickeln und prioritäre Forschungsfragen so zu bearbeiten, dass Grundlagen- und angewandte Forschung möglichst effektiv ineinandergreifen können. Der praktische Bedarf an neuen Materialien,

¹ acatech, Leopoldina & Akademienunion, 2016.

Methoden und Werkzeugen ist immens, der Forschungsdruck entsprechend hoch.

Zugleich braucht es allerdings noch weitergehende gesellschaftliche Anpassungen, um die Chancen der Additiven Fertigung effizient nutzen zu können, potenzielle Risiken hingegen möglichst gering zu halten. Die diesbezüglichen Empfehlungen sind insbesondere an den Gesetzgeber in Bund und Ländern adressiert und darauf ausgerichtet, geeignete Rahmenbedingungen für die Weiterentwicklung und Anwendung der Additiven Fertigung in Deutschland zu schaffen.

2 Einleitung

2.1 Verbindende Charakteristika additiver Fertigungsverfahren

Unter der Bezeichnung „Additive Fertigung“ werden Fertigungstechnologien zusammengefasst, wobei je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Verfahrensprinzipien und Materialien (auch Werkstoffe genannt) zum Einsatz kommen.² In Medien und Öffentlichkeit werden solche Verfahren auch mit dem nicht ganz deckungsgleichen Begriff des „3D-Drucks“ bezeichnet.³ Gemeinsam ist ihnen, dass das zu erzeugende Produkt durch den wiederholten Auftrag von Material gemäß einer vorab definierten, computergestützten Objektbeschreibung hergestellt wird. Dieses Fertigungsprinzip hat den Vorteil, quasi unbegrenzt komplexe, dreidimensionale Objektgeometrien erzeugen zu können, ohne hierfür spezifische Werkzeuge bereitstellen zu müssen.⁴

In verschiedenen Anwendungsbereichen wird dieser Vorteil bereits genutzt, um wirtschaftliche, technische oder zeitliche Verbesserungen im Produktionsablauf zu erreichen.

Der Vorteil der additiven Fertigungsweise, nahezu unbegrenzt Objektgeometrien herstellen zu können, führt dazu, dass

auch komplexe innere Strukturen – z. B. Kühlkanäle mit freigeformtem dreidimensionalem Verlauf – und Hinterschneidungen erstellt werden können, weshalb entsprechende Verfahren heute im Werkzeugbau und in der Medizintechnik eingesetzt werden. Die bei dieser Technologie vergleichsweise wenigen gestalterisch einzuhaltenden Randbedingungen betreffen insbesondere die Vermeidung von inneren Einschlüssen, die Einhaltung ausreichender Wandstärken und die Berücksichtigung der Oberflächengüte.

Die filigranen Strukturen, die mit additiven Fertigungsverfahren effizient hergestellt werden können, eignen sich besonders für den Leichtbau, weshalb solche Verfahren in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Motoren- und Turbomaschinenproduktion eine zunehmend größere Rolle spielen.

In vielen Branchen ist mittlerweile ein Trend zur Produktindividualisierung feststellbar. Für die Produktion bedeutet das eine größere Variantenvielfalt bei gleichzeitig sinkenden Stückzahlen innerhalb einer einzelnen Produktionsserie, weshalb die wirtschaftlichen Vorteile der Massenerzeugung (Skaleneffekt) in Bezug auf diese Fertigungstechnologien nicht zum Tragen kommen; kundenspezifische Produktanforderungen sind in wirtschaftlicher Form somit kaum noch umzusetzen. Teilweise hoch individualisierte Massengüter verlangen deshalb nach Fertigungsverfahren, mit denen kosteneffizient und endkonturnah, also ohne aufwendige Nachbereitungsschritte, produziert werden kann. Die Additive Fertigung erfüllt solche Kriterien und ermöglicht eine Ein-

² Zu den unterschiedlichen Fertigungstechnologien siehe auch die erste gemeinsame Stellungnahme der Akademien zur Additiven Fertigung acatech, Leopoldina & Akademieunion, 2016.

³ „3D-Druck“ hat sich umgangssprachlich als Oberbegriff für verschiedene Fertigungsverfahren etabliert, vor allem im Bereich von Privatanwendungen. Korrekterweise ist allerdings „Additive Fertigung“ der Oberbegriff und „3D-Druck“ die Bezeichnung für ein bestimmtes Verfahren innerhalb der Gruppe additiver Fertigungsverfahren. Zum Potenzial von 3D-Druckern für private Nutzer entweder im eigenen Haushalt oder auf öffentlich zugänglichen Geräten: Berg, 2017.

⁴ VDI, 2014.

zel- oder Kleinserienproduktion bei nahezu unbegrenzter gestalterischer Freiheit.

Der Wegfall von Werkzeug und die vollständig digitalisierte Prozesskette bis zur eigentlichen Produktherstellung führen bei der Additiven Fertigung dazu, dass von der Konstruktion eines Objekts am Computer bis zu seiner Fertigstellung im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren deutlich weniger Zeit vergeht. Die hohe integrierte Fertigungs- und Herstellgeschwindigkeit führt dazu, dass additive Fertigungsverfahren schon seit Längerem im Prototypenbau („Rapid Prototyping“) eingesetzt werden; sie ermöglicht beispielsweise eine schnelle Bereitstellung von Ersatzteilen, eventuell kombiniert mit einer dezentral organisierten Produktion. Dadurch werden additive Fertigungsgeräte, sogenannte 3D-Drucker, auch für private Nutzer interessant, da einzelne, ggf. komplexe Teile nach individuellem Bedarf erzeugt werden können, ohne dabei auf langwierige, aus vielen einzelnen Schritten bestehende Herstellungsprozesse angewiesen zu sein.

Es ist an dieser Stelle wichtig zu betonen, dass je nach Anwendungsgebiet, verwendetem Material und Objektgröße ganz unterschiedliche Fertigungsverfahren mit unterschiedlichen Anforderungen und Grenzen zum Einsatz kommen, die gleichwohl alle die oben beschriebenen Charakteristika aufweisen und daher ausnahmslos zur Familie der additiven Fertigungsverfahren zu zählen sind. Strukturen, die nur einige zehntel Millimeter groß sind, lassen sich ebenso additiv herstellen wie ein Objekt, das mehrere Meter misst. Manche Verfahren kommen bislang nur in Laboren der Grundlagenforschung zum Einsatz, während andere bereits zum etablierten technischen Know-how der industriellen Produktion zählen. Und es lässt sich ohne Übertreibung festhalten, dass Additive Fertigung heute sowohl in Kinderzimmern als auch im Weltraum – auf der Internationalen Raumstation (ISS) – stattfindet.

Im Folgenden werden Charakteristika, die allen additiven Fertigungsverfahren gemeinsam sind, genauer beschrieben, wobei insbesondere auf neuartige Anforderungen an die Gestaltung der Arbeitsprozesse und die Qualitätssicherung einzugehen ist.

2.2 Prozessketten

Allen Anwendungsbereichen der Additiven Fertigung ist gemeinsam, dass der Fertigungsprozess eine charakteristische Abfolge von vier aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten⁵ durchläuft (Abb. 1):

- i. Aufbau der digitalen Objektbeschreibung,
- ii. Planung bzw. computergestützte Simulation des additiven Fertigungsprozesses,
- iii. additive Objekttherstellung, ggf. mit Nachbearbeitung und
- iv. Prüfung der Objektqualität.

2.2.1 Aufbau der digitalen Objektbeschreibung

Um Objekte im Rahmen eines additiven Fertigungsprozesses herstellen zu können, bedarf es zunächst einer möglichst präzisen digitalen Beschreibung des Objekts, die als Vorlage für dessen schichtweisen Aufbau dient. Dabei wird mithilfe eines sogenannten Computer-aided-Design-Systems (CAD) ein digitales dreidimensionales Modell entweder durch geometrische Modellierung oder mittels „Reverse Engineering“, also durch Ableitung aus einem vorhandenen physischen Objekt, erzeugt. Bei der Modellierung werden Informationen über das Objekt – z. B. Daten zur Geometrie, einzusetzende Werkstoffe oder spätere Funktionsvorgaben – ebenso einbezogen wie Informationen über die Randbedingungen des Produktionsprozesses und weitere Anforderungen wie Produktionskosten oder

⁵ Gibson, Rosen & Stucker, 2015.

Nachhaltigkeitsbewertungen. Aus dieser digitalen Objektbeschreibung lassen sich die Konstruktionsparadigmen für das additiv herzustellende Objekt dann entsprechend ableiten. Beispiele für die Grundregeln dieser Ableitung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Das so erzeugte CAD-Modell wird anschließend in ein Austauschdatenformat transformiert, das seinerseits die wesentliche Grundlage für den nächsten Arbeitsschritt in der Kette des additiven Fertigungsprozesses – die Planung und computergestützte Simulation der Fertigung – bildet. Den De-facto-Standard für diese Transformation stellt derzeit noch das weitverbreitete STL-Format („Standard Tessellation Language“) dar. Es beschreibt die Objektoberfläche über eine sogenannte Dreieck-Approximation, bei der man sich gekrümmten Flächen in der Darstellung durch Dreiecke annähert, und bietet deshalb nur eine einfache geometrische Objektbeschreibung. Alternative Datenformate⁶ gehen darüber hinaus und stellen auch Informationen zur volumenorientierten Objektbeschreibung zur Verfügung, d. h. über Materialeigenschaften, Objektstrukturen oder Gestaltzonen (z. B. Bohrung, Rundung etc.) sowie Daten, die während der Produktlebensdauer anfallen.⁷ Bei der Nutzung solcher alternativer Formate, insbesondere im Kontext industrieller Anwendungen, ist allerdings zu beachten, dass diese mit den vorhandenen Fertigungsanlagen kompatibel sein müssen und es ggf. erforderlich ist, auftretende Informationsverluste adäquat zu kompensieren.

6 Beispiele für alternative Datenaustauschformate sind „Additive Manufacturing File Format“ (AFM), „Wavefront Object Format“ (OBJ), „Polygon File Format“ (PLY), „Virtual Reality Modeling Language“ (VRML), „Drawing Interchange File“ (DXF), „Autodesk 3D Studio Format“ (3DS), „Initial Graphics Exchange Specification“ (IGES), „Standard for the Exchange of Product Model Data“ (STEP), „Jupiter Tessellation Format“ (JT) oder „3D Manufacturing Format“ (3MF).

7 Gebhardt, Hötter & Fateri, 2013.

2.2.2 Planung des additiven Fertigungsprozesses

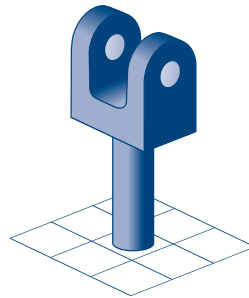
Liegt die digitale Objektbeschreibung vor, erfolgt im nächsten Verfahrensschritt die Planung des additiven Fertigungsprozesses. Dabei müssen Lage und Orientierung des digitalen Objekts oder der digitalen Objekte in einem Bauraum, also dem Raum, der für den Prozess der Objektfertigung zur Verfügung steht, definiert und die Fertigungsstrategie festgelegt werden. Der Bauraum spielt bei der Additiven Fertigung eine entscheidende Rolle. Seine Größe und seine geometrische Gestalt, die meist quaderförmig ist, begrenzen auch die Größe additiv herzustellender Objekte. Lage und Orientierung eines Objekts im Bauraum wirken sich sowohl auf den eigentlichen Fertigungsprozess als auch auf die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Objekte und der Oberflächenqualität aus.⁸ Ist außerdem beabsichtigt, eine Vielzahl von kleineren Bauteilen parallel zu fertigen, spielt deren volumen-effiziente Anordnung im Bauraum eine wichtige Rolle. Sollte das herzustellende Objekt zu groß für einen gegebenen Bauraum sein, so kann das Objekt auch in Teilen hergestellt und anschließend zusammengefügt werden. Ein solcher Fall ist bereits bei der digitalen Objektgestaltung zu berücksichtigen.

Neben der Anordnung der Objekte im Bauraum sind für die Fertigungsstrategie weitere Einflussgrößen zur Planung des schichtweisen Materialauftrags zu berücksichtigen. Dabei sind einige Fertigungsparameter wie die Form des Energieeintrags (z. B. mittels Laserstrahl oder Elektronenstrahl) und die Art des Material- bzw. Binderauftrags (z. B. mittels Extruder-Düse) verfahrensbedingt durch die eingesetzte Technologie und das Material vorgegeben. Andere Parameter wie die Schichtdicken, die für die Herstellung eines Objekts benötigt werden, oder die innere Materialstruktur (z. B. Vollmateri-

8 Arndt, Hackbusch & Anderl, 2015.

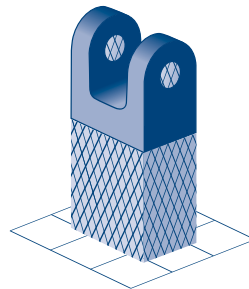
Arbeitsschritte der Prozesskette Additive Fertigung

Aufbau der digitalen Objektbeschreibung

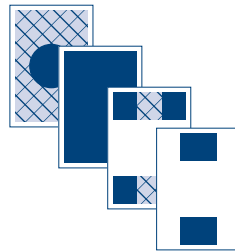


- Erzeugung rechnerinterner 3D-Geometriedaten direkt im CAD-System oder aus Messungen eines physischen Objektes (Reverse Engineering)

Planung des additiven Fertigungsprozesses

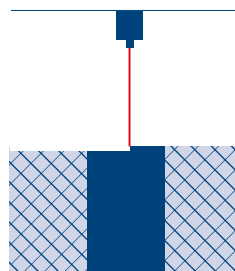


- Packen des virtuellen Bauraums der zu fertigenden Objekte
- Generierung von Stützstrukturen



- Erzeugung der Schichtinformationen und Pfadgenerierung

Additive Objektherstellung ggf. mit Nachbearbeitung



- Verfahrensabhängige schichtweise physische Objektherstellung
- Ggf. Nachbearbeitung der additiv gefertigten Objekte

Prüfung der Objektqualität



- Sicherstellung der Oberflächenqualität und der Objektfunktionalität

Abbildung 1: Arbeitsschritte der Prozesskette Additive Fertigung

al oder Wabenstruktur), können hingegen nach Bedarf eingestellt werden. Darüber hinaus ist je nach Verfahren auch zu prüfen, ob eine Stützkonstruktion erforderlich ist. Solche Konstruktionen werden immer dann eingesetzt, wenn die herzustellenden Objekte hinsichtlich ihrer Lage und Orientierung während der Objektfertigung exakt fixiert bleiben müssen.⁹ Einen weiteren Grund für ihren Einsatz stellt die Kompensation von Eigenspannungen und daraus resultierendem Verzug der Objekte dar. Schließlich erlauben Stützstrukturen auch eine bessere Wärmeabfuhr und -verteilung im Bauraum, sodass die Objekte verzugsfrei und mit möglichst geringen nachträglichen Maßänderungen (Dehnung oder Schrumpfung) gefertigt werden können. Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen kommt dem Einsatz numerischer Simulations- und Optimierungsmethoden für die Anordnungsplanung von Objekten im Bauraum und der dazugehörigen Stützkonstruktionen eine entscheidende Bedeutung zu.

Sind die Planungen zur Anordnung der Objekte im Arbeitsraum unter Berücksichtigung möglicher Stützkonstruktionen und weiterer Fertigungsparameter abgeschlossen, werden für die im Bauraum angeordneten Objektbeschreibungen und deren Stützkonstruktionen Schnittebenen berechnet („Slicing“), für die dann Steuerbefehle für die Fertigungsmaschine abzuleiten sind. Da die Ableitung von Steuerbefehlen für eine additive Fertigungsmaschine möglichst vollständig algorithmisiert durchgeführt werden sollte, ist es erforderlich, dass die Objektbeschreibungen, deren Anordnung im Bauraum und deren Stützkonstruktionen fertigungsgerecht beschrieben sind. Die Algorithmen zur Generierung der Steuerbefehle müssen auf die spezifischen Steuerungsmaschinen hin ausgerichtet werden. Dabei ist eine konstruktive und möglichst reibungslose Zusammenarbeit zwischen den am Ver-

fahren beteiligten Disziplinen notwendig, denn je besser die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieurwissenschaften, numerischer Simulation und Informatik funktioniert, desto präziser und schneller können durch die Simulation Unwägbarkeiten, Schwierigkeiten oder Hemmnisse bei der Fertigung erkannt und berücksichtigt werden.

2.2.3 Additive Objektherstellung und Nachbereitung

Die additive Herstellung eines Objekts erfolgt auf Grundlage der vorangegangenen Planung unter Berücksichtigung der physikalischen Prinzipien des spezifischen Fertigungsverfahrens, das abhängig vom Einsatzgebiet variieren kann. So kommen beispielsweise im Maschinenbau Verfahren wie das selektive Laser-Sintern („Selective Laser Sintering“, SLS), das Laserstrahl-Schmelzen („Selective Laser Melting“, SLM), das sogenannte Strangablege-Verfahren („Fused Layer Modeling“, FDM) oder der Binder-Druck („3D-Druck“, 3DP) zur Anwendung.¹⁰ Für kleinere Kunststoffbauteile mit hoher Oberflächengüte und Mikropräzision spielt darüber hinaus die Photopolymerisation eine große Rolle. In diesem Anwendungsbereich ist die UV-Laserbelichtung von Photopolymeren weitverbreitet. Auch in anderen Bereichen wie dem Bauwesen oder der Medizin wird ebenfalls intensiv an neuen additiven Druckverfahren geforscht (Kap. 4).

Ergebnis der additiven Objektherstellung ist schließlich das reale Objekt, das für den vorgesehenen Verwendungszweck zu diesem Zeitpunkt des Fertigungsprozesses meist jedoch noch nicht eingesetzt werden kann, da in der Regel Nacharbeiten erforderlich sind. Solche Nacharbeiten können einfache Tätigkeiten wie die Entfernung des Grundmaterials (z. B. nicht geschmolzenes Metallpulver) oder der

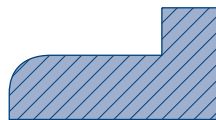
⁹ Gebhardt, Hötter & Fateri, 2013.

¹⁰ Für eine detaillierte Auflistung und Beschreibung der verschiedenen Verfahren siehe acatech, Leopoldina & Akademieunion, 2016.

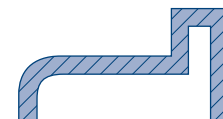
Tabelle 1: Beispiele für Randbedingungen additiver Objektherstellung¹¹

Beispiele für Randbedingungen additiver Objektherstellung

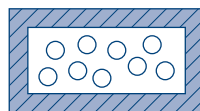
Materialverteilung



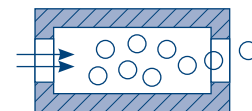
Lösungsansatz:
Wegen thermischen Verzugs und zu hohen Fertigungs-/ Materialkosten sind Massenanhäufungen zu vermeiden und konstruktiv zu berücksichtigen.



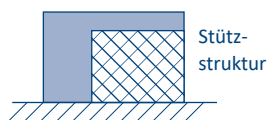
Hohlräume und Pulverentfernung



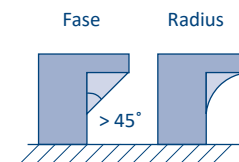
Lösungsansatz:
Zur Pulver- und Stützstrukturentfernung müssen Bohrungen oder offene Querschnitte vorgesehen werden. Diese sollten dort angebracht werden, wo sie die Belastbarkeit des Bauteils nicht negativ beeinflussen. Die Geometrie der Hohlräume sollte möglichst einfache Grundformen besitzen, um Pulver- oder Supporrückstände zu vermeiden.



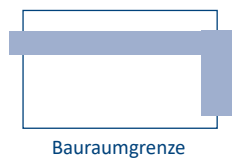
Einsatz von Stützstrukturen



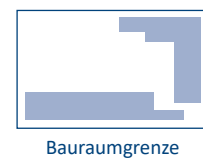
Lösungsansatz:
Durch eine intelligente Positionierung auf der Bauplattform können Überhänge vermieden werden. Geometrische Optimierungen durch das Anbringen von Fasen bzw. Radien an Überhängen vermeiden den Einsatz von Stützstrukturen.



Maximaler Bauraum



Lösungsansatz:
Die Bauteilgröße darf den maximalen Bauraum nicht überschreiten. Für große Bauteile sollte deshalb eine Skalierung oder hybride (geteilte) Fertigung in Betracht gezogen werden.



¹¹ Nach Kranz, Herzog & Emmelmann, 2015, und VDI, 2015.

Stützkonstruktion, aber auch komplexere Arbeitsschritte beinhalten, beispielsweise die Feinbearbeitung der Objektoberfläche. Die Vorgehensweise kann dabei variieren und sowohl materialabtragende (z. B. Fräs- und Schleifverfahren) als auch materialauftragende Verfahren (z. B. Oberflächenbeschichtung) sowie Wärmebehandlungen zum Spannungsabbau oder zur Gefügeeinstellung erfordern.

2.2.4 Prüfung der Objektqualität

Neben der vorhergehenden Modellierung und Simulation des Objekts kommt der abschließenden Qualitätsprüfung eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund der oft individualisierten Verfahren sind für die Nachvollziehbarkeit und die Kontrolle der Produktion die Dokumentation der additiven Herstellung und insbesondere auch die Dokumentation der erreichten Objektqualität wesentlich. Die Kontrolle umfasst in der Regel eine Prüfung der tatsächlichen Oberflächengüte des Objekts, seiner geometrischen Beschaffenheit und seiner Funktionalität. Zur Qualitätssicherung der Oberflächengüte kommen sowohl taktile wie auch optische Prüfverfahren zum Einsatz; die Funktionalität wird mittels Funktionstests geprüft, die dadurch gewonnenen Testdaten werden anschließend quantitativ ausgewertet.

3 Systemtechnische Herausforderungen der Additiven Fertigung

Für die Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren, ihre Überführung in die praktische Anwendung und ihre dortige Etablierung lassen sich insgesamt vier Handlungsfelder identifizieren, die entweder besonders dringlichen Anpassungsbedarf aufweisen oder aber große Chancen zur Optimierung der entsprechenden Verfahren und ihrer Einsatzmöglichkeiten bereithalten.

3.1 Anforderungen an die Software für Objektdesign und -produktion sowie an Konstruktionsparadigmen

Wie im vorangegangenen Kapitel verdeutlicht, kommt der eingesetzten Software bei der Modellierung der Objekte, der Planung des Fertigungsprozesses und der Vorhersage der Produkteigenschaften entscheidende Bedeutung zu. Sollen die praktischen Anwendungsmöglichkeiten der Additiven Fertigung zukünftig deutlich ausgeweitet werden, ist daher eine Weiterentwicklung der Simulationssoftware unabdingbar.

3.1.1 Digitale Datenmodelle für die Gestaltung additiv gefertigter Produkte

Aufgrund der hohen gestalterischen Freiheit in der Additiven Fertigung ergeben sich völlig neue Möglichkeiten in der Gestaltung von Bauteilstrukturen. Um die Vorteile entsprechender Verfahren bei der Entwicklung und Herstellung neuartiger Bauteile auch voll ausschöpfen zu können, ist spezielle Software vonnöten, die präzise digitale Modelle entwerfen und diese hinsichtlich der erforderlichen Eigenschaften weiter optimieren kann.

Beispiele hierfür sind die sogenannte Topologieoptimierung¹² oder die Form- und Größenoptimierung.

Bei der Topologieoptimierung handelt es sich um eine computergestützte Berechnungsmethode zur systematischen Verminderung des Gewichts bestimmter Strukturen oder Bauteile, die in ihrem Anwendungsbereich mechanischer Belastung unterworfen sein werden. Auf diese Weise lässt sich eine möglichst leichte und dennoch stabile Konstruktion erzeugen, die den praktischen Anforderungen gewachsen ist.¹³ Konkret wird dabei innerhalb eines geometrisch vorgegebenen Kontroll- oder Bauraums mithilfe leistungsfähiger Rechner die optimale Materialverteilung für das Objekt ermittelt, damit es vorab definierten Festigkeitsbedingungen genügt. Methoden der Topologieoptimierung kommen insbesondere in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Leichtbau, in der Automobilindustrie und im Gerätebau, im Bauwesen oder im konstruktiven Ingenieurbau zur Anwendung. Mithilfe von Optimierungsstrategien wird jeweils über mehrfach ablaufende Iterationen berechnet, an welchen Stellen des finalen Bauteils keine oder nur geringe Beanspruchungen vorliegen. An diesen Stellen kann dann auf der Makro- bzw. Strukturebene Material entfernt

¹² Bendsøe & Sigmund, 2004.

¹³ Lachmayer, Lippert & Fahlbusch, 2016; Bauer et al., 2016.

werden.¹⁴ Neuerdings ist es zudem möglich, auf der Mikroebene herkömmliches durch neues Material mit veränderten strukturmechanischen Eigenschaften zu ersetzen. Dabei wird zunächst auf der Makroebene das optimale geometrische Layout der jeweiligen Struktur festgelegt und auf der Mikroebene simultan für jede einzelne Zelle des Bauraums eine Materialoptimierung durchgeführt („Multiscale Structural Topology Optimization“).¹⁵ Die Optimierungsiteration wird beendet, sobald für eine vorgegebene Belastung bei festgelegten Rand- bzw. Anfangsbedingungen alle Möglichkeiten zur Verbesserung der Materialverteilung ausgeschöpft sind.¹⁶ Das Ergebnis dieser Prozedur führt schließlich zu filigranen, mit Hohlstellen und Aussparungen durchsetzten Gitter- oder Wabenstrukturen, die biologischen Strukturen ähneln und deshalb auch als „bionische Strukturen“ bezeichnet werden.¹⁷ Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Topologieoptimierung.

Die softwareunterstützte Topologieoptimierung liefert Ingenieurinnen und Ingenieuren somit wichtige Anregungen für innovative Konstruktionen und Objektgestaltungen.¹⁸ Neben Einsparungen an Gewicht und Material des jeweiligen Objekts ermöglicht sie zudem eine Verkürzung der Produktentwicklungsdauer, da Montagetagearbeiten, wie sie bei herkömmli-

chen Bauweisen anfallen, vermieden werden können. Um Fertigungstauglichkeit zu erlangen, müssen die im Hinblick auf ihre Topologie optimierten Modelle allerdings zusätzlich noch in einem weiteren Arbeitsschritt mit dem Ziel der Glättung nachmodelliert werden. Dies erfolgt beispielsweise mithilfe von CAD-Software.

Ein weiteres Verfahren, das bei der Produktmodellierung im Rahmen additiver Fertigungsprozesse zum Einsatz kommt, ist die sogenannte Form- und Größenoptimierung.¹⁹ Dabei werden für die bereits feststehende, mathematisch beschreibbare Geometrie eines herzustellenden Objekts neue Möglichkeiten der Realisierung ermittelt. Zu diesem Zweck werden zunächst charakteristische, die geometrische Gestalt des Objekts maßgeblich beschreibende Größen gezielt als Optimierungsvariablen (Entwurfsvariablen) eingeführt. Anschließend wird das Objekt über eine geeignete Optimierungsstrategie²⁰ solange in Bezug auf ein vorgegebenes Optimierungskriterium verändert bzw. verbessert, bis ein vorab definiertes Ziel erreicht ist. Zu den möglichen Optimierungskriterien zählen neben dem Gewicht und weiteren physikalischen Größen wie der optimalen Steifigkeit oder optimalen Eigenfrequenzen des finalen Produkts auch Herstellungskosten oder die maximale Zuverlässigkeit. Ein solcher Optimierungsprozess stellt ein hochgradig nichtlineares Optimierungsproblem dar, das den Einsatz von ableitungsfreien algorithmischen Methoden (d. h. genetischen, evolutionären bzw. memetischen Algorithmen) erfordert.

Ein weitverbreitetes Verfahren der Form- und Größenoptimierung ist die computergestützte Optimierung („Computer-aided Optimization“), bei der die Stabilisie-

¹⁴ Im Folgenden wird in diesem Zusammenhang auch von Mikro-, Meso- und Makroebenen gesprochen. Bei der Mikroebene handelt es sich um den elementaren Grundbereich zumeist mikroskopisch kleiner Strukturen, die jedoch in ihrer komplexen Zusammensetzung oft schon die Grundlage für die funktionalen Eigenschaften der Materialien und der aus diesen hergestellten Erzeugnisse bilden. Die Mesoebene bezeichnet demgegenüber die darauf aufbauende nächsthöhere Systemebene, in der die Strukturelemente so angelegt sind, dass sie die gewünschten Eigenschaften des Produkts unterstützen, z. B. durch Gitteranordnung. Die Makroebene schließlich ist die Ebene des fertigen Bauteils, das mit anderen Bauteilen zu einem Endprodukt interagieren kann.

¹⁵ Xia, 2016.

¹⁶ Bendsøe & Sigmund, 2004.

¹⁷ Mit bionischen Strukturen, speziell für die Architektur, aber auch für andere Ingenieurdisziplinen, befassen sich weltweit mehrere Forschungsinstitute, exemplarisch genannt sei das Center for Geometry and Computational Design der Technischen Universität Wien GCD, 2019.

¹⁸ Richard, Schramm & Zipsner, 2017.

¹⁹ Schumacher, 2013.

²⁰ Dies erfolgt unter Einhaltung unterschiedlicher Nebenbedingungen in Gleichungs- bzw. Ungleichungsform (bezüglich Verschiebungen, Spannungen, Eigenfrequenzen etc.).

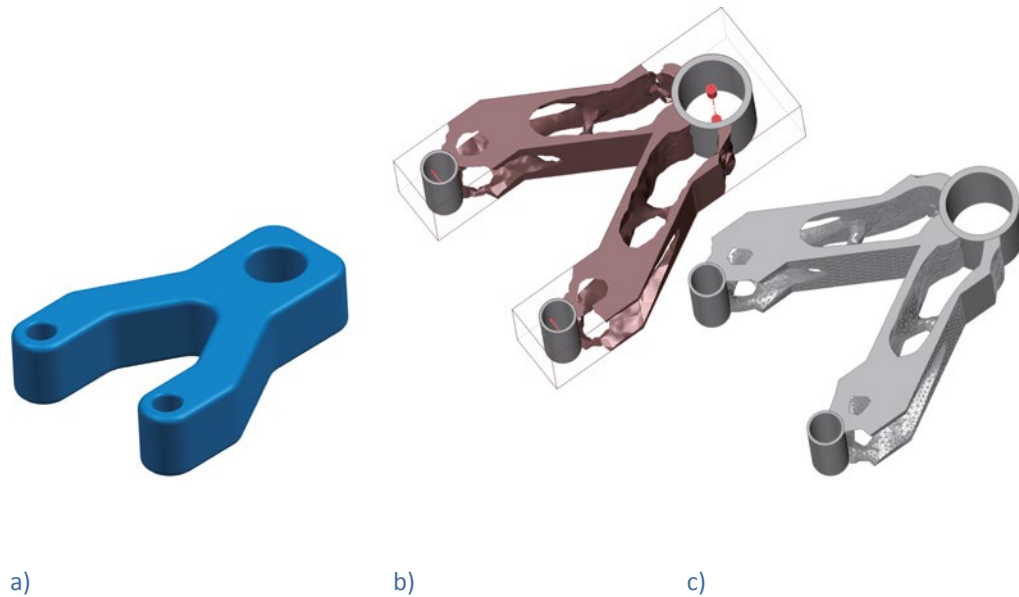


Abbildung 2: Ergebnis der Topologieoptimierung am Beispiel eines Bauteils einer Radaufhängung a) Ursprüngliches Bauteil, b) Topologie-optimiertes Bauteil und c) geglätteter Gestaltvorschlag (Bildquelle: Fachgebiet für Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt / Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl).

rungsprinzipien biologischer Strukturen, beispielsweise von Baumstämmen oder Knochen, unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen simuliert werden, um auf diese Weise Strukturen oder Bauteile effizient an spezifische Belastungen anzupassen.²¹ Gegenüber der Topologieoptimierung, deren Hauptziele eine Verminderung des benötigten Materials und die Reduzierung des Objektgewichts sind, können im Zuge einer Form- und Größenoptimierung Volumen und Gewicht des jeweiligen Bauteils ansteigen.

Große Vorteile gegenüber konventionellen Entwurfsmethoden im Leichtbau ergeben sich dadurch, dass die Verfahren der Topologie- und Form- bzw. Größenoptimierung auch eine verbesserte Gestaltung, Auslegung und Dimensionierung von innen liegenden Strukturen erlauben. So werden beispielsweise bionisch konzipierte feine Gitter- oder Wabenstrukturen in Bauteile eingebracht, um bei gleichbleibender Festigkeit Material und Gewicht einzusparen (Abb. 3). Darüber hinaus eröffnen Topologieoptimierungen neue Möglichkeiten für Multimaterialsysteme

oder sogenannte anisotrope Werkstoffsysteme und geben damit die Richtung für eine gezielte Prozessführung und die Entwicklung neuer Prozesse vor (siehe Kap. 3.3 und 3.4).

3.1.2 Datenmodellierung zur Vorhersage von Produkteigenschaften

Im Zuge additiver Fertigungsprozesse werden Produkte erzeugt, die – wie konventionell gefertigte Gegenstände auch – hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit, ihrer Sicherheit und ihrer Haltbarkeit den gesetzlichen Vorschriften und industriellen Normvorgaben, aber auch den Erwartungen von Nutzerinnen und Nutzern genügen müssen. Allerdings werden additive Fertigungsverfahren fast ausschließlich zur Herstellung von Bauteilen genutzt, deren Struktur und Materialinteraktion besonders komplex sind. Für diese Bauteile sind die notwendigen Nachweise für die Freigabe zur praktischen Verwendung durch herkömmliche Testverfahren kaum mehr zu erbringen. Daher werden zur Qualitätssicherung zunehmend digitale Modelle und numerische Simulationen verwendet, mit deren Hilfe die Wechselwirkungen einzelner Faktoren, beispielsweise die sta-

²¹ Breuninger et al., 2013.

tische und dynamische Beanspruchung des Objekts, mögliche Temperatureinwirkungen oder etwaige Spannungen, präzise ermittelt werden können. Die computergestützte Analyse dieser Daten ermöglicht anschließend Voraussagen zu sicherheitsrelevanten Eigenschaften wie der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit, der Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit des additiv gefertigten Bauteils.²² Solche Zuverlässigkeitsberechnungen sind in der Regel mit einem immensen Arbeitsaufwand verbunden und gelten wegen einer oft unzureichenden Datenlage in vielen Fällen sogar als undurchführbar. Aber auch wenn die notwendigen Daten zur Verfügung stehen, werden aufgrund der Komplexität der Fragestellung Hochleistungsrechner benötigt.

Bei der zuverlässigkeitsbasierten Strukturoptimierung („Reliability-based Design Optimization“) werden numerische Methoden zur Strukturoptimierung, beispielsweise zur Gewichts-, Form- oder Topologieoptimierung, um den Faktor der zeitabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit ergänzt.²³ Auf diese Weise lassen sich höhere Sicherheitslevel bei der Fertigung erreichen als mit herkömmlichen Nachweisformaten, in deren Rahmen lediglich einzelne, in Normen festgelegte Sicherheits- und Teilsicherheitsfaktoren getestet werden.²⁴

Zur Prüfung der Belastbarkeit von einfachen Werkstoffen reicht es in der Regel aus, deren Materialverhalten in entsprechenden Laborversuchen detailliert zu ermitteln und auf Grundlage dieser Analyse sowie mithilfe stochastischer Verfahren anschließend das entsprechende Verhalten für die jeweiligen Produkte zu berechnen. Solche Zuverlässigkeitsberechnungen sind grundsätzlich immer dann durchzuführen, wenn im Rahmen additiver Fertigungsverfahren sicher-

heitsrelevante Bauteile oder Strukturen hergestellt werden, beispielsweise im Brückenbau. Sind die eingesetzten Materialien in ihrer Zusammensetzung allerdings selbst bereits komplex,²⁵ oder zeichnen sich die zu erzeugenden Strukturen, Bauteile oder Bausysteme ihrerseits durch einen hohen Komplexitätsgrad aus, reichen solche konventionellen Prüfverfahren nicht aus. In entsprechenden Fällen werden stattdessen aufwendig zu entwickelnde hybride Simulationsmodelle benötigt, die verschiedene Methoden koppeln, um zu nachprüfbaren Aussagen sowohl über das statische und dynamische als auch über das stationäre und instationäre Verhalten additiv gefertigter Objekte zu gelangen.

Ein weiterer Komplexitätsgrad wird bei transienten Prozessen erreicht. Bei diesen folgt ein betrachteter Parameter im Zeitablauf keinem konstanten Wert, sodass in der Modellierung oftmals unterschiedliche Zeitskalen – von Sekunden bis hin zu Jahren – zu berücksichtigen sind. Zugleich ist es möglich, dass sich Systeme in ihren Eigenschaften und Interaktionen auf Mikro-, Meso- und Makroebene unterscheiden. Diese raumzeitliche Mehrskaligkeit stellt eine große Herausforderung in vielen wissenschaftlichen Disziplinen dar und ist deshalb Gegenstand weltweiter Forschung.²⁶

Über die Skalenanalyse, bei der es sich um ein leistungsstarkes Werkzeug zur

²² VDI, 1998.

²³ Lopez & Beck, 2012.

²⁴ Stangenberg, 2009.

²⁵ Beispielsweise weichen trotz des Einsatzes standardisierter Werkstoffformulierungen die Kristallstruktur und damit sowohl die mechanischen als auch die chemischen Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile prozessspezifisch oft erheblich von den tabellierten Werten des Grundwerkstoffs ab.

²⁶ Deymier, Runge & Muralidharan, 2016; Fish, 2010; Ibrahimbegovic, 2016. In Deutschland befasste sich schwerpunktmäßig der DFG-Sonderforschungsbereich SFB-611: „Singuläre Phänomene und Skalierung in mathematischen Modellen“ an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn von 2002 bis 2012 insbesondere in zwei Projektbereichen mit Mehrskaligkeit in mathematischen Modellen der Materialwissenschaften (und der Biologie) sowie der numerischen Umsetzung dieser Modelle. Stellvertretend für viele andere Forschungsarbeiten im Bereich der Ingenieurwissenschaften seien zudem genannt Bayreuther, 2004; Hund, 2007 und Eckardt, 2010.

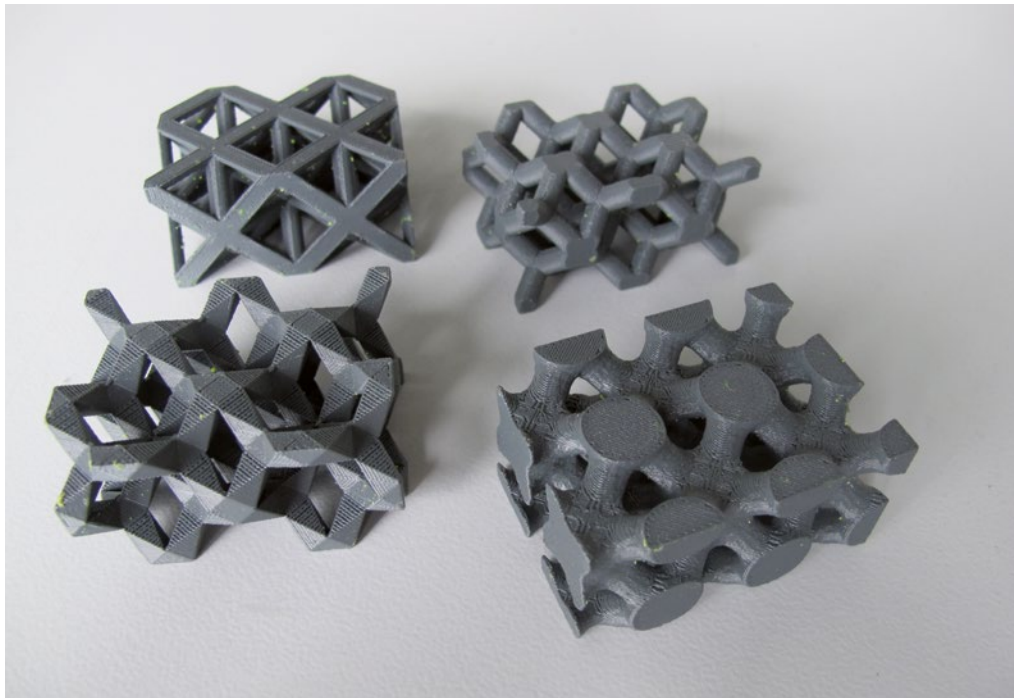


Abbildung 3: Beispiele für innen liegende additiv gefertigte Strukturen (Bildquelle: Fachgebiet für Datenverarbeitung in der Konstruktion, Technische Universität Darmstadt / Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl).

Komplexitätsreduktion handelt, lassen sich mehr- bzw. multiskalige Simulationsmodelle aufbauen, die eine wirklichkeitsgetreue Vorhersage verschiedener Phänomene erlauben. Multiskalige Modelle berücksichtigen dabei alle dominierenden Wirkungsmechanismen und deren Interaktionen. Grundvoraussetzung für eine gute Prognostizierbarkeit solcher Phänomene ist allerdings, dass die Skalenübergänge mithilfe der skalenanalytisch gewonnenen Parameter korrekt modelliert werden, um so die Übertragung von Informationen (physikalischen Größen) von der jeweils kleineren auf die jeweils größere Skala sicherzustellen.

3.1.3 Datenmodellierung zur Planung des Herstellungsprozesses

Werden mögliche Schwachstellen innerhalb eines Herstellungsprozesses nicht früh genug erkannt, kann es im Verlauf der additiven Fertigung zu Störungen, schlimmstenfalls auch zur Zerstörung eines Produkts kommen. Um produktionsbedingte Fehlerquellen frühzeitig identifizieren und ausschalten zu können, ist es wichtig, dass der gesamte Fertigungs-

prozess, bei dem aus formlosem Material oder Materialgemisch Objekte generiert werden, so realitätsnah wie möglich abgebildet und Schritt für Schritt simuliert wird.

Über eine Schwachstellenanalyse lässt sich etwa aufzeigen, ob während des Fertigungsprozesses inakzeptable Materialüberhänge auftreten. Diese könnten durch konstruktive Gegenmaßnahmen wie Stütz- und Hilfskonstruktionen kompensiert werden. Mit geeigneten Verfahren können darüber hinaus auch die während der Fertigung im Material entstehenden mechanischen Eigenspannungen vorab simuliert werden.²⁷ Solche Spannungen könnten im Anschluss an den additiven Fertigungsprozess, insbesondere nach dem Trennen von der Substratplatte, zu einem Verzug des Bauteils führen, also zu einer unerwünschten Abweichung von der geforderten Form. Mithilfe der Simulation lässt sich die Konstruktion des entsprechenden Bauteils dann so anpassen, dass der Verzugsgrad

²⁷ Hodge, Ferencz & Solberg, 2014; Denlinger, Irwin & Michaleris, 2014; Mukherjee, Zhang & DebRoy, 2017.

minimiert oder aber die Geometrie so modifiziert wird, dass die Form des Objekts nach dem Verzug exakt der beabsichtigten Gestalt entspricht.

In zahlreichen Anwendungsfeldern der Additiven Fertigung besteht großes Interesse, Objekte aus solchen Materialien herzustellen, die bislang in konventionellen Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, beispielsweise Metalllegierungen, Kunststoffe oder Keramiken. Allerdings sind viele dieser Materialien für die Additive Fertigung nicht ohne Weiteres geeignet. Um aber zu verstehen, warum das der Fall ist, und um die additive Verarbeitung entsprechender Materialien zukünftig zu ermöglichen, werden aktuell einerseits massive Anstrengungen zur Materialentwicklung²⁸ unternommen sowie andererseits verstärkt Simulationsmethoden eingesetzt. Solche Simulationen erfassen zum Teil sehr detailliert die physikalischen Prozesse, die während der

Materialabscheidung ablaufen, also beispielsweise das Aufschmelzen, das Verdampfen, das Rekondensieren und Erstarren von Metallen, die Kristallisation von Polymeren, die Bildung von Plasma über dem Schmelzbad oder die Konvektion innerhalb und die Gasströmungen oberhalb des Schmelzbades.²⁹ Im Bauwesen sind für die Verwendung zähflüssiger zementgebundener Materialien allerdings neue numerische Simulationsmodelle erforderlich, mit denen die Entwicklung auf der Ebene der Mikrostruktur bei einzelnen Materialsichten abgebildet werden kann. Simulationen dieser Art sind auf experimentelle Daten aus der Prozessbeobachtung angewiesen. Online-Analysertools wie die Einzelpulverlagen-Bildgebung, die Schmelzbadbeobachtung und die Wärmestrahlungserfassung haben sich dabei bereits als Standardmethoden etabliert, was eine engere Zusammenarbeit zwischen experimentaler Forschung und Modellentwicklung ermöglicht.

3.1.4 Empfehlungen zur Entwicklung von Simulationsmethoden und Software

Zahlreiche computergestützte Anwendungen zur Modellierung von Objekten sowie zur Simulation von Produktionsprozessen und Produktzuverlässigkeit befinden sich derzeit im Stadium der wissenschaftlichen Entwicklung oder Erprobung. Für ihre Handhabung braucht es in der Regel das entsprechende Know-how, also ein hohes Maß an Grundlagenwissen und interdisziplinärer Expertise, sowie leistungsfähige Hardware in Gestalt von Hochleistungs- und Parallelrechnersystemen. Um die Technologien der Additiven Fertigung für neue Komplexitätsstufen in der industriellen und kommerziellen Nutzung zu erschließen, ist es notwendig, die Anwendungen zur digitalen Modellierung weiterzuentwickeln und einem großen Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen.³⁰ Diese Aufgabe obliegt der sogenannten Computational-Engineering-Forschung, einem Forschungszweig zur Modellierung, Analyse und Simulation komplexer Strukturen in Natur und Technik. Dabei sollte die Weiterentwicklung in enger Abstimmung mit der Industrie erfolgen und sich an deren konkreten Anforderungen orientieren. Neben den an Universitäten und Fachhochschulen angesiedelten Forschungseinrichtungen sind allerdings auch die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Industrie gefordert, im Rahmen ihrer personellen und technischen Möglichkeiten für Verbesserungen bei der Modellierung und Simulation additiver Herstellungsvorgänge zu sorgen.

²⁸ Ein nationales Konsortium forscht im Rahmen des auf sechs Jahre ausgelegten DFG-Schwerpunktprogramms 2122 (Universität Duisburg-Essen, o. J.) seit 2018 intensiv am Thema „Materials for Additive Manufacturing“.

²⁹ Siehe Erläuterung zu Digitalen Zwillingen in Kap. 3.2.2.

³⁰ Khairallah et al., 2016; Francois et al., 2017.

Mit Blick auf die Erforschung, Weiterentwicklung und Überführung additiver Fertigungsverfahren in die industrielle Anwendung sollte aus Sicht der Akademien daher die Forschung zu folgenden Schwerpunktthemen prioritär vorangetrieben werden:

End-to-End-Lösungen für die Additive Fertigung entwickeln

Die Planung von additiven Fertigungsprozessen muss effizienter werden. Bereits vorhandene Software sollte deshalb mit erweiterten Simulationsfähigkeiten ausgestattet bzw. neue Software entwickelt werden. Dies gilt mit Blick auf hybride Fertigungsfunktionalität, also der Kombination von neuen additiven und herkömmlichen subtraktiven Verfahren (beispielsweise Fräsen), und kollaborativen 3D-Druck wie dem Einsatz von multiplen, simultan arbeitenden Druckeinheiten. Es wird zudem darauf ankommen, End-to-End-Softwarelösungen für die Additive Fertigung bereitzustellen. Darunter versteht man eine Software, die es ermöglicht, eine durchgängige Prozesskette digital und konsistent darzustellen. Dabei sollten möglichst alle Anforderungen an den Fertigungsprozess und das Produkt der Additiven Fertigung (Strukturoptimierung, Produktmodellierung, Datenaufbereitung und -formatierung für 3D-Druck-Maschinen, Materialentwicklung, Details der additiven Fertigungsabläufe bis hin zur Reparatur und Entsorgung im Sinne eines Lifecycle-Managements) berücksichtigt werden. Entsprechende Erweiterungen und Verbesserungen der einschlägigen Softwaresysteme würden es dem industriellen Anwender somit erlauben, auf integrativer Basis Produktentwürfe zu modellieren, diese zu testen, zu optimieren und die entsprechenden Objekte unmittelbar im Anschluss zu produzieren. Solche Softwaresysteme sollten insbesondere in der Lage sein, Verformungen, Eigenspannungen oder auch heterogene Steifigkeiten und Festigkeiten präzise vorherzusagen, um das Objekt design im Vorfeld der eigentlichen Fertigung gemäß den Anforderungen an das Produkt zu optimieren.

Um die Entwicklung von durchgängig digital und konsistent gestalteten Prozessketten weiter voranzutreiben, ist eine stärkere Verzahnung von industrieller und staatlich geförderter Forschung nötig. Hierfür braucht es möglichst große Transparenz, standardisierte Methoden und Normen. Bedenken von Industrieunternehmen, die im Rahmen einer solchen Zusammenarbeit eine wirtschaftsschädigende Veröffentlichung ihres Know-hows befürchten, sollte durch Absicherung mithilfe von „Intellectual Property Rights“ (IPR) begegnet werden. Hierfür muss zunächst deutlich zwischen öffentlichem Know-how (insbesondere Normen) und individuellem, also schützenswertem Know-how („Intellectual Property“) unterschieden werden.

Voxelorientierte Modellierung vorantreiben

Die realitätsnahe Modellierung additiv gefertigter Produkte muss weiterentwickelt werden. Insbesondere bei Multimaterialverfahren und Anwendungen, bei denen Materialeigenschaften gezielt beeinflusst werden, ist es von großer Bedeutung, den inneren Aufbau eines additiv herzustellenden Objekts so realitätsnah wie möglich modellieren zu können. Daher ist es notwendig, die Entwicklung der sogenannten voxelorientierten³¹ Modellierungen gezielt zu fördern, mit deren Hilfe effiziente Objektbeschreibungen möglich sind – selbst bei verwickelten dreidimensionalen Gebilden mit komplizierten Aussparungen, Überhängen oder filigranen Strukturen, die Leerstellen aufweisen.

Grundlagen für die Entwicklung neuer materialbezogener Berechnungsalgorithmen schaffen

Die für die Additive Fertigung zur Verfügung stehenden Simulationsmethoden müssen stärker vernetzt, optimiert und zudem effizienter werden. Um eine korrekte Einstellung der Werk-

³¹ Voxel: Abk. für „Volume Vox Element“, siehe Glossar.

zeugmaschinen den aktuellen Produktionserfordernissen entsprechend vornehmen zu können, bedarf es spezifischer Algorithmen, die in der Lage sind, die physikalisch-chemischen bzw. physikalisch-biologischen Vorgänge bei der eigentlichen Herstellung quantitativ zu berücksichtigen. Zudem werden sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch ausgerichtete Simulationen der physikalischen Vorgänge bei der Materialverbindung benötigt. Makroskopische Simulationsverfahren dienen der Analyse des Energieeintrags, der Energieverteilung und des Abkühlvorgangs. Mit ihrer Hilfe lassen sich anschließend die Spannungsverteilung und die Verformung des herzustellenden Objekts berechnen. Mithilfe von Simulationsverfahren lassen sich die physikalischen Vorgänge bei der Laser-Material-Wechselwirkung simulieren, sowohl im schmelzflüssigen Zustand als auch bei Erstarrung. Das ermöglicht einerseits die Identifizierung und Ausschaltung von Defektbildungsmechanismen während des Herstellungsvorgangs (insbesondere Porenbildung), andererseits kann auch positiv auf die Mikrostrukturbildung eingewirkt werden, um eine Verbesserung der Produkteigenschaften zu erreichen.

Viele solcher Simulationsmethoden sind in ihrer Entwicklung bereits weit fortgeschritten, allerdings sind die verschiedenen Systemebenen, die sie darstellen, oft nicht ausreichend gekoppelt (siehe Darstellung der Mehrskaligkeit und Skalenanalyse in Kap. 3.1.2, die Beschreibungen nicht ausreichend detailliert, oder die Simulationen benötigen so hohe Berechnungskapazitäten, dass sie nicht routinemäßig eingesetzt werden können. Daher gilt es, die Forschung zur Optimierung der Simulationsmethoden weiter zu unterstützen, zu vernetzen und voranzutreiben.

Dezentrale Anwendbarkeit und Steuerung realisieren

Die technologische Infrastruktur der Additiven Fertigung sollte so gestaltet werden, dass die Produktion von Objekten unabhängig vom Standort der Entwurfs- und Simulationsdaten erfolgen kann. Gerade die entfernte Objektherstellung stellt einen wesentlichen Vorteil der Additiven Fertigung gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren dar und wird mittelfristig voraussichtlich zu einer weitverbreiteten Nutzung additiver Fertigungstechnologien führen. Daher sind Steuerungsprozesse im Sinne des sogenannten Computational Steering weiterzuentwickeln. Gemeint ist damit ein Steuerungsprinzip, das es Anwenderinnen und Anwendern ermöglicht, noch während des Fertigungsverganges interaktiv in vorgegebene, algorithmische Abläufe der Steuerungssoftware einzugreifen, um bereits gültige Eingaben gezielt zu modifizieren und anschließend einen Neustart der Software mit korrigierten Eingaben zu generieren.

Konstruktionsparadigmen sowie neue Methoden und Softwaresysteme sollten daher so ausgelegt werden, dass die Additive Fertigung auch an solchen Standorten effizient durchgeführt werden kann, die von der Quelle der Fertigungsdaten entfernt liegen.

Methoden zur Prozessbeobachtung implementieren

Um das simulierte Materialverhalten sowie Prozessverlauf und -stabilität validieren zu können, aber auch, um die Prozessdaten in den zu einem späteren Zeitpunkt benötigten Digitalen Zwilling (Kap. 3.2.2) einzubetten, sind die Methoden der Prozessbeobachtung und ihre Anwendungsmöglichkeiten konsequent weiterzuentwickeln. Eine solche Beobachtungsmethode stellt die bildgebende Einzelschichtcharakterisierung dar, mit deren Hilfe Fehler im Schichtauftrag identifiziert, dokumentiert und bauteilbezogen rückverfolgt werden können. Zudem lässt sich die bildgebende Einzelschichtcharakterisierung zur Optimierung der Simulation des Pulverauftrags verwenden. Aber auch Strahlungsintensitäts-

und Wärmebildanalysen sowie infrarot- und emissionsspektroskopische (Inline-)Analysen können maßgeblich zu einem besseren Verständnis der verschiedenen Prozesse und des Materialverhaltens beim Herstellungsvorgang beitragen, sodass eine Rückkopplung mit den zuvor erstellten simulativen Vorhersagen, idealerweise für das gesamte Bauteilvolumen, möglich ist.

Rechenprozesse beschleunigen

Software und Hardware müssen entsprechend der Bedarfe der Additiven Fertigung aufeinander abgestimmt werden, um Software-Antwortzeiten möglichst kurz zu halten. Eine solche Verkürzung kann unter anderem dadurch erreicht werden, dass die Anzahl von Iterationen in der Algorithmik (Solver) minimiert wird. Daher sollten bei der Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren verstärkt die Möglichkeiten cloudbasierter Simulationssoftware mit hocheffizienten Solvoren genutzt werden. Das sogenannte Cloud Computing mithilfe gemieteter Hochleistungsrechner kann die Rechen- und Antwortzeiten im Vergleich zu den in der Industrie gebräuchlichen Computersystemen spürbar verbessern.

Fertigungsvorbereitung und Nachbearbeitung besser verzahnen

In der industriellen Anwendung ist es vielfach erforderlich, additive Fertigungsprozesse um subtraktive Fertigungsprozesse zu ergänzen. Um die Verzahnung der einzelnen Fertigungsschritte weiter voranzutreiben und damit die Herstellung effizienter zu gestalten, sollte die Weiterentwicklung von Volumenmodellierungsverfahren intensiviert werden. Diese Modellierungsverfahren sollten auch in Simulationen integriert werden, um die gesamte Prozesskette der Additiven Fertigung abzubilden (siehe hierzu auch die Erläuterung des Digitalen Zwillings, Kap. 3.2.2). Um den Entwicklungsprozess zu fördern und die Translation der Technologien in die industrielle Anwendung zu befördern, wird eine engere Verzahnung von Grundlagenforschung und industriellen Nutzern empfohlen.

3.2 Anforderungen an Normung, Qualitätssicherung, Zuverlässigkeit und Zulassung

Anders als bei subtraktiven Formgebungsverfahren, bei denen das Objekt durch Entfernung von Material aus einem größeren Block gebildet wird (z. B. Fräsen), lassen sich bei additiven Fertigungsprozessen die Phasen der Materialverbindung und der Formgebung nicht voneinander trennen. Deshalb hängt die Qualität eines additiv gefertigten Produkts in der Regel stark vom Verlauf des Herstellungsprozesses ab. Beispiele für prozessbedingte Einflussgrößen bei der Herstellung sind die verwendete Laserleistung, das Intensitätsprofil des Laserstrahls oder die Belichtungsstrategie. Da solche Parameter entscheidenden Einfluss auf das Materialverhalten im additiven Herstellungsprozess haben, bestimmen sie die resultierenden Eigenschaften

des Materials und des Bauteils. Falsch gewählte Parameter führen beispielsweise zu einer unzureichenden Dichte und Oberflächenqualität des jeweiligen Bauteils oder zu hohen mechanischen Eigenspannungen, was unzureichende (statische und dynamische) Festigkeiten nach sich zieht (siehe auch Kap. 3.1.2). Um eine möglichst hohe Sicherheit der Bauteile zu gewährleisten, werden Prozessparameter oft anlagenspezifisch definiert und schutzrechtlich abgesichert.

3.2.1 Qualitätssicherung, Standardisierung und Simulation

Mit Blick auf die Produkthaftung ist wichtig, dass eine Qualitätskontrolle auf jeder der in Kap. 2.2 genannten vier Stufen des Fertigungsprozesses (Abb. 1) stattfindet. Eine solche Kontrolle erfordert die Anwendung von qualitätssichernden und zertifizierenden Maßnahmen sowohl für

Box: Qualitätssicherung ...**... im Maschinenbau**

Vor der Markteinführung eines neuen Produkts im Bereich Maschinenbau ist es notwendig, dieses einer Sicherheits-, Qualitäts- und Gebrauchstauglichkeitsprüfung zu unterziehen. Die Prüfung des Produkts und die damit verbundene Zertifizierung führen unabhängige, entsprechend qualifizierte Institutionen (z. B. TÜV, DEKRA oder akkreditierte Prüflabore) nach definierten Bewertungskriterien und vorgegebenen Standards durch. Die auf diese Weise gewährleistete neutrale Fertigungsüberwachung sichert die Einführung des Produkts ab und kann die grenzüberschreitende Markteinführung beschleunigen. Zugleich werden Haftungsrisiken minimiert und mögliche Reklamationsansprüche innerhalb des Gewährleistungszeitraums eingegrenzt.

Allerdings gelten international verschiedene Prüfungs- und Nachweisstandards, die für deutsche Hersteller ebenfalls maßgeblich sein können. Im europäischen Wirtschaftsraum wird die Sicherheit von Maschinen in der Richtlinie 2006/42/EG geregelt. Im Zuge des sogenannten Konformitätsbewertungsverfahrens, dessen erfolgreicher Abschluss mit der weithin bekannten „CE“-Kennzeichnung bestätigt wird, müssen Herstellende den Nachweis erbringen, dass ihr Produkt den gesetzlichen Vorgaben der Europäischen Union vollauf genügt. Für die Beurteilung des jeweiligen Risikos sind dabei sämtliche vom betreffenden Produkt ausgehenden Gefahren und Gefährdungen beispielsweise durch Konstruktionspläne und Berechnungen zu dokumentieren. Deutsche oder europäische Maschinenbau-Produkte, die nach Nordamerika exportiert werden sollen, müssen dagegen anderen technischen Bedingungen entsprechen (z. B. gelten in den USA die Regularien des American National Standards Institute, ANSI). Zudem bestehen hier eigene Produkthaftpflichtrisiken, die uneingeschränkt auch für additiv gefertigte Produkte zu berücksichtigen sind.

... im Flugzeugbau

Um größtmögliche Sicherheit im Flugverkehr zu gewährleisten, benötigen sämtliche Flugzeug-Neubauten und -ertüchtigungen sowie Ersatzteile vor der Verkehrsfreigabe in Deutschland eine Muster- bzw. Einzelstückzulassung. Dabei wird überprüft, ob die jeweils zugrunde liegenden Vorschriften hinreichend erfüllt sind. Zuständige Zulassungsstellen sind je nach Einsatzort der Luftfahrzeuge entweder das Luftfahrt-Bundesamt oder die European Aviation Safety Agency (EASA). Da die Additive Fertigung im Flugzeugbau – basierend auf numerisch aufwendiger Topologie-, Form- und Gewichtsoptimierung – zunehmend bionische, d. h. filigrane, gitterartige und mit Hohlstellen durchsetzte Strukturen hervorbringt, die deutlich von herkömmlichen Konstruktionstypen abweichen, kommt einer Neuregelung der Muster- und Einzelstückzulassung große Bedeutung zu.

Box: Qualitätssicherung ...

... im Bauwesen und konstruktiven Ingenieurbau

Bei den im Bauwesen durch Additive Fertigung produzierten Komponenten und Systemen (Bauteile, Baugruppen, Häuser, Brücken, Tragsystemkomponenten etc.) handelt es sich im juristischen Sinne um „nicht geregelte Bauprodukte“ oder „nicht geregelte Bauarten“. Solche Komponenten und Systeme weichen von bestehenden technischen Regeln wesentlich ab oder entziehen sich sogar gänzlich dem Geltungsbereich konventioneller technischer Regeln und Normen. Vor dem praktischen Einsatz und Gebrauch derartiger Produkte ist in Deutschland daher die Zustimmung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) einzuholen. Dies erfolgt je nach Fall entweder in Form einer „allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ)“ oder durch „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“. Hierfür sind vom Herstellenden oder Anbietenden des jeweiligen Produkts beim DIBt ein Antrag auf Zulassung einzureichen und ggf. experimentelle Untersuchungen sowie eine gutachterliche Stellungnahme vorzulegen, aus der die Zuverlässigkeit des Produkts für den betreffenden Anwendungsbereich zweifelsfrei hervorzugehen hat. Eine „allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“ gilt im Gegensatz zur „Zustimmung im Einzelfall“ in sämtlichen Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland.

... bei Medizinprodukten und in der Medizintechnik

Sind additiv hergestellte Produkte für den Einsatz im medizinischen oder medizintechnischen Bereich vorgesehen, müssen sie in Deutschland als Medizinprodukte behandelt werden und unterliegen damit dem Medizinproduktegesetz. Der Begriff „Medizinprodukt“ bezeichnet einen Gegenstand oder Stoff, der zu medizinisch-therapeutischen oder diagnostischen Zwecken beim Menschen verwendet wird und dessen Hauptwirkung physikalisch oder physikochemisch erfolgt. In Abgrenzung zu den so definierten Medizinprodukten werden Stoffe regulatorisch hingegen als Arzneimittel behandelt, wenn sie primär eine pharmakologische, metabolische oder immunologische Wirkung haben. Auf diese Weise klassifizierte Stoffe unterliegen in Deutschland dem Arzneimittelgesetz.

Die Abgrenzung zwischen Medizinprodukt und Arzneimittel kann im Einzelfall schwierig sein. Eine mittels Laserschmelzverfahren aus Titanwerkstoffen additiv hergestellte Hüftpfanne beispielsweise stellt zunächst ausschließlich ein Medizinprodukt dar. Wird dieselbe, individuell gefertigte Hüftpfanne anschließend jedoch mit pharmakologisch wirksamen Stoffen beschichtet, die nach der Implantation in das menschliche Gewebe eindringen, verwischen die Grenzen zum Arzneimittel. Auch im Falle von Gewebeersatz, der im Sinne des „Tissue Engineering“ mit Bioprinting-Technologie hergestellt wird, ist die Abgrenzung zwischen Medizinprodukt und Arzneimittel schwierig, weil das entsprechende Implantat im menschlichen Körper mit angrenzenden, körpereigenen Zellen interagiert. Die Schwierigkeit einer exakten Bestimmung im Sinne des Gesetzes erhöht sich noch, wenn den additiv gefertigten Hydrogelen neben den eingebetteten Zellen zusätzliche Stoffe (z. B. funktionelle Proteine, Wachstumsfaktoren etc.) beigemischt werden, die das Einwachsen des Gewebeersatzes in den menschlichen Körper und dessen biologische Funktionalität fördern sollen.

Für die Prüfstellen, die als „Benannte Stellen“ bzw. „Notified Bodies“ für die Zulassung mittels „Tissue Engineering“ hergestellter Produkte zuständig sind, ist es daher oft schwierig zu beurteilen, ob die Zulassung des Produkts allein den Vorgaben des Medizinproduktegesetzes oder zusätzlich auch denen des Arzneimittelgesetzes gemäß zu erfolgen hat. Die hieraus resultierende Unsicherheit für Herstellende und Anwendende stellt in Deutschland derzeit ein maßgebliches Hemmnis für die Überführung innovativer, additiv gefertigter Produkte in die klinische Anwendung dar.

die Ausgangsmaterialien³² als auch für die Herstellungsprozesse und das fertiggestellte Produkt. Seit Ende 2013 gibt es daher Bemühungen der Internationalen Organisation für Normung (International Organization for Standardization, ISO) und der ASTM International (ursprünglich: American Society for Testing and Materials), die Anforderungen auf den unterschiedlichen Ebenen der Fertigung in spezifischen Richtlinien abzubilden.³³ Resultat dieser Bemühungen ist die Formulierung übergeordneter Standards („General Top-level Standards“), die relevante Begriffsdefinitionen enthalten, aber auch Prozesse, Materialien, Datenformate sowie allgemeine Test- und Prüfmethoden beschreiben. Zudem erfassen sogenannte kategorienbezogene Standards („Category Standards“) darüber hinaus auch produktbezogene mechanische Testverfahren und spezielle Standards („Specialized Standards“), also applikations- und branchenspezifische Normen beispielsweise für Produkte, die in der Luftfahrt,³⁴ der Medizintechnik oder der Automobilindustrie Verwendung finden.

Eine weitere Herausforderung im Kontext von Qualitätssicherung und Standardisierung stellt der Entwurf von Bauteilen dar. So können branchenspezifisch etablierte Bemessungsgrundlagen bei der Konzeption von Bauteilen für eine additiv zu vollziehende Fertigung nicht ohne Weiteres angewandt werden. Dabei hängen die Werkstoffkennwerte, die den Regeln für eine ausreichende Dimensionierung von Bauteilen zugrunde liegen, vom Fertigungsprozess und möglicherweise von der Bauteilgeometrie selbst ab. Deshalb sind zur Qualitätssicherung die geometrie- und herstellungsbedingten Produkteigenschaften mit numerischen Simula-

tionsverfahren a priori zu ermitteln bzw. abzuschätzen. Zum Teil ist es zusätzlich notwendig, die Ergebnisse solcher Simulationen zusätzlich experimentell zu überprüfen.

Die besondere Relevanz von Simulationen für die Additive Fertigung ergibt sich daraus, dass sich Iterationsschleifen und Festigkeitsnachweise im Gegensatz zur Serienproduktion, beispielsweise im Automobilbau, für individualisierte Produkte aus Kostengründen nur in geringem Umfang durchführen lassen. Um dennoch sichere, in Gewicht und Auslastung optimierte Produkte kostengünstig auf den Markt bringen zu können, müssen die Wechselwirkungen zwischen den Fertigungsparametern und der Festigkeit des entsprechenden Bauteils also bekannt sein.

Das zentrale Ziel sämtlicher Simulationen und Experimente im Prozess der Additiven Fertigung ist die Sicherstellung der geforderten Lebensdauer eines Bauteils, also der zeitlich befristete Ausschluss funktionsgefährdenden Materialversagens. Je nach Branche kommen dabei unterschiedliche Versagenskriterien zum Einsatz, im Flugzeugbau beträfe dies beispielsweise einen Rissfortschritt bis zu einer vorab definierten maximalen Risslänge. Die Definition der für eine Simulation der Lebensdauer zugrunde gelegten Parameter ist allerdings nicht unproblematisch, da, wie oben erläutert, beispielsweise der Widerstand des Materials gegen Ermüdungsbruch stets prozessabhängig ist. Eine zuverlässige Einschätzung additiv gefertigter Bauteile unter Ausnutzung des Leichtbaupotenzials erfordert daher ein Bemessungskonzept, das die wesentlichen Einflussgrößen für die Lebensdauer zyklisch beanspruchter Bauteile berücksichtigt: Werkstoff, Geometrie, Fertigung sowie Belastung einschließlich durch Umwelteinflüsse (z. B. Schwingungsrissskorrosion). Über diese essenzielle Aufgabe der Qualitätssicherung hinaus dienen Simulationen im Prozess der Additiven

³² VDI, 2018a.

³³ „ISO/TC 261 – Additive manufacturing“, o. J., und ASTM International, o. J.

³⁴ Siehe hierzu auch Kapitel 4.1, „Die Luftfahrt vor epochalen technischen Veränderungen“, im Leopoldina-Diskussionspapier „Zukunftsfähigkeit der Luftfahrtforschung in Deutschland“, Levedag et al., 2018.

Fertigung zudem der industriell wichtigen Optimierung von Produktionsprozessen, sodass die additiv gefertigten Produkte die anforderungsspezifischen Eigenschaften aufweisen und zugleich preiswert und damit wirtschaftlich sind.

3.2.2 Empfehlungen zur Normung und Prüfung

Eine zentrale Herausforderung im Zusammenhang der Additiven Fertigung stellt die Konzeption der Qualitätssicherung dar. Dabei geht es vor allem darum, Qualitätssicherung zukünftig noch wesentlich stärker systemisch zu denken als im Falle herkömmlicher Fertigungsprozesse. Das bedeutet, dass Maßnahmen der Qualitätssicherung sich nicht bloß auf die Kontrolle von einzelnen Bauteilen und deren Eigenschaften beschränken, sondern dass diese Maßnahmen als integrative Komponente der gesamten Fertigungskette zu verstehen sind. Bestehende Normen sind entsprechend den Erfordernissen der Additiven Fertigung anzupassen.

Beispiel für einen solchen systemischen Ansatz in der Qualitätssicherung der Additiven Fertigung ist die Erstellung sogenannter Digitaler Zwillinge, die Materialqualität, Aufbau und gegenwärtigen Status sowohl der Fertigungsmaschine als auch der additiv gefertigten Bauteile abbilden. Bei Digitalen Zwillingen handelt es sich also um die nahezu lückenlose virtuelle Abbildung eines konkreten Produkts und seiner Entstehung. Ermöglicht wird diese Abbildung durch die zum Teil sensorgestützte Übertragung aller verfügbaren Informationen zu Materialien, Prozessen, Randbedingungen etc. in den digitalen Raum. Die enorme Menge der so generierten und für die Simulation nutzbaren Daten soll annähernd Deckungsgleichheit zwischen virtuellen und realen Bedingungen herstellen und auf diese Weise präzise Vorhersagen über die Eigenschaften additiv gefertigter Produkte erlauben – mit der gleichen Zuverlässigkeit, wie sie bei experimentellen Produkttests in der Realität erreicht wird.

Um die Qualitätssicherung für die Additive Fertigung zu gewährleisten, empfehlen die Akademien die folgenden Anpassungen von Normen und Prozessen:

Aus dem Design- und Bemessungsprozess resultierende Anforderungen an Bauteileigenschaften direkt in die Fertigungsparameter einfließen lassen

Entsprechend der Möglichkeiten der Additiven Fertigung sollten die Kriterien zur Qualitätsbemessung stärker zielgerichtet auf die einzelnen Bauteile ausgerichtet werden. Es ist möglich, Qualitätsansprüche, nach denen ein Bauteil additiv gefertigt wird, entsprechend den konkreten Belastungen festzulegen, denen es in der Anwendung ausgesetzt ist. Das würde bedeuten, dass ein weniger belastetes Bauteil geringeren Qualitätsstandards genügen müsste als ein hochbelastetes Bauteil. Auf diese Weise könnte die Fertigung wirtschaftlicher gestaltet werden, ohne dabei die Sicherheit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen. Daher wird empfohlen zu prüfen, inwiefern sich prozessorientierte Kriterien der Qualitätssicherung für die Additive Fertigung formulieren lassen.

Methoden der Co-Simulationen und Co-Optimierungen in Simulationsmodellen stärken

Um einen kohärenten Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Simulationsmodellen zu ermöglichen, sollten Entwicklung und Einsatz solcher Methoden vorangetrieben werden, die durch parallele Simulationen und Optimierungen (Co-Simulationen und Co-Optimierungen) ein effizientes „Systems Engineering“, d. h. bei ganzheitlicher Betrachtung eines Produktlebenszyklus, erlauben. Die hierzu erforderlichen Informations- und Kommunikations- bzw. Softwaresysteme verlangen die Definition geeigneter Schnittstellen für den Datenaustausch, deren Formate zunächst in Richtlinien, später in Normen festzuschreiben sind.

Forschung zur Softwareentwicklung stärken und vernetzen

Um international konkurrenzfähig zu bleiben, ist es erforderlich, dass Forschung, Softwareentwicklung und Industrieunternehmen, die in der Additiven Fertigung engagiert sind, kooperieren und regelmäßigen Austausch pflegen. Zudem müssen Produzenten von 3D-Druckern und Fertigungsrobotern sowie Materialhersteller in die Entwicklungsprozesse eingebunden werden.

Normen und Richtlinien an die Erfordernisse der Additiven Fertigung anpassen

Die in der Produktion allgemein geltenden Normen und Richtlinien sind an die Gegebenheiten und Gesetzmäßigkeiten der Additiven Fertigung in all deren Anwendungsbereichen anzupassen, ggf. auch neu zu fassen. Das gilt insbesondere im Hinblick auf Erzeugnisse, die mit konventioneller Fertigung bislang nicht hergestellt werden können.³⁵ Aufgrund der Komplexität der Fertigungsbedingungen und der möglichen Individualität der Produkte sind zudem alternative Nachweisformate zur Erfüllung der Normen erforderlich.

Die entsprechenden Normen und Richtlinien werden durch die zuständigen Normungsorganisationen angepasst. Die Neustrukturierung bzw. Neufassung von Normen, insbesondere mit Blick auf europäische Standards nach den Regularien der europäischen Normungsorganisationen (Comité Européen de Normalisation, CEN; Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC; European Telecommunications Standards Institute, ETSI; Eurocodes), ist komplex und zeitaufwendig. Nationale Interessen (Deutsches Institut für Normung, DIN; Verein Deutscher Ingenieure, VDI etc.) sind dabei ebenso zu berücksichtigen wie die internationale Normungspraxis, die im Zuge zunehmender Globalisierung immer wichtiger wird. Universitäts- und Hochschulforschung sind gefordert, sich verstärkt in diesen Prozess einzubringen, um sich möglichst rasch auf gemeinsame Standards und Normen zu verständigen.

Bemessungskonzepte anpassen

Da Regeln für die Dimensionierung von Bauteilen (Bemessungskonzepte) im Rahmen der Additiven Fertigung nicht ohne Weiteres angewendet werden können, sind alternative Bemessungskonzepte zu entwickeln. Diese müssen aber auf die Besonderheiten der Additiven Fertigung ausgerichtet werden. Erfolgreiche Konzepte sind unbedingt in die allgemeinen Bemessungsrichtlinien (z. B. „Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau“, FKM-Richtlinie) zu integrieren und damit für eine breite Anwendung verfügbar zu machen.

Die verallgemeinerungsfähigen Kennwerte dieser Bemessungskonzepte können durch experimentelle Bauteiluntersuchungen ergänzt werden, die spezifische Kenngrößen generieren. Solche Kenngrößen sind notwendig, um die Potenziale der Additiven Fertigung, beispielsweise in den Bereichen des Leichtbaus und der Medizintechnik, auszuschöpfen. Unternehmen mit großen Forschungs- und Entwicklungsbudgets werden zur Erzeugung von Wettbewerbsvorteilen aller Voraussicht nach zukünftig komplett eigenständige, bauteilspezifische Bemessungsmethoden entwickeln und diese mithilfe interner Richtlinien und/oder Softwaretools umsetzen. Um Mehrfachentwicklungen zu vermeiden, sollte das hiermit verbundene Know-how einem breiten Anwenderspektrum zugänglich gemacht werden. Dies könnte im Rahmen eines Arbeitskreises des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) erfolgen, in dem Vertreter großer, forschungsstarker Firmen ihre Expertise einbringen.

³⁵ Beispiele wären hochbelastbare Turbinenschaufeln im Maschinen- oder Flugzeugbau, die mithilfe Additiver Fertigung nun auch gekrümmte, unregelmäßige innere Hohlräume zur optimalen Kühlung bei thermischer Beanspruchung enthalten können, oder Tragstrukturen und Bauteile, die als Ergebnis einer numerisch aufwendigen Topologieoptimierung filigranen biologischen Gitterstrukturen ähneln.

Forschung und Entwicklung zur Materialsicherheit vorantreiben

Sicherheit und Zuverlässigkeit von additiv gefertigten Bauteilen müssen gewährleistet werden. In der Forschung zum Einsatz metallischer Werkstoffe in additiven Fertigungsverfahren wird derzeit intensiv daran gearbeitet, möglichst hohe Dichten und damit auch höhere Festigkeiten zu realisieren. Bisher ist das Werkstoffverhalten unter zyklischer Beanspruchung (Betriebsfestigkeit) allerdings noch nicht ausreichend untersucht, sodass eine sichere und zuverlässige Bauteilfunktion bzw. Integrität im Rahmen additiver Fertigungsprozesse nicht immer zu gewährleisten ist. Es ist zu erwarten, dass auf Basis neuer mehrskaliger Modellierungs- und Simulationstechniken erweiterte Erkenntnisse sowohl über die grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten additiv verwendeter Materialien als auch über deren elektronische und kristallografische Struktur gewonnen werden können – und somit auch über das makroskopische Materialverhalten.

Da die Unsicherheiten in Bezug auf die Funktionalität und die Integrität von additiv gefertigten Bauteilen nicht zuletzt auch eine beträchtliche Markteintrittsbarriere und somit ein Anwendungshindernis darstellen, bedarf es hier verstärkter, interdisziplinär angelegter Forschungsbemühungen. Solche Bemühungen sollten insbesondere auf die Modellierung neuer Werkstoffe und das Design von maßgeschneiderten Materialeigenschaften („Advanced“ bzw. „Smart Materials“) hin ausgerichtet sein.

3.3 Herausforderungen bei der Synthese neuer Materialien und Materialkombinationen

Die große Vielfalt additiver Fertigungsverfahren, die gegenwärtig zur Verfügung steht, erfordert eine ebenso große Vielfalt verwendbarer Materialien, da jeder Fertigungsprozess für unterschiedliche Materialklassen entwickelt wurde. Dabei reicht die Skala der Werkstoffe von Biomaterialien über Kunststoffe bis hin zu metallischen Komponenten, aber auch keramische und zementgebundene Materialien spielen eine zunehmend wichtige Rolle. Während für einige Fertigungsverfahren bereits verschiedene Werkstoffe verfügbar sind (z. B. polymere Werkstoffe und Legierungen bei der Verarbeitung von Metallen und Kunststoffen), steht die Entwicklung von Verfahren, bei denen Sand (für Gussformen), Glas, Keramik, Beton, Hydrogele³⁶ oder Lebensmittel eingesetzt werden, hingegen erst am Anfang.³⁷ Auch Verfahren, die prinzipiell verschiedene Werkstoffe innerhalb einer Materialklasse verarbeiten

könnten, werden oft lediglich für ein- oder wenige Werkstoffe eingesetzt. Beispielsweise können Laser-Pulverbett-Verfahren viele verschiedene thermoplastische Kunststoffe verarbeiten, jedoch überwiegt die Anwendung von Polyamiden deutlich gegenüber allen anderen Werkstoffen. Ähnlich ist es auch beim Elektronenstrahl-Pulverbett-Verfahren, das hauptsächlich mit Titanlegierungen durchgeführt wird, obwohl zahlreiche Alternativen mittlerweile erprobt sind.

Zahlreiche Werkstoffformulierungen, die in der Additiven Fertigung heute zum Einsatz kommen, wurden ursprünglich für andere Herstellungsverfahren entwickelt.³⁸ In der Gruppe der metallischen Werkstoffe betrifft das beispielsweise Legierungen, die zunächst für herkömmliche Formgebungsverfahren wie Gießen, Schmieden oder Flamspritzen entwickelt wurden.³⁹ Da additive Verfahren gänzlich andere Zeit-Temperatur-Profile aufweisen und bei ihnen keine mechanische Umformung des Materials stattfindet,

³⁶ Hochgradig wasserhaltige, zellverträgliche Materialien.

³⁷ Gu et al., 2012; Herzog et al., 2016.

³⁸ Gökce et al., 2016.

³⁹ Gu et al., 2012; Herzog et al., 2016.

det, unterscheidet sich das Gefüge (die Struktur des Werkstoffs auf der Mikro- und Nanometerskala) oft maßgeblich von demjenigen konventionell verarbeiteter Werkstoffe.⁴⁰ Eine Vielzahl von Legierungseigenschaften, wie die Festigkeit oder der Widerstand des Materials gegen Rissausbreitung, wird durch das Gefüge des entsprechenden Werkstoffs bestimmt. Daher üben die Fertigungsverfahren großen Einfluss auf die Materialeigenschaft im Endprodukt aus. Allerdings ist in diesem Zusammenhang auch festzuhalten, dass einige Materialklassen für die Additive Fertigung gegenwärtig noch gar nicht zur Verfügung stehen, da die entsprechenden Werkstoffe trotz Optimierung der Prozessparameter nach der Verarbeitung in der Regel Defekte wie Poren oder Mikrorisse enthalten. Um für die Additive Fertigung optimale Werkstoffeigenschaften erzielen zu können, müssen also entweder neue Ausgangsmaterialien entwickelt werden, die speziell auf die Bedingungen solcher Verfahren abgestimmt sind, beziehungsweise die Zusammensetzungen der Werkstoffe muss gleichzeitig mit der Anpassung der Prozessparameter weiterentwickelt werden.⁴¹

Die Eigenschaften eines Werkstoffs können auch beeinflusst werden, indem mithilfe der Prozessführung auf die Gefügeentstehung eingewirkt wird. Ein solches Vorgehen stellt beispielsweise die Verwendung verschiedener Prozessparametersätze beim selektiven Elektronenstrahl-Schmelzen von Nickelbasis-Superlegierungen dar. Diese verändern den Erstarrungsvorgang und erzeugen so an unterschiedlichen Stellen des entsprechenden Objekts entweder kleine runde oder große langgestreckte Körner.⁴² Solche unterschiedlichen Morphologien wirken sich auf Eigenschaften wie die

Kriechfestigkeit des Materials – also dessen mechanische Beständigkeit bei hohen Temperaturen – aus, die wiederum für Funktionalität und Einsatzfähigkeit des Produkts relevant sind.

Trotz der immensen Bedeutung von Materialeigenschaften und der zahlreichen Möglichkeiten zur Einflussnahme im Rahmen additiver Fertigungsverfahren, die hier nur angedeutet werden können, steht die Forschung zur Optimierung von Werkstoffen und Verfahren gegenwärtig noch am Anfang. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass der überwiegende Teil additiv hergestellter Bauteile noch immer mit einer verhältnismäßig kleinen Anzahl etablierter Materialien produziert wird. Neue Materialien zu entwickeln, sie gemeinsam mit den korrespondierenden Verarbeitungsprozessen zu zertifizieren und im Markt zu etablieren, ist üblicherweise mit hohem Zeitaufwand verbunden, sodass die Entwicklung additiver Verfahren deutlich schneller voranschreitet als die Entwicklung neuer und geeigneter Materialien. Zwar gibt es bereits einzelne Werkstoffe, die speziell für additive Fertigungsverfahren optimiert oder sogar neu entwickelt worden sind,⁴³ allerdings besteht im Bereich der Materialentwicklung prinzipiell ein (innovationsfeindlicher) Teufelskreis: Da bis auf wenige Ausnahmen momentan keine Nachfrage für neue Werkstoffe am Markt besteht, werden bislang auch kaum Anstrengungen unternommen, entsprechende Innovationen zu generieren oder zur Marktreife zu bringen. Das wiederum verfestigt die – falsche – Vorstellung, dass bestimmte Prozesse auf bestimmte Werkstoffe festgelegt seien.

Ein noch größeres Potenzial als Werkstoffe, die lediglich durch geringfügige Modifikationen für die Additive Fertigung ertüchtigt werden, besitzen Materialien, die gezielt für diese Fertigungsverfahren

⁴⁰ Jägle et al., 2016.

⁴¹ Engeli et al., 2016.

⁴² Dehoff et al., 2015; Körner et al., 2014.

⁴³ Beispielsweise Martin et al., 2017.

entwickelt werden.⁴⁴ Solche Materialien nutzen die spezifischen Eigenheiten additiver Fertigungsverfahren, um verbesserte Produkteigenschaften zu erzeugen.⁴⁵ Die Eigenheiten der additiven Fertigung von metallischen Werkstoffen sind beispielsweise die hohen Abkühlraten im Prozess und die zyklische Wiedererwärmung im weiteren Verlauf (intrinsische Wärmebehandlung), der pulvermetallurgische Charakter sowie die Möglichkeit, durch Variation der Prozessparameter Einfluss auf das Gefüge und die kristallografische Textur der Legierungen zu nehmen. Aber auch die Möglichkeit der Werkstoffmodifikation durch gezieltes Einstellen der Prozessatmosphäre ist typisch für metallische Werkstoffe. Auf diese Weise können Materialeigenschaften erzeugt werden, die mit anderen, konventionellen Fertigungsverfahren nicht zu erreichen sind (siehe auch Box „Neue Materialeigenschaften durch Additive Fertigung“). Bei polymeren und keramischen Werkstoffen lassen sich die spezifischen Prozessbedingungen für das Design neuer Materialien zudem in ganz ähnlicher Weise nutzen. Perspektivisch dürften solche neu entwickelten Materialien der Additiven Fertigung zukünftig ein weiteres Alleinstellungsmerkmal hinzufügen.

Eine interessante Möglichkeit des Materialdesigns sowohl von Kunststoffen als auch von Metallen ist die Additivierung mit Nanopartikeln, also Kleinstteilchen, die in der Regel weniger als ein Milliardenstel Meter messen. Solche Nanopartikel können einerseits dem Grundwerkstoff bestimmte Funktionalitäten (z. B. optische, magnetische,⁴⁶ antibakterielle oder zellwachstumsfördernde Eigenschaften⁴⁷) verleihen, andererseits können sie für den Prozess der Materialverarbeitung selbst vorteilhaft sein: Sowohl bei der Photopo-

lymerisation als auch beim Laser-Sintern können sie die Lichteinkopplung verstärken.⁴⁸ Beim Laser-Pulverbett-Schmelzen von metallischen Werkstoffen, die zu Rissen neigen, können Nanopartikel als sogenannte Kornfeiner wirken und so das geforderte rissfreie und kugelige Gefüge erzeugen.⁴⁹ Forschungsaktivitäten in diesem Feld widmen sich aktuell der minimal erforderlichen Additiv-Dosis, der Kristallisationskeimauswahl („Phase Matching“) sowie einer verringerten Partikelaggregation.⁵⁰ Aufgrund des erheblichen Potenzials solcher Technologien sowohl für die Optimierung von Bauteileigenschaften als auch für die Prozessierbarkeit besteht erheblicher Forschungsbedarf im Bereich der Formulierung von nanofunktionalisierten Ausgangsstoffen für die Additive Fertigung. Weitere wichtige Aspekte der Werkstoffforschung sind Ressourcenschonung und die Vermeidung möglicher Umweltbelastungen (siehe hierzu Kap. 5.3.2).

3.3.1 Zentrale Felder der Materialforschung

Da für die Additive Fertigung eine nahezu unüberschaubare Anzahl potenzieller Materialien existiert, können an dieser Stelle nicht alle aktuell beobachtbaren Entwicklungen in diesem Themenfeld dargestellt werden. Daher werden im Folgenden lediglich einzelne Aspekte der hier relevanten Materialforschung und -entwicklung näher beleuchtet.

3.3.1.1 Rohstoffe

Neben der Zusammensetzung der Werkstoffe ist auch die Art ihrer Bereitstellung für die Additive Fertigung von großer Bedeutung. In vielen Prozessen (z. B. bei SLM oder 3DP) werden pulverförmige Ausgangsmaterialien verwendet (sowohl für Metalle als auch für Kunststoffe). An solche Pulver werden hohe Ansprüche mit Blick auf die Teilchengrößenverteilung, die Teilchenform, die Fließfähig-

44 Universität Duisburg Essen, o. J.

45 Beispielsweise Harrison, Todd & Mumtaz, 2015; Kürnstner et al., 2017; Martin et al., 2017.

46 Kim et al., 2018.

47 Blaeser et al., 2016.

48 Jonušauskas et al., 2016; Lau et al., 2014.

49 Martin et al., 2017.

50 Hupfeld et al., 2018.

Box: Neue Materialeigenschaften durch Additive Fertigung

Aluminium-Scandium-(Al-Sc-)Legierungen wurden speziell für die Luftfahrt entwickelt. Sie erhalten ihre außergewöhnliche Festigkeit durch Al₃Sc-Nanopartikel (Ausscheidungen), die fein verteilt im Material die plastische Verformung behindern. Wegen der geringen Löslichkeit von Scandium in Aluminium können mit konventionellen Herstellungsmethoden lediglich ca. 0,3 Gewichtsprozent Scandium zulegiert werden, was die Anzahl der erwünschten Ausscheidungen limitiert. Da in additiven Fertigungsverfahren (z. B. beim selektiven Laserstrahl-Schmelzen, SLM) sehr hohe Abkühl- und Erstarrungsraten vorherrschen, können Ungleichgewichtszustände eingefroren werden. Dies ermöglicht beispielsweise die Herstellung von sogenannten metallischen Gläsern. Bei Al-Sc-Legierungen lässt sich auf diese Weise bis zur vierfachen Menge Scandium in die Legierung einbringen, was zu einer entsprechenden Steigerung der Materialfestigkeit führt.

keit und den Feuchtigkeitsgehalt, aber auch andere Eigenschaften gestellt. Die Verfahren zur Handhabung der entsprechenden Pulver müssen daher stets im Gleichklang mit den Verfahren zur Objektherstellung optimiert werden, wobei sich „Best Practices“ in den betreffenden Industriezweigen erst noch zu etablieren haben. Dabei ist zu beachten, dass die Pulverhandhabung mit einer prozessbegleitenden, also über die Eingangskontrolle hinausgehenden Pulvercharakterisierung einhergeht, da solche Pulver einer ständigen Qualitätsänderung (Alterung) unterliegen. Deshalb sollte die Entwicklung quantitativer Indikatoren weiter vorangetrieben werden, die in der Praxis reproduzierbar und leicht zu analysieren sind und als Qualitätsschwellenwert dienen können. Zudem könnte die Herstellung von Werkstoffen, die alterungsbedingten Qualitätsveränderungen in deutlich geringerem Ausmaß als bisherige Materialien unterliegen, also beispielsweise weniger anfällig für die Aufnahme von Sauerstoff und damit einhergehenden chemischen Reaktionen sind, zu einer wesentlich nachhaltigeren und kostengünstigeren Anwendung der Additiven Fertigung beitragen.

Der kommerzielle Erfolg der Additiven Fertigung in verschiedenen Marktsegmenten wird zukünftig entscheidend davon abhängen, ob die Forschung kos-

tengünstigere Methoden zur Herstellung von Metall- und Kunststoffpulvern bereitstellen kann. Gegenwärtig wird in diesem Zusammenhang beispielsweise erforscht, wie Mikropulver beschichtet werden können (z. B. mit Nanopartikeln), um mittels einer verringerten Partikeladhäsion ihre Fließfähigkeit zu verbessern. Kommerziell wird dieses Verfahren bereits bei der Verwendung von Polyamidpulvern in der Additiven Fertigung genutzt.

3.3.1.2 Hilfsmittel

Für verschiedene Fertigungsprozesse werden zusätzlich zum Rohstoff Hilfsmittel benötigt, die für den Produktionserfolg zwar von entscheidender Bedeutung sind, allerdings nicht im fertiggestellten Bauteil verbleiben. Beim sogenannten Binder-Jetting-Verfahren beispielsweise wird Metallpulver mittels eines organischen Binders lokal verklebt und auf diese Weise eine Bauteilgeometrie erstellt. Im Anschluss an diesen Akt der Formgebung muss das Werkstück allerdings in speziellen Öfen entbindert, also vollständig vom Binder befreit und schließlich noch gesintert, also unter hohen Temperaturen und zum Teil unter Druck verdichtet werden. Die Entwicklung von Hilfsmitteln wie Bindern muss in diesem Fall parallel zur Entwicklung des eigentlichen Pulverrohstoffs vorangetrieben und mit dieser abgestimmt werden.

3.3.1.3 Anschließende Prozessierung

Für viele Materialien müssen nach der Formgebung mittels additiver Verfahren ein oder mehrere weitere Prozessschritte durchgeführt werden. Diese Nachbehandlungen zielen auf eine Erhöhung der Dichte (z. B. durch heißisostatisches Pressen), eine Verbesserung der Oberflächenqualität (z. B. elektrochemisches Polieren) oder eine Reduzierung der Eigenspannungen im Material (z. B. spannungsarmes Glühen). Obwohl solche Arbeitsschritte im Idealfall überflüssig sein sollten, sind sie in der Anwendung derzeit in vielen Fällen noch unumgänglich und werden dies auf absehbare Zeit auch bleiben. Ihre Anpassung und Optimierung sollte im Gleichklang mit der eigentlichen Materialentwicklung erfolgen.

3.3.1.4 Verbundwerkstoffe

Neben den einzelnen Materialklassen sind gegenwärtig auch Kombinationen, also Verbundwerkstoffe im Fokus der Forschung. Ziel ist es dabei, die positiven Eigenschaften mehrerer Werkstoffklassen miteinander zu kombinieren, um so die Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten für die Additive Fertigung zu erweitern. Insbesondere im Bereich der Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (z. B. oxid-, nitrid- oder carbidgefüllte Aluminium-, Eisen- und Titanlegierungen) sowie bei partikel- und faserverstärkten Kunststoffen wurden bereits entsprechende Fortschritte erreicht.⁵¹ Es gibt auf dem Markt daher erste Systeme, die beispielsweise kohle- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe (Lang- oder Kurzfasern) additiv verarbeiten können. Bei solchen Systemen ist der Füllstoff zumeist schon in den Rohstoff, etwa in das Kunststofffilament, eingebettet. Zudem sind auch bereits Filamente erhältlich, die mit Metallpartikeln gefüllt sind und mit einfachen FDM-Druckern verarbeitet werden können. Im Bauwesen spielen wiederum zementge-

bundene Faser-Verbundwerkstoffe eine wichtige Rolle. In der Kunststofftechnik sind hingegen Additivierungen und Beschichtungen verschiedener Grundwerkstoffe von Interesse, die solchen Materialien zusätzliche Funktionalität verleihen sollen, beispielsweise thermische Stabilität (flammgeschützte Polymere), erhöhte Wärmeleitfähigkeit, verbesserte Beschichtungsfähigkeit etc.

3.3.1.5 Metamaterialien

Mit dem Begriff „Metamaterialien“ oder „Architected Materials“ werden Materialien bezeichnet, die durch eine Strukturierung der Mikrostruktur – d. h. der Anordnung aller grundlegenden Partikel im Raum – neue, ungewöhnliche Eigenschaften erhalten.⁵² Üblicherweise entsteht die Mikrostruktur eines Werkstoffs durch gezielt geleitete Selbstorganisation, beispielsweise im Zuge von Phasenumwandlungen. Die Strukturierung von Metamaterialien findet hingegen im Rahmen eines Fertigungsprozesses statt.⁵³ Beispiele für solche prozessual hergestellten Metamaterialien sind Werkstoffe mit negativem Brechungsindex (üblicherweise für Mikrowellenstrahlung⁵⁴), mit besonders hoher akustischer Dämpfung,⁵⁵ mit negativem Poisson-Verhältnis⁵⁶ (Abb. 4) oder mit verbesserten Dissipationseigenschaften bei schockartiger Beanspruchung.⁵⁷

⁵² Liu & Zhang, 2011.

⁵³ Über die Metamaterialien hinaus spielt die Erforschung der effektiven Eigenschaften von Gitterstrukturen in der Additiven Fertigung eine große Rolle. So wird zum einen das Innere von Bauteilen oft aus Leichtbaugründen mit Gitterstrukturen gefüllt, anstatt massiv ausgeführt zu werden; zum anderen weisen Gitterstrukturen positive Eigenschaften bei der additiven Herstellung von medizinischen Implantaten auf, siehe hierzu Wang et al., 2016.

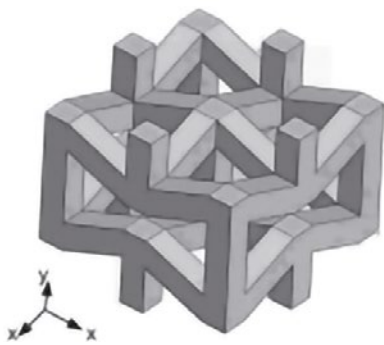
⁵⁴ Garcia et al., 2012.

⁵⁵ Kruisová et al., 2014.

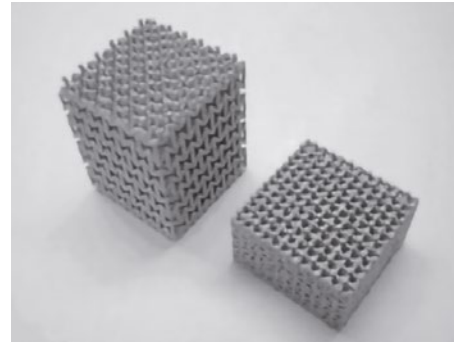
⁵⁶ Wang et al., 2016. Das Poisson-Verhältnis beschreibt die Eigenschaft eines Materials, das in einer Richtung gestaucht wird, sich in den Richtungen senkrecht zur Stauchachse auszudehnen. Ein negatives Poisson-Verhältnis bedeutet also, dass das Material sich entgegen dem üblichen, intuitiv verständlichen Verhalten in den Richtungen senkrecht zur Stauchachse ebenfalls verkleinert. Erreicht wird dieses Verhalten durch eine spezielle Anordnung von Gitterstrukturen.

⁵⁷ Roca et al., 2019; Mitchell, Pandolfi & Ortiz, 2014.

⁵¹ Dadbakhsh et al., 2019; Enrique et al., 2018; Ning et al., 2015.



a)



b)

Abbildung 4: a) Modell einer Elementarzelle und b) additiv gefertigte Gitterstrukturen mit negativem Poisson-Verhältnis (Bildquelle: Yang et al., 2012).

3.3.1.6 Multimaterialien bzw. Werkstoffverbunde

Konventionell gefertigte, hochkomplexe Bauteile (bzw. Baugruppen) bestehen üblicherweise aus einer Kombination von verschiedenen Werkstoffen. Ein Ziel bei der Weiterentwicklung der Additiven Fertigung ist es, solche Bauteile zukünftig in einem einzelnen, komplett digital gesteuerten Fertigungsschritt herstellen zu können, weshalb die Entwicklung von Methoden zur additiven Herstellung von Multimaterialien oder Werkstoffverbunden von großer Bedeutung für die Effizienz zukünftiger Fertigungsprozesse ist.⁵⁸ Die verschiedenen Verfahren, die für eine solche Verwendung prinzipiell infrage kommen, sind allerdings unterschiedlich gut geeignet. So erschweren Materialmischungen bei Verfahren, die ein Pulverbett beinhalten, das Recycling des Pulvers erheblich oder machen es sogar unmöglich. Die Wiederverwertung von überschüssigem Pulver, das nicht zum Werkstück verbunden oder verschmolzen wird, ist bei Pulverbett-Verfahren allerdings üblich und zudem notwendig, um kostengünstig und ressourcenschonend produzieren zu können. Verfahren, die stattdessen mit Bindern oder Absorbieren arbeiten, erlauben hingegen das vergleichsweise einfache selektive Aufbringen verschiedener Binder an unter-

schiedlichen Stellen des Bauteils. Je nach angestrebter Materialkombination (z. B. Metall/Metall, Metall/Polymer, Polymer/Keramik) müssen unterschiedliche Prozessstrategien verfolgt werden, für deren Entwicklung und Anpassung wiederum neue Simulationssoftware benötigt wird.

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Einsatzmöglichkeiten von Multimaterialien in der additiven Fertigung bei der Verarbeitung unterschiedlicher Kunststoffe in einem Prozess. So ist es beispielsweise bei der Herstellung von Sportschuhen möglich, relativ feste sowie gummielastische Polymere zu kombinieren und so wichtige Komponenten des Schuhs in einem einzigen 3D-Druck-Vorgang herzustellen.

3.3.1.7 Gradientenwerkstoffe

Eine spezielle Form der Anwendung von Multimaterialien in der additiven Fertigung stellt die Herstellung von sogenannten Gradientenwerkstoffen dar, also Materialien, die ihre Eigenschaften kontinuierlich entlang einer Raumrichtung (ggf. auch mehrerer Raumrichtungen) ändern. Eine solche Veränderung wird durch die schichtweise Modifikation der Materialzusammensetzung oder der Prozessparameter im additiven Herstellungsprozess erzielt.⁵⁹ Wie bei anderen Multimaterialien auch sind allerdings nicht alle

⁵⁸ Vaezi et al., 2013.

additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung solcher Werkstoffe geeignet.

Im Vergleich zur Herstellung von Multimaterialien mit abrupter Änderung der Werkstoffzusammensetzung besitzen Gradientenwerkstoffe den Vorteil, dass Probleme, die vom Fügen ungleicher Werkstoffe bekannt sind, mit ihrer Hilfe vermieden werden können. Inkompatible Werkstoffeigenschaften wie unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten oder sich an der Grenzfläche bildende unerwünschte Phasen führen dazu, dass die entsprechenden Grenzflächen geschwächt werden, sodass die Fügeverbindung eine Schwachstelle im Bauteil darstellt. Wenn durch einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Werkstoffen kritische Zusammensetzungsberei-

che hingegen gezielt umgangen werden, entfällt diese Schwachstelle.⁶⁰ Solche gradierten Übergänge sind unter anderem für die Raumfahrt interessant, beispielsweise bei der Herstellung von Raketentriebwerksteilen mit verändertem Kupfergehalt zur Einstellung der Wärmeleitfähigkeit. Weitere Anwendungsmöglichkeiten finden sich zudem im Bauingenieurwesen. Eine veränderliche Materialkomposition erlaubt die Justierung strukturmechanischer Eigenschaften des Materials wie dessen Wärmeausdehnung und leitfähigkeit, die Wasserdichtigkeit und Tragfähigkeit.⁶¹ Die Materialien können sich dabei im Hinblick auf ihre Porosität, Festigkeit und Steifigkeit, den Fasergehalt oder das Fasermaterial sowie auf Zuschlagstoffe, Beschichtungen etc. unterscheiden.

3.3.2 Empfehlungen zur Entwicklung neuen Materialien

Neue Materialien besitzen großes Potenzial für die Weiterentwicklung der Additiven Fertigung und ihrer Anwendungsmöglichkeiten, weshalb in ihre Erforschung dringend intensiviert werden muss. Dabei sollten allerdings nicht nur prozessbedingte Anpassungen von bereits bekannten Materialien analysiert und ihre Herstellung weiter forciert werden, sondern auch Anstrengungen unternommen werden, gänzlich neue Werkstoffe zu entwickeln, die die Eigenheiten additiver Fertigungsverfahren passgenau nutzen können. Solche Materialien mit hervorragenden mechanischen oder funktionellen Merkmalen sind perspektivisch geeignet, der Additiven Fertigung gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren auch in zusätzlichen Anwendungsgebieten einen beträchtlichen technischen und ökonomischen Vorteil zu verschaffen. Um die Entwicklung geeigneter Materialien für die Additive Fertigung weiter voranzutreiben und die genannten Vorteile somit auch tatsächlich realisieren zu können, empfehlen die Akademien die folgenden Maßnahmen:

Das Bewusstsein für die gegenseitige Beeinflussung von Material und Prozess stärken

Additive Fertigungsprozesse können großen Einfluss auf die Materialeigenschaften eines Bauteils ausüben. Je nach verwendeten Prozessparametern ergeben sich beispielsweise bessere oder schlechtere mechanische Festigkeiten. Um das Bewusstsein hierfür auch auf Anwenderseite zu stärken, sollte der Fertigungsprozess realitätsnah in die modellbasierte Prognose der Material- und Struktureigenschaften einbezogen werden. Dies kann durch eine Verbesserung der Kommunikation zwischen Anlagen- und Materialherstellern erreicht werden. Darüber hinaus ist der Zusammenhang von Herstellungsvorgang und Materialeigenschaften in neuen oder geänderten Richtlinien und Normen explizit hervorzuheben.

⁵⁹ Knoll et al., 2017; Ocylok, Weisheit & Kelbassa, 2010.

⁶⁰ Tammis-Williams & Todd, 2017.

⁶¹ Herrmann & Sobek, 2015 und in Kap. 3.3.2.

Standards für die Vor- und Nachbereitung schaffen

Die korrekte Vor- und Nachbereitung additiver Herstellungsvorgänge bedarf intensiver Erforschung und Standardisierung der eingesetzten Materialien. Das betrifft sowohl die Herstellung, Lagerung, Aufbereitung und Wiederverwendung von Ausgangsstoffen (z. B. Metallpulvern) als auch die Nachbehandlung der additiv gefertigten Bauteile (z. B. Oberflächen- und Wärmebehandlungen).

Forschung zur effizienten Herstellung und Verarbeitung neuer Werkstoffe und Multimaterialien intensivieren

Um neue Materialien in der Additiven Fertigung effizient verarbeiten zu können, bedarf es nicht nur der Entwicklung neuer und der Anpassung bereits verfügbarer Fertigungsprozesse. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Entwicklung der entsprechenden Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Zudem braucht es geeignete Softwareanwendungen zur Simulation der Materialeigenschaften innerhalb des Fertigungsprozesses, die bislang ebenfalls nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen.

Die Synthese der Rohstoffe für additive Fertigungsprozesse muss in Zukunft außerdem kostengünstiger und weniger energieintensiv zu bewerkstelligen sein, um den kommerziellen Erfolg und die Nachhaltigkeit der entsprechenden Technologien sicherzustellen. Dabei sind auch die Recyclingfähigkeit der Werkstoffe, ihre Umweltverträglichkeit und ihr Widerstand gegenüber Alterung zu berücksichtigen. Diese Themen sollten verstärkt im Fokus der Forschung stehen.

3.4 Herausforderungen bei der Additiven Fertigung von aktiven, multifunktionalen Bauteilen

Ein besonderes Interesse an additiv gefertigten multifunktionalen Bauteilen ergibt sich gegenwärtig aus der zunehmenden Bedeutung bestimmter technologischer Konzepte wie dem „Internet of Things (IoT)“ oder dem „Internet of Everything“ (IoE) und dem hiermit verbundenen Bedarf an intelligenten Produkten. Verfahren der Additiven Fertigung bieten wegen des prinzipiell vorhandenen Zugangs zum Bauteilinneren herausragende Möglichkeiten für die Integration funktionaler Bauteile, wie z. B. Sensoren. Sie sind aufgrund ihrer Flexibilität zudem besonders geeignet, Nutzen aus sensorisch ermittelten Lebenszyklusdaten zu ziehen, da eine Produktoptimierung hier vergleichsweise einfach umzusetzen ist.⁶² Die bereits oben skizzierte Spannbreite additiver Fertigungsverfahren erlaubt neben der Optimierung mechanischer Eigen-

schaften außerdem die Integration funktionaler Werkstoffe und Komponenten in Oberfläche oder Volumen eines Objekts.

Die einfachste Form einer Funktionalisierung stellen passive Lösungen dar, die dem Bauteil mittels einer bestimmten Materialkombination und/oder mithilfe einer spezifischen inneren Strukturierung funktionale Eigenschaften verleihen. Denkbare Beispiele für solche passiven multifunktionalen Materialien reichen von der Führung von Wärmeflüssen über gezielt eingebrachte Pfade aus höher wärmeleitenden Materialien (Werkstoffverbund, Materialkombination mit definierter Geometrie) bis hin zu Funktionalitäten der Selbstanpassung oder Selbstdiagnose (Self-X-Funktionalitäten).⁶³

Eine weitergehende Funktionalisierung additiv gefertigter Objekte lässt sich außerdem mithilfe elektronischer Komponenten (z. B. Sensoren, Aktoren, Energiespeicher, Signal- und Datenverarbeitung, Kommunikation etc.) sowie durch deren Kombina-

⁶² Lehnhus et al., 2015.

⁶³ Trask, Williams & Bond, 2007.

tion zu bauteilintegrierten elektronischen Systemen erreichen. Zu bewerkstelligen ist eine solche Ausstattung mittel- bis langfristig durch Entwicklung entsprechender Multimaterial-Lösungen. Alternativ stehen allerdings auch hybride Fertigungskonzepte zur Verfügung, die mehrere Verfahren miteinander verknüpfen und den Vorteil eines deutlich geringeren Entwicklungsaufwands mit sich bringen. Zudem bieten solche Konzepte die Möglichkeit, die materialspezifisch optimale Technologie einzusetzen und auf diese Weise Kompromisse bei Produktivität und Materialeigenschaften zum Zweck einer materialübergreifenden Lösung im jeweiligen Fertigungsprozess zu vermeiden. Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass sie eine Ausweitung der nutzerorientierten Produktindividualisierung auch auf Ebene der elektronischen Funktionalität ermöglichen. Dass bedeutet allerdings auch, dass eine Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren nicht isoliert erfolgen kann, sondern mit Forschungsaktivitäten in anderen innovativen Technologiefeldern eng verknüpft ist, wie z. B.: „Structural Electronics“, gedruckter und organischer Elektronik („Direct Write“), dem „Internet of Things“ oder dem „Internet of Everything“. Anwendungsszenarien für multifunktionale Bauteile, die technologieübergreifend entwickelt und hergestellt werden können, reichen von der Produktionslogistik (selbststeuernde Produktion) über medizintechnische Produkte (Erfassung von Nutzerdaten zu Diagnostik und Therapie) und die Überwachung von Bauteilen (Struktur- und Zustandsüberwachung als Voraussetzung für bedarfsgesteuerte und vorbeugende Wartung etc.) bis hin zu neuen Formen der Fertigungsorganisation („Usage-data enhanced Cloud-based Design and Manufacturing“).

Eine weitere Variante der Herstellung multifunktionaler Bauteile stellt der sogenannte 4D-Druck dar. Dabei handelt es sich um ein Fertigungsverfahren, bei dem die endgültige Objektgeometrie durch einen dem Druckprozess nachfolgenden, beispielsweise

thermisch initiierten, Formänderungsvorgang bestimmt wird. Eine solche Änderung kann sowohl einen einmaligen als auch einen reversiblen Vorgang darstellen. 4D-gedruckte Strukturen unterscheiden sich jedoch von den oben beschriebenen funktionalen Strukturen durch fehlende Voraussetzungen für eine flexible Interaktion mit anderen Produkten. Zwar besteht bei ihnen die Möglichkeit zur direkten Integration von Sensorik und Aktorik,⁶⁴ diese beruht allerdings ausschließlich auf vordefinierten Materialkombinationen und -anordnungen. Sie ermöglichen somit keine integrierte Datenverarbeitung, die eine situationsangepasste Adaption des Bauteilverhaltens erlauben würde.⁶⁵

Ein Beispiel für die einmalige Formänderung im Sinne des 4D-Drucks ist ein flächiges Bauteil, das sich im Anschluss an die Materialzufuhr und konsolidierung auffalten und damit eine dreidimensionale Gestalt annehmen kann.⁶⁶ Ein wichtiges Anwendungsfeld stellt der gesamte Bereich des sogenannten Bioprinting dar (siehe hierzu auch Kap. 4.1.2). Bei dieser Technologie wird die 3D-gedruckte Komponente (in der Regel zellbeladene Hydrogele) nach dem Druckvorgang durch Selbstorganisation der im Bioreaktor kultivierten Zellen umgebaut. Die gedruckte Trägermatrix (geladene Hydrogele) soll dabei durch die Zellen enzymatisch abgebaut werden und an ihrer Stelle eine native, neu gebildete, sogenannte extrazelluläre Matrix (durch Expression der verdruckten Zellen) entstehen.

Der 4D-Druck erfordert im Anschluss an den additiven Fertigungsprozess einen Stimulus und Materialien, die auf diesen Stimulus in definierter Weise reagieren. Die Mechanismen, über die die Änderung der Bauteilgeometrie angestoßen wird, sind an die verwendeten Materialien gekoppelt. Neben Formgedächtnispolymeren und

⁶⁴ Der Begriff „Aktorik“ bezeichnet das Erzeugen einer Bewegung oder Verformung.

⁶⁵ Tibbits et al., 2014.

⁶⁶ Ge, Qi & Dunn, 2013; Momeni et al., 2017.

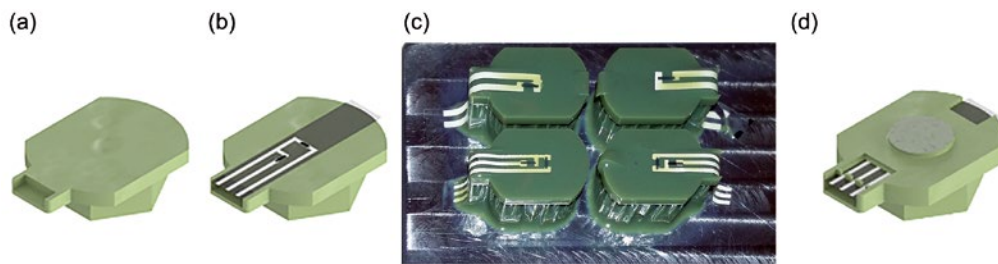


Abbildung 5: Herstellungsprozess einer additiv gefertigten intelligenten Schraube mit Dehnungsmessstreifen (DMS): (a) Druck des Schraubenkopfes; (b) Aufbringen und Ausrichten des DMS; (c) Fotografie der gedruckten Schraubenköpfe mit DMS; (d) Fortsetzung des Druckprozesses. Flüssiges Harz bedeckt die Schraubenköpfe während der Integration (Bildquelle: Gräbner et al., 2018, Available via license: CC BY 4.0). Polymerbasierte additive Fertigungstechniken erleichtern aufgrund der moderaten Verarbeitungsbedingungen die Integration elektronischer Komponenten. Anders als im Falle der meisten metall-basierten Verfahren wird dabei auch eine mechanische Anbindung an den Grundwerkstoff erreicht, was etwa die Realisierung einer zuverlässigen Dehnungssensorik gestattet.

-legierungen⁶⁷ kommen hierfür unter anderem hygroskopische Materialien zum Einsatz, die auf Feuchtigkeit mit einer massiven Zunahme des Volumens reagieren und in geeigneter Form und Kombination mit passiven Materialien zur Realisierung linearer Dehnungen und von Faltvorgängen genutzt werden können.⁶⁸ Außer Feuchtigkeit können auch Magnetfelder⁶⁹, Wärme und Licht oder verschiedene Kombinationen derselben als Stimuli fungieren.⁷⁰

Bei der Festlegung der Ausgangsgeometrie mehrerer Materialien, die für eine definierte Formänderung erforderlich ist, handelt es sich um ein inverses Problem, das mit einem geeigneten numerischen Ansatz zu lösen ist. Hierbei stellen die in der Regel verwendeten organischen Werkstoffe mit ihrem meist nichtlinearen Materialverhalten eine besondere Herausforderung dar. Als bevorzugtes Fertigungsverfahren in diesem spezifischen Technologiefeld hat sich bislang der sogenannte PolyJet-Prozess etabliert, der die Multimaterialoption zulässt und eine breite Materialpalette im Bereich der Polymere aufweist.

Anwendungsszenarien für 4D-gedruckte Bauteile sind überall dort vorstellbar, wo

das Prinzip der Formänderungsfähigkeit bereits heute genutzt wird, wenn auch bislang auf Grundlage alternativer Fertigungsverfahren. Ein solches Anwendungsfeld wäre im Bereich der medizinischen Produkte beispielsweise die Herstellung von Stents oder Zahnspangen, die ihre endgültige Geometrie erst nach dem Einsetzen annehmen. Weitere mögliche Anwendungsgebiete wären zudem die Produktion von wieder-auffaltbaren Verpackungen, die Herstellung von Hüllstrukturen mit Fähigkeit zur selbsttätigen Montage und Demontage, die Fertigung von Ventilen, Verbindungselementen und Greifern oder die Gestaltung aktiver/adaptiver Tragstrukturen für „Soft Robotics“.⁷¹ Praktisch begrenzt wird das Einsatzspektrum des 4D-Drucks aktuell allerdings noch durch die Anforderungen an die Materialeigenschaften, wobei die Formbarkeit nach der Additiven Fertigung und die Steuerung des stimuliresponsiven Verhaltens des Materials gegenwärtig die größten Herausforderungen darstellen.

3.4.1 Integration elektronischer Komponenten und Systeme

Für die Integration von Sensoren in ein Objekt besteht der zentrale Vorteil additiver Fertigungsverfahren in der prinzipiellen Zugänglichkeit des Bauteilinneren. Diese Zugänglichkeit ist – abhängig vom jeweiligen Verfahren – entweder auf Ebene der

⁶⁷ Dudziak et al., 2010.

⁶⁸ Khoo et al., 2015.

⁶⁹ Kim et al., 2018.

⁷⁰ Momeni et al., 2017.

⁷¹ Momeni et al., 2017.

gebauten Schichten oder aber punktuell gegeben. Dabei sind unterschiedliche Grade der Integration möglich, wobei zwischen Oberflächenintegration und Volumenintegration unterschieden wird.

Der Vorteil einer Oberflächenintegration liegt im reduzierten fertigungstechnischen Aufwand, der mit einem solchen Vorgang verbunden ist. Die Kombination unterschiedlicher Fertigungsverfahren ist in diesem Fall einfacher zu realisieren und multimateriale Systeme sind hierfür nicht zwingend erforderlich. Nachteilig kann sich allerdings auswirken, dass – beispielsweise im Falle integrierter Sensorik – der Messort auf das Bauteiläußere beschränkt ist. Zudem fehlt bei oberflächenintegrierten Lösungen ein Schutz des entsprechenden Sensors, während ein volumenintegriertes Objekt, das eine Messung am kritischen Ort erlaubt, diesen Schutz bieten kann. Das Einbringen des Sensors kann dabei jedoch zu einer Diskontinuität im Material führen. Zudem muss ein erhöhter Konstruktions- und Entwicklungsaufwand in Kauf genommen werden. Außerdem werden die Reparaturkonzepte anspruchsvoller.

Die Integration kompletter Systeme ohne eigentliche Anbindung an das Bauteil stellt die einfachste Lösung in diesem spezifischen Technologiefeld dar und wurde bereits sowohl für Kunststoffe (Abb. 6) als auch für Metalle erprobt. Die Verarbeitungseigenschaften des Kunststoffs erlauben es dabei eher, eine mechanisch stabile Verbindung zwischen elektronischer Komponente und Bauteil herzustellen.⁷² Eine solche Verbindung ist insbesondere für die mechanische Sensorik von Bedeutung, da diese eine Übertragung der zu messenden Impulse vom Bauteil auf den auf den Sensor voraussetzt. Metallische Bauteile werden im Kontext der Elektronikintegration beispielsweise mithilfe des pulverbasierten Ultrasonic-Additive-Manufacturing-Verfahrens verarbeitet, dessen vergleichsweise

geringer Wärmeeintrag zwar Vorteile bietet,⁷³ das bislang aber noch keine herausragende kommerzielle Bedeutung besitzt. Die in diesem Zusammenhang untersuchten faseroptischen Sensoren finden heute bereits in der Bauindustrie Verwendung und werden zur Strukturüberwachung eingesetzt. Eine Übertragung ihrer Integration auf die in diesem Sektor etablierten additiven Fertigungsverfahren könnte daher interessante Perspektiven eröffnen. Zudem gibt es gegenwärtig bereits erste Versuche, über das sogenannte Laser-Beam-Melting-Verfahren elektronische Komponenten in einen Hohlraum einzubringen, wobei die Sensorik zumindest lokal mit der zu überwachenden Struktur verbunden ist.⁷⁴ Bislang stellt allerdings jedes integrierte System noch immer eine potenzielle Schwachstelle im strukturellen Bauteilverhalten dar.⁷⁵ Darüber hinaus führt die bei Verfahren mit schichtweisem Aufbau gegebene Bindung des Fertigungsprozesses an die Bauebenen auch zu Beschränkungen hinsichtlich der Lage und Orientierung der eingebetteten Komponenten. Denn für die Festlegung der Letzteren müssen neben funktionalen Gesichtspunkten auch Parameter der Fertigung, wie die Positionierung des Bauteils im Bauraum, berücksichtigt werden.

3.4.2 Fertigungstechnische Lösungen und systeme

Um die additive Herstellung von komplexen Bauteilen mit der Integration elektronischer Komponenten zu verbinden, wird in der Regel eine Kombination unterschiedlicher Fertigungsverfahren in einem Fertigungssystem oder einer Fertigungszelle eingesetzt. Gelegentlich erfolgt die Integration auch über manuelle Eingriffe in den additiven Fertigungsprozess,⁷⁶ wobei nachteilig ist, dass entsprechende Eingriffe in jedem Fall eine Unterbrechung des Herstellungsvorgangs erforderlich machen. Insbesondere bei der Verarbeitung

⁷³ Monaghan et al., 2015; Mou et al., 2009.

⁷⁴ Lausch et al., 2016; Töppel et al., 2018.

⁷⁵ Lang et al., 2011; Dumstorff, Paul & Lang, 2014.

⁷² Chang et al., 2015.

metallischer Werkstoffe unter angepasster Atmosphäre geht eine solche Unterbrechung mit erheblichem Aufwand einher. Allerdings lassen sich auch hierfür automatisierte Lösungen finden, zumal prinzipiell die Anpassung bereits verfügbarer Systeme aus der Leiterplattenbestückung denkbar ist.⁷⁷ Ein direktes Drucken auch der elektronischen Komponenten ist gegenwärtig hingegen noch keine Alternative, da solche additiv gefertigten Komponenten in ihrer Leistung bislang noch nicht an herkömmliche Elektronik heranreichen. Von Interesse ist heute aber bereits die Einbettung faseroptischer Sensoren in additiv gefertigte Bauteile aus zementgebundenen Materialien, beispielsweise in keramische Objekte.⁷⁸

Um die Kopplung additiver Fertigungsverfahren mit der Integration von funktionalen Bestandteilen weiter voranzutreiben, wird gegenwärtig an der Entwicklung verschiedener Systeme gearbeitet. So gibt es bereits erste Ansätze, additive Fertigungsverfahren und DirectWrite-Prozesse miteinander zu verbinden.⁷⁹ An der University of Texas at El Paso (UTEP) wurde zudem ein komplexes Fertigungssystem entwickelt, das Strangablege-Ver-

fahren (FDM) mit einer breiten Palette an Funktionalisierungsverfahren kombiniert.⁸⁰

Aktuell noch nicht verfügbar sind Methoden, mit deren Hilfe sich sowohl strukturelle als auch funktionale elektronische Komponenten in einem einzigen Vorgang erzeugen lassen. Erste Ansätze in diese Richtung bieten allerdings Verfahren mit punktueller Materialzufuhr wie die sogenannten Material-Jetting-Verfahren. Kommerziell angeboten wird in diesem Segment bereits ein Verfahren, das die Anmischung der verdruckten Materialzusammensetzung direkt vor dem Druck und damit einen Materialwechsel im entsprechenden Prozess ermöglicht. Konkrete Bauteilbeispiele beschränken sich bislang auf Farbgebung und die Kombination unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften, obgleich auch die Realisierung funktionaler Komponenten in Analogie zur gedruckten Elektronik denkbar wäre. So wurden auf Grundlage eines Multimaterial-FDM-Systems neben dem Strukturwerkstoff bereits Materialvarianten verdruckt, über die Leiterbahnen und einfache Sensoren realisiert werden konnten.⁸¹

3.4.3 Empfehlungen zur Entwicklung multifunktionaler Bauteile

Um die funktionalen Möglichkeiten von additiv gefertigten Bauteilen zu erhöhen und damit deren Einsatzmöglichkeiten zu erweitern, empfehlen die Akademien die folgenden Maßnahmen:

Entwicklung von Werkstoffen zur Sensorintegration in Metalle vorantreiben

Für die erfolgreiche Weiterentwicklung von Verfahren, die eine Integration elektronischer Systeme in additiv gefertigte Produkte bereits im Zuge des Herstellungsprozesses ermöglichen, sollte die Materialforschung in zwei Bereichen gezielt gefördert werden. So besteht angesichts höherer Anforderungen an die Stabilität der zu integrierenden elektronischen Systeme und in Anbetracht der Notwendigkeit einer Isolation gegen das leitfähige Matrixmaterial ein erhöhter, grundlegender Entwicklungsbedarf an hierfür geeigneten Materialien.

⁷⁶ Paz et al., 2014.

⁷⁷ Beispiele liefern unter anderem Lopes, MacDonald & Wicker, 2012; Macdonald et al., 2014.

⁷⁸ Ghazanfari et al., 2016.

⁷⁹ Perez & Williams, 2014.

⁸⁰ Espalin et al., 2014.

⁸¹ Leigh, 2016.

Für die elektronischen Systeme und ihre Komponenten ist mit Blick auf die Randbedingungen der Additiven Fertigung zudem eine Fortsetzung der Materialentwicklung, beispielsweise in Richtung der Hochtemperaturstabilität, erforderlich. Dabei stellt die Sicherung der Qualität integrierter elektronischer Systeme eine besondere Herausforderung dar, etwa hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

Integrationsdichte gedruckter Elektronik optimieren

Weiterer Forschungsbedarf besteht auch mit Blick auf die Integrationsdichte gedruckter Elektronik. Diese Integrationsdichte unterscheidet sich bezogen auf die Fläche bislang um den Faktor 10⁶ von derjenigen herkömmlicher Silizium-(Si-)basierter Bauelemente. Daher besteht die Notwendigkeit, die Auflösung der verfügbaren Verfahren zu erhöhen, ohne im Gegenzug die Produktivität zu verringern. Das gilt insbesondere für Single-Process-Lösungen und dort in verstärktem Maße für metallische Grundwerkstoffe.

Translationsprozesse zur Beschleunigung der Integration von Sensorik in der Additiven Fertigung und deren wirtschaftlichen Einsatz fördern

Mit sensorischen Systemen ausgestattete multifunktionale Bauteile können Nutzungsdaten erfassen und damit die verfügbare Datenbasis für die Auslegung dieser Bauteile fortlaufend erweitern. Handelt es sich um additiv gefertigte Bauteile, erlaubt die Flexibilität des Fertigungsprozesses die kontinuierliche Optimierung der Bauteilkonstruktion auf Grundlage dieser Daten. Damit wird im Extremfall das Konzept einheitlicher Produktgenerationen durch eine beständige Produktpassung ersetzt. Um die Möglichkeiten zur Nutzung intelligenter Bauteile und der mit ihrer Hilfe erhobenen Daten weiter ausbauen und zur Anwendung bringen zu können, ist es erforderlich, bereits im Vorfeld Fragen der Qualifizierung und Zertifizierung solcher Bauteilfamilien ohne einheitliches Design zu klären und rechtliche Erwägungen zum Eigentum, zu Nutzungsrechten und zum Schutz der auszuwertenden Informationen zu berücksichtigen. Dies macht auch entsprechende Standardisierungsansätze erforderlich. Zudem werden Lösungen für die wirtschaftliche Verknüpfung von additiven Herstellungsverfahren mit anderen, die Funktionsintegration unterstützenden Prozessen benötigt, um auf diese Weise komplexe, flexible Fertigungsketten und systeme etablieren zu können. Zu diesem Zweck ist es notwendig Schnittstellen einzurichten, um die Prozessketten miteinander zu vernetzen.

Entwicklung prozessfähiger Funktionsmaterialien mit optimierten Verarbeitungs- und Nutzungseigenschaften vorantreiben

Die Entwicklung von Funktionsmaterialien, die über unterschiedliche additive Fertigungsverfahren auch in Kombination miteinander zu verarbeiten sind, sollte verstärkt vorangetrieben werden. Damit soll zum einen erreicht werden, dass mehr Materialien mit dem jeweiligen Grundwerkstoff, dem eingesetzten Fertigungsverfahren sowie auch untereinander kompatibel einzusetzen sind. Zum anderen gilt es, die weitere Verbesserung sowohl der funktionalen Materialeigenschaften als auch der Endprodukte voranzutreiben. Dies gilt insbesondere auch für Materialien, die im Anwendungsfeld des 4D-Drucks zum Einsatz kommen.

4 Neue Anwendungsgebiete der Additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren stehen in jüngster Zeit vermehrt im Mittelpunkt öffentlicher Wahrnehmung und Diskussion. Spektakuläre Medienberichte über additiv gefertigte Waffen oder organähnliche Strukturen erhöhen das öffentliche Interesse an entsprechenden Technologien weiter. Unerwähnt bleibt dabei allerdings zumeist, dass der Entwicklungsstand der verschiedenen Fertigungsverfahren höchst unterschiedlich ausfällt. So sind einige der diskutierten Anwendungsszenarien zwar grundsätzlich vorstellbar, praktisch jedoch mit heutigen Mitteln nicht umsetzbar. Ein Vergleich der spezifischen Anforderungen, denen solche Verfahren in ihrem jeweiligen Anwendungsbereich – von der wirtschaftlichen über die wissenschaftliche bis hin zur privaten Nutzung – unterliegen, erlaubt eine Einordnung ihrer realen Leistungsfähigkeit und Nutzung.

4.1 Additive Fertigung in der Medizin

Innerhalb der Bereiche Medizin und Medizintechnik sind additive Fertigungsverfahren in verschiedenen Anwendungsfeldern bereits fest etabliert, in anderen befinden sie sich hingegen noch im Forschungs- oder Entwicklungsstadium.

4.1.1 Herstellung patientenindividualisierter Komponenten

Benötigt ein Mensch aus medizinischen Gründen ein Implantat, beispielsweise ein künstliches Hüftgelenk, einen Zahnersatz oder ein Hörgerät, so sollte das entsprechende Produkt möglichst individuell an diesen angepasst sein, um hohen

Tragekomfort und hohe Funktionalität zu erzielen. Diesem anspruchsvollen Anforderungsprofil entspricht die Additive Fertigung, indem sie alternativ zur Massenfertigung beispielsweise von standardisierten Hüftprothesenschäften die Anfertigung von individuellen Implantatkomponenten mit spezifischen Maßen, Formen und Eigenschaften ermöglicht. Dadurch kann die jeweilige anatomische und/oder physiologische Situation des Patienten bzw. der Patientin angemessen berücksichtigt werden.

Zudem lassen sich mithilfe additiver Fertigungstechnologien relativ einfach komplexe innere und äußere Strukturen herstellen, was ebenfalls Vorteile für die Versorgung mit Implantaten mit sich bringt. So können mikro- und nanoskalierte Oberflächeneigenschaften bei Implantaten beispielsweise entscheidend für ein optimales Einwachverhalten sein. Strukturierte Implantatoberflächen können im Kontakt mit natürlichem Knochengewebe dazu beitragen, dass knochenbildende Zellen besser anhaften, sich schneller vermehren und gezielter differenzieren. Auf diese Weise kann ein additiv gefertigtes Implantat zu einer verbesserten Heilung auch bei kritisch großen Knochendefekten beitragen.

Ein weiterer Vorteil der Additiven Fertigung im medizinischen Kontext ist mit Blick auf den verringerten Materialabfall zu erwarten. Da aufgrund der Anforderungen an die Bioverträglichkeit der Produkte zum Teil sehr teure Rohmaterialien mit hohem Reinheitsgrad eingesetzt werden müssen, sind Verfahren, bei denen im Idealfall nur jene Materialmenge ver-

wendet wird, die dem Volumen des additiv hergestellten Implantats entspricht, besonders attraktiv.

Während medizinisch relevante Produkte aus Additiver Fertigung in einigen Anwendungsfeldern bereits etabliert und außerdem weitverbreitet sind (z. B. patientenangepasste Hörgeräte aus Kunststoffen oder Dentalrestorationen aus Titanlegierungen),⁸² beschränkt sich die Anwendung im Bereich der Nachbildung organischen Gewebes, etwa bei der individuellen Herstellung von Schädelplatten, noch auf Einzelfälle.

Wenngleich die Vorteile eines für Patientinnen und Patienten maßgeschneiderten Implantats prinzipiell bemerkenswert sind, darf nicht übersehen werden, dass diese nach aktuellem Entwicklungsstand nach wie vor auch Risiken bergen. Bislang werden entsprechende Produkte den medizinischen Anforderungen an ein Implantat, wie der Gewährleistung ausreichender Langzeitfestigkeit, der Bioverträglichkeit, der Sterilität und damit der Patientensicherheit, jedenfalls noch nicht in vollem Umfang gerecht.

Die Nachbildung der inneren Strukturen menschlichen Gewebes stellt aufgrund des hierarchischen Aufbaus biologischer Materialien für additive Technologien nach wie vor eine große Herausforderung dar. Ein Problem liegt im Aufbau des Knochengewebes als einem natürlichen Verbundwerkstoff begründet (siehe Box „Hierarchischer Knochenaufbau“). Zwar wäre ein solcher Verbundwerkstoff mithilfe additiver Fertigungstechnik prinzipiell Schicht für Schicht nachzubilden, jedoch nur innerhalb einer Größenskala. So wurden bereits Verfahren etabliert, mit deren Hilfe Feinstrukturen im Submillimeterbereich realisiert werden können. Ein bislang hingegen noch nicht

umgesetztes Unterfangen ist jedoch die Realisierung komplexer Strukturen mittels additiver Fertigungstechnologie. Bei Knochengewebe handelt es sich um solche komplexen Strukturen, deren Eigenschaften im Makrobereich auf ebenfalls komplexen Mikrostrukturen beruhen. Da die meisten organischen Strukturen, die als Implantate benötigt werden, komplexe Objekte darstellen, die auf mehreren Hierarchieebenen strukturiert sind, wäre es für medizintechnische Anwendungen von besonderer Bedeutung, wenn sich diese additiv fertigen ließen. Allerdings übersteigt die Komplexität der natürlichen Strukturen in diesem Anwendungsfeld noch immer die technischen Möglichkeiten der Reproduzierbarkeit.

4.1.2 3D-Bioprinting von Gewebeersatz

Aufgrund des anhaltenden Mangels an geeigneten Spenderorganen und mit Blick auf das grundsätzliche Problem von Abstoßungsreaktionen nach Organtransplantation wird im medizinischen Anwendungsbereich gegenwärtig nach Alternativen zum menschlichen Spenderorgan geforscht. Im Fokus der entsprechenden Aktivitäten stehen unter anderem additive Fertigungsverfahren, die das zu implantierende Gewebe oder ganze Organe mit allen notwendigen biologischen Funktionalitäten schichtweise herstellen könnten. Hierzu wird derzeit an der Entwicklung neuer Verfahren wie dem sogenannten 3D-Bioprinting („Biofabrication“) gearbeitet (siehe auch Kap. 3.4).⁸³ Dabei handelt es sich um ein automatisiertes Verfahren, mit dessen Hilfe körpereigene, lebende Zellen verdruckt werden können. Das Produkt des Druckprozesses soll dann im Zuge nachgeschalteter Zell- und Gewebereifung im Bioreaktor zum geforderten Gewebeersatz kultiviert werden. Solche Technologien befinden sich allerdings noch in einem frühen Stadium der Entwicklung, sodass sie aller Voraussicht nach kurz- und mit-

⁸² Siehe auch TAB-Arbeitsbericht „Additive Fertigungsverfahren“ Caviezel et al., 2017.

⁸³ Gao & Cui, 2016; Murphy & Atala, 2014.

Box: Nutzung additiver Fertigungstechniken zur Vermeidung von Tierversuchen

Leitgedanke in der tierexperimentellen Forschung ist das sogenannte 3R-Prinzip („Replacement“, „Reduction“, „Refinement“), das auf eine weitestmögliche Vermeidung und damit Verringerung von Tierversuchen sowie eine Verbesserung der Versuchs- und Haltungsbedingungen hin ausgerichtet ist. Unter dieser Maxime wurden in der Vergangenheit zahlreiche methodische Alternativen zum Tierversuch in den Lebenswissenschaften entwickelt, so beispielsweise die Organ-on-a-Chip-Modelle. Solche Modelle dienen der Nachbildung von Organfunktionen, etwa von Lunge, Leber, Darm, Knochenmark oder Gehirn. Zu diesem Zweck werden sogenannte Organoide verwendet, die die komplexe Organ- und Gewebestruktur im Miniformat imitieren und einzeln oder im Verbund (Multi-Organ-Chips) unter lebensnaher Abbildung der organotypischen Umgebungen in einen Chip integriert werden. Organ-on-a-Chip-Modelle haben großes Potenzial als Experimentierfeld und eignen sich ideal sowohl für gesetzlich vorgeschriebene Untersuchungen zur Wirksamkeit und Sicherheit von Substanzen als auch zur Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen in zahlreichen Fachdisziplinen.

In der Entwicklung und Etablierung solcher Organ-on-a-Chip-Modelle wird sowohl mit Blick auf das 3R-Prinzip als auch im Sinne einer verbesserten Translation zunehmend auf die Verwendung von tierischem Organmaterial oder tierischen Zellen verzichtet und stattdessen die Nutzung von humanem Spendermaterial favorisiert. Daher werden entsprechende Organoide mittels Tissue-Engineering-Verfahren meist aus humanen Zellkulturlinien, aus induziert pluripotenten Stammzellen oder aus primären humanen Zellen erzeugt. Selbst bei einem sprunghaften Anstieg in der Nachfrage von Organ-on-a-Chip-Modellen ist deshalb nicht zwangsläufig mit einer Zunahme der Tiernutzung zu rechnen. Die Nutzung von humanem Material stellt aus ethischer Sicht kein Problem dar, sofern die schriftliche Einwilligung der Patientin bzw. des Patienten und der Spenderin bzw. des Spenders gegeben ist.

telfristig keine Lösung für die Probleme der Transplantationsmedizin darstellen werden.

Eine Herausforderung ist in diesem Zusammenhang bereits das Verdrucken lebender Zellen, die während des Herstellungsvorgangs nicht geschädigt werden dürfen. Zudem bedürfen die Zellen eines besonderen Trägermaterials, wofür zu meist sogenannte Hydrogele, d. h. hochgradig wasserhaltige, zellverträgliche Materialien eingesetzt werden. Dabei müssen die technischen Erfordernisse des additiven Auftrags der Zellen im Trägermaterial mit den biologischen Anforderungen in Einklang gebracht werden, die sich beispielsweise ergeben, wenn die zellulären Komponenten bei gleichzeitigem Abbau der Hydrogelmatrix einen strukturierten Gewebeverband ausbilden sollen. Solche Gewebeverbände setzen sich meist aus

mehreren unterschiedlichen Zelltypen in organindividueller Anordnung zusammen. Diese Anordnung ist von essenzieller Bedeutung für die mitunter komplexe biologische Funktionalität des Organs. Zudem bedarf jedes Organ einer adäquaten Durchblutung, einer ausreichenden Sauerstoff- und Nährstoffversorgung sowie des Abtransports anfallender Stoffwechselprodukte (siehe Box „Gefäßsystem“). Mithilfe der Magnetresonanztomografie (MRT) und nachgeschalteter Softwareanwendungen lassen sich Makro- und Mikrostruktur menschlichen Gewebes, beispielsweise eines Gefäßabschnitts, in Form von maschinenlesbaren Geometriedaten erfassen, sodass ein Modell für die additive Herstellung erstellt werden kann. Vielzahl und Differenz der Zellen, die zur Gewährleistung der vollständigen Funktionalität in einem kompletten Organersatz enthalten sein müssen, verhindern gegenwärtig

Box: Endoprothetik

Durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der Endoprothetik (z. B. bei der Produktion von Hüftprothesen) soll das bislang angewandte Baukastensystem zukünftig durch maßgeschneiderte Komponenten ersetzt werden. Stehen dem Chirurgen bzw. der Chirurgin für verschiedene Patientinnen und Patienten bislang nur Standardimplantate in grob abgestufter Größe zur Verfügung, sollen die Implantate mithilfe additiver Fertigungstechnik standardmäßig individuell generiert werden können.

Bei einem solchen Verfahren, das sich bislang noch im Stadium der Erprobung befindet, beginnt die Prozesskette mit der patientenindividuellen Erfassung von Daten mittels 3D-Bildgebungsverfahren (z. B. Computertomografie) und wird mit deren Rekonstruktion zu einem digitalen dreidimensionalen Modell fortgesetzt. Dieses Modell wird mithilfe kommerziell verfügbarer Softwarepakete anschließend in Datensätze umgewandelt, mit denen sich das entsprechende Bauteil schließlich additiv fertigen lässt.

Erste Ergebnisse mit Prothesen (z. B. Knieprothesen), die additiv hergestellt worden sind, scheinen aus medizinischer Sicht zwar vielversprechend, allerdings konnten sich die entsprechenden Produkte unter anderem aus Kostengründen in der Breite bislang noch nicht durchsetzen.

allerdings noch eine längerfristige gemeinsame Kultivierung im Bioreaktor. Bei Gewebeersatz, in dem maximal zwei bis drei verschiedene Zelltypen enthalten sind, ist eine solche Kultivierung heute aber bereits in begrenztem Ausmaß möglich.

In ihrer Funktionalität unterliegen Organe keinen statischen Bedingungen, sondern müssen bedarfsgerecht auf spezifische Situationen (z. B. mechanische Belastung, körperliche Aktivität, Ernährung oder Umweltfaktoren) reagieren und sich entsprechend anpassen können. In Anbetracht des aktuellen Forschungsstands ist es nicht absehbar, ob es möglich sein wird, die hierfür notwendige hohe Komplexität natürlicher Gewebestrukturen und Organe – sowohl in Bezug auf die räumliche Anordnung als auch hinsichtlich der biologischen und biochemischen Interaktion der Organsysteme untereinander – durch additive Fertigungsverfahren zu erzeugen. Auch die Frage, ob 3D-verdruckte Zellen im anschließenden Kultivierungsprozess zu Geweben mit vollständiger biologischer Funktionalität heranreifen können, ist derzeit noch ungeklärt. Daher ist es

notwendig, sowohl das Potenzial als auch die Limitationen der Additiven Fertigung in der transplantationsmedizinischen Anwendung klar und verantwortungsvoll zu kommunizieren, um keine falschen Hoffnungen bei betroffenen Patientinnen und Patienten sowie bei Ärztinnen und Ärzten zu wecken.

Neben solchen eher visionär zu nennenden Forschungsaktivitäten mit dem langfristigen Ziel, voll funktionsfähige Organe mittels hydrogelbasierter 3D-Druck-Technologie herzustellen, gibt es auch Anstrengungen, die bereits konkretere Erfolge zeitigen. So werden additive Fertigungsverfahren gegenwärtig zur Generierung von In-vitro-3D-Gewebe-modellen eingesetzt. Dabei werden unter dem Fachbegriff „Organ-on-a-Chip“ Modellsysteme erstellt, die der Simulation physiologischer Vorgänge dienen, etwa um den Wirkungsmechanismus von Pharmaka in vitro zu prüfen. Eine solche Vorgehensweise ist unter anderem geeignet, die vielfach kritisierten Tierversuche in der medizinischen Forschung zu reduzieren (siehe Box: „Nutzung additiver

Box: Hierarchischer Knochenaufbau

Menschliche Röhrenknochen besitzen eine definierte Makrostruktur auf der Zentimeterskala und sind individuell konturiert. Auf der Subzentimeterskala offenbart der Röhrenknochen im Querschnitt, dass er aus einer kompakten Außenschicht und einer offenporösen, schwammartigen Kernstruktur besteht. Auf der Mikrometerskala ist zudem ein lamellarer Aufbau des Knochengewebes zu erkennen, bei dem Organik und Anorganik in komplexer Anordnung vorliegen. Die anorganischen Bestandteile – beim Knochen sind dies Kalziumphosphate – sind dabei in die Tripelhelix der Kollagenfasern als Nanokristallite eingelagert. Bislang gibt es kein additives Fertigungsverfahren, das einen solchen hierarchischen Aufbau zu erzeugen imstande ist.

Prinzipiell ermöglichen additive Technologien die Verarbeitung einer Vielzahl von verschiedenen Materialien in fester und/oder flüssiger Form. Aktuell betrifft dies vorrangig Metalle, Keramiken und Kunststoffe. Perspektivisch sollen zur Steuerung von Zellreaktionen jedoch auch biogene Materialien (z. B. Zellen, Proteine, Wachstumsfaktoren) zur Anwendung kommen. Die besondere Attraktivität additiver Fertigungsverfahren resultiert in diesem Zusammenhang aus der Möglichkeit, in einem einzigen Prozess anorganische und organische Materialien zu einem Verbundwerkstoff zu kombinieren. So können anorganische Komponenten (z. B. gelöste Kalziumphosphate) und organische Bestandteile (z. B. Wachstumsfaktoren in Medium) parallel in einer Lage verarbeitet werden. Auf diese Weise entsteht ein sogenannter biohybrider Gewebeersatz, der dem natürlichen Gewebe deutlich ähnlicher ist als konventionell gefertigte Produkte, beispielsweise eine metallische Prothese. Die Herstellung solcher Implantate befindet sich gegenwärtig allerdings noch in der Entwicklungsphase.

Fertigungstechniken zur Vermeidung von Tierversuchen“). Klassische Chips, die im Rahmen solcher Verfahren verwendet werden, bestehen aus zellbeladenen Mikrofluskkammern, mit denen spezifische Mechanismen in Organen simuliert werden können. Unter Nutzung von 3D-Bioprinting-Technologie können die Zellen dabei auf dem entsprechenden Chip in definierter dreidimensionaler Anordnung – wie im analogen natürlichen Gewebe – aufgebaut und anschließend mit Testsubstanzen durchströmt werden. Solche 3D-gedruckten, zellbasierten Bioreaktoren können die Verhältnisse in natürlichen Geweben und Organteilen mitunter sehr gut nachstellen und bieten daher hervorragende Testplattformen mit zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten für die Pharmaindustrie und die medizinische Grundlagenforschung.⁸⁴

4.1.3 Herstellung von Modellen

Additive Fertigungsverfahren kommen in der medizinischen Anwendung nicht nur im Behandlungskontext zum Einsatz, sondern sind vor allem in der Diagnostik weitverbreitet. Entsprechende Technologien sind in der Lage, dreidimensionale Modelle zu erstellen, was beispielsweise angesichts komplexer anatomischer Gegebenheiten oder spezifischer Fehlbildungen bei Patientinnen und Patienten (z. B. angeborene Herzfehler oder ausgeprägte Narbenbildungen) dem zuständigen Behandlungsteam eine präzisere Diagnose und eine wirklichkeitsgetreue Behandlungsvorbereitung ermöglicht. Für die Planung und Vorbereitung einer komplexen Operation bedeutet das konkret, dass mittels Computertomografie (CT), Magnetresonanztomografie (MRT) oder anderer diagnostischer Verfahren zunächst entsprechende Patientendaten generiert und diese anschließend mit spezieller Bildverarbeitungssoftware in eine für die Additive Fertigung erforderliche STL-

⁸⁴ Siehe auch Schöneberg et al., 2018.

Box: Gefäßsystem

Das Gefäßsystem jedes Organs ist in seiner Makro- und Mikroarchitektur spezifisch angelegt und äußerst komplex aufgebaut. Organe wie die Leber verfügen beispielsweise über eine duale, zuführende Blutversorgung, die für eine räumlich und zeitlich streng balancierte, bedarfsorientierte Durchblutung unter Einfluss des lokalen Nervensystems sowie autoregulatorischer Mechanismen sorgt. Um also eine funktionierende Leber additiv fertigen zu können, müsste nicht nur das „eigentliche“ Lebergewebe, sondern es müssten auch das Gefäß- und das Nervensystem mit ihren zahlreichen, verschiedenartigen Zelltypen in systemgerechter Anordnung hergestellt werden.⁸⁷

Datei umgewandelt werden. Auf Grundlage dieser Datei wird schließlich ein 3D-Kunststoffmodell der betroffenen Zielstruktur erzeugt, mit dem sich die Vorgehensweise des Behandlungsteams bereits im Vorhinein detailliert planen lässt. Solche Modelle können auch für Schulungs- und Trainingszwecke genutzt und unter verschiedenen Behandlungsdisziplinen (z. B. Chirurgie und Physiotherapie) ausgetauscht werden. Zudem können 3D-gedruckte Modelle als Anschauungsobjekte im Patientengespräch auch zu einer verbesserten Patientenaufklärung beitragen. Verwendung finden anatomische 3D-Modelle und additiv gefertigte Hilfsmittel wie Bohrschablonen darüber hinaus bereits in fast allen chirurgischen und interventionellen Fachdisziplinen, beispielsweise in der Herz-, der Unfall- und der Neurochirurgie-, der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, aber auch in der Plastischen Chirurgie und der Radiologie. Die Vorteile solcher Modelle liegen insbesondere in der exakten Wiedergabe entsprechender Pathologien und der Möglichkeit ihrer wiederholten Nutzung.

4.1.4 Akzeptanz und ethische Aspekte

In einer Studie, die im Auftrag der Europäischen Union durchgeführt wurden, konnte gezeigt werden, dass im Bereich medizinischer Anwendungen heute eine große Diskrepanz zwischen den gegenwärtigen oder derzeit absehbaren Möglichkeiten additiver Technologien und den zum Teil überzogenen Erwartungen

an solche Verfahren besteht.⁸⁵ Empirische Untersuchungen der Patientenakzeptanz gegenüber additiv erzeugtem Gewebeersatz (auch „Tissue Engineering“, siehe hierzu Kap. 4.1.2) zeigen zudem, dass individuelle Faktoren wie Angst oder Vertrauen gegenüber unbekanntem Objekten wie Implantaten einen größeren Einfluss auf die Einstellung von Patientinnen und Patienten haben als die Wahrnehmung ihres Nutzens.⁸⁶

Es ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach „Tissue Engineering“ aufgrund der stetig älter werdenden Bevölkerung in wirtschaftlich und sozial entwickelten Staaten zukünftig zunehmen wird. Forschung und Entwicklung stoßen in diesem spezifischen Anwendungsbereich daher auf sehr grundsätzliche Probleme, die über eine Bewertung des Einsatzes dieses Verfahrens bei einzelnen Patientinnen und Patienten hinausgehen. Für diese Probleme müssen aus medizin- und pflegeethischer ebenso wie aus bioethischer Sicht Lösungsansätze formuliert und diskutiert werden. Eine utilitaristisch geprägte Ethik stellt in diesem Zusammenhang vor allem Nutzen und Risiken entsprechender Verfahren

⁸⁵ STOA-Projekt „Additive bio-manufacturing: 3D printing for medical recovery and human enhancement“ (Boucher, 2018).

⁸⁶ Chang et al., 2015. Die bei der Patientenaufklärung verwendete Methode der informierten Einwilligung („Informed Consent“) thematisiert solche individuellen psychischen Faktoren bisher noch nicht explizit. Im Rahmen der Medizin- und Pflegeethik ist zu diskutieren, ob im Sinne des Patientenwohls entsprechende Aspekte in der Beratung nicht stärker Berücksichtigung finden sollten.

⁸⁷ Visconti et al., 2010.

und Produkte für potenzielle Patientinnen und Patienten sowie andere Betroffene in den Vordergrund ihrer Überlegungen. Zu berücksichtigen ist dabei, inwieweit die mit dem technologischen Fortschritt verbundenen medizinischen Möglichkeiten für alle oder nur für wirtschaftlich und/oder sozial „bessergestellte“ Menschen bzw. entwickelte Staaten verfügbar sind. Zudem ist zu klären, welche Implikationen mit einem ungleichen Zugang zu solchen Anwendungen und Produkten für einzelne Gesellschaften einhergehen würden. Bedeutsam ist schließlich auch, welchen Nutzen oder Schaden die Entwicklung und der Gebrauch von additiv hergestellten Implantaten für andere leidensfähige Wesen mit sich bringt, beispielsweise im Zuge einer verringerten Nachfrage nach dem Einsatz von Versuchstieren.

Die Zahl der für wissenschaftliche Zwecke verwendeten Tiere könnte durch sogenannte Organ-on-a-Chip-in-vitro-Modelle vermindert werden (siehe Box „Nutzung additiver Fertigungstechniken zur Vermeidung von Tierversuchen“). Dieser metho-

dische Ansatz zur Herstellung von organischen Versuchsmodellen mittels additiver Fertigungstechnologie hat das Potenzial, Tierversuche im großen Maßstab zu reduzieren. Eine solche Reduktion beträfe sowohl die Prüfung der Wirksamkeit und Sicherheit von Arzneimitteln als auch die von Lebensmitteln und Kosmetikprodukten entsprechend den gesetzlichen Vorgaben.⁸⁸

Allerdings ist auch für den Bereich der medizinischen Forschung und Anwendung zu beachten, dass es sich um ein soziotechnisches System handelt, bei dem der Nutzen einer neuen Technologie wie der Additiven Fertigung nicht allein von deren technischen Möglichkeiten abhängt, sondern auch davon, wie diese Technologie in der Anwendung tatsächlich eingesetzt wird (z. B. sogenannte Rebound-Effekte). So führt beispielsweise der STOA-Bericht an, dass die Additive Fertigung aufgrund der spezifischen Forschungskultur in den Lebenswissenschaften letztlich sogar zu einer Steigerung von Tierversuchen beitragen könne.⁸⁹

4.1.5 Empfehlungen zur weiteren Etablierung der Additiven Fertigung in der Medizin

Es ist gegenwärtig abzusehen, dass die Additive Fertigung zukünftig in vielen Bereichen der Medizin großen Nutzen entfalten wird. Das Anwendungsspektrum reicht dabei von bereits heute vielfach genutzten Einsatzmöglichkeiten in der Ausbildung über die Diagnostik und die Vorbereitung von chirurgischen Eingriffen, die Erzeugung von individuellen Implantaten und Prothesen bis hin zur noch weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung befindlichen Technologie des „Bioprinting“. Um dieses enorme Potenzial additiver Fertigungstechnologien für die medizinische Anwendung und Forschung möglichst rasch entfalten zu können, sprechen die Akademien die folgenden Empfehlungen aus:

Grundlagenforschung stärken

Eine Herstellung vollständiger funktionaler Organe mittels additiver Fertigungstechnologien zeichnet sich derzeit noch nicht ab. Dennoch dürfte eine langfristige und breit angelegte Forschungsstrategie zur Erzeugung organischer Strukturen mit großem medizinischen Erkenntnisgewinn einhergehen, insbesondere in Bezug auf kleinere Gewebestrukturen wie Organoiden oder Organ-on-a-Chip-Modelle. Daher wird empfohlen, die ergebnisoffene Grundlagenfor-

⁸⁸ Zu patentrechtlichen Fragen im Bereich der additiven Fertigungstechnologien siehe auch die Texte im Anhang.

⁸⁹ Beispielsweise Fitzpatrick, 2017.

schung im Bereich des „Bioprinting“ und „Tissue Engineering“ zu fördern. Deren Ergebnisse können langfristig als Grundlage für eine Forschungsstrategie zur Entwicklung weiterer technologischer Ansätze für die medizinische Anwendung dienen.

Den Einsatz additiv gefertigter Medizinprodukte klinisch und rechtlich sicher gestalten

Um einen sicheren Einsatz additiv gefertigter Medizinprodukte wie Prothesen in der klinischen Anwendung zu gewährleisten, sind eine stetige Weiterentwicklung der entsprechenden Fertigungsverfahren sowie umfassende Vorstudien unerlässlich. Zudem braucht es einen gesetzlichen Rahmen, um z. B. über die Zertifizierung von Verfahren eine Qualitätssicherung der individualisierten Produkte für die medizinische Anwendung zu gewährleisten. Zur rechtlichen Absicherung von Patientinnen bzw. Patienten und Behandlungseinrichtungen sind außerdem haftungsrechtliche Regelungen zu etablieren.

Unsicherheiten bei der Bewertung von Medizinprodukten, die mittels „Tissue Engineering“ herzustellen sind, blockieren gegenwärtig noch deren Überführung in den medizinischen Anwendungsbereich. Vor einem weiteren Ausbau der Forschungsaktivitäten zum klinischen Einsatz von „Tissue Engineering“ wird es daher notwendig sein, Maßnahmen zu ergreifen, damit die mit der Prüfung entsprechender Produkte beauftragten Einrichtungen, die sogenannten Benannten Stellen („Certified Bodies“) diese Produkte zukünftig fachkundig und zuverlässig bewerten können.

Erzeugersicherheit gewährleisten

Um Entwickler neuartiger medizinischer Produkte und Verfahren auf Basis additiver Fertigungstechnologien wirtschaftlich abzusichern, ist es notwendig, die Regelungen des Patentschutzes zu überprüfen und ggf. entsprechend anzupassen.⁹⁰

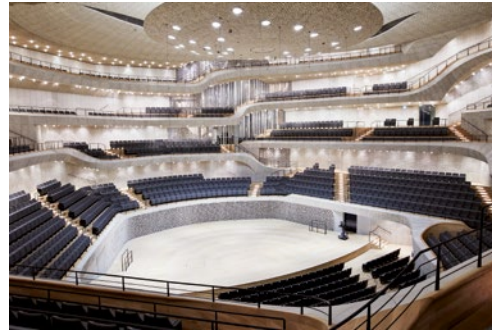
Realistische Nutzungspotenziale der Additiven Fertigung und ihre Zeithorizonte transparent kommunizieren

Gerade im Bereich medizinischer Verfahren und medizintechnischer Hilfsmittel kann es schnell geschehen, dass technologische Innovationen überzogene Hoffnungen bei Patientinnen und Patienten sowie Ärztinnen und Ärzten wecken. Solche Hoffnungen resultieren beispielsweise aus der Berichterstattung über additiv gefertigte organische Implantate, wenn dort bereits über die Herstellung vollständiger, funktionsfähiger Organe spekuliert wird, die Organspenden in Zukunft überflüssig machen sollen. Ob entsprechende Anwendungsmöglichkeiten der Additiven Fertigung allerdings tatsächlich zu realisieren sind, ist gegenwärtig noch nicht endgültig abzusehen. Um eine langfristige Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber additiven Fertigungsverfahren im medizinischen Kontext zu erreichen und das Vertrauen in die Erforschung der entsprechenden Technologien und Produkte zu stärken, ist es daher erforderlich, in der Außendarstellung auf übertriebene Versprechungen zu verzichten und stattdessen den tatsächlichen Stand der jeweiligen Entwicklung offen und verständlich zu kommunizieren.

⁹⁰ Boucher, 2018.



a)



b)

Abbildung 6: Beispiel für die Anwendung von 3D-Modellen im Bauprozess. Bei der Hamburger Elbphilharmonie besteht der Konzertsaal aus vielen, räumlich verwickelt angeordneten, teilweise schief im Raum liegenden Teilflächen und Zugängen. Ein mittels 3D-Drucker hergestelltes farbiges Modell aus Polymergeps konnte die daraus resultierende komplexe Bauausführung vereinfachen, indem die Farben des Modells als Referenzflächen beim Einbau der verschiedenen Ebenen im Konzertsaal dienen: a) Farbiges 3D-Modell aus Polymergeps im 3D-Printing-Verfahren hergestellt (Bildquelle: © Rapidobject GmbH) b) Konzertsaal der Hamburger Elbphilharmonie (Bildquelle: Elbphilharmonie, © Maxim Schulz).

4.2 Additive Fertigung in der Architektur und im Bauwesen

In den Bereichen des Bauwesens und der Architektur kommen additive Fertigungsverfahren gegenwärtig auf zwei Ebenen zum Einsatz. Bereits vielfach etabliert sind dabei Anwendungen, bei denen kleinformatige Produkte bzw. Bauteile kleiner Größenskalen eine Rolle spielen, so bei der Herstellung von Architekturmodellen. Im Bereich der großen Skalen, insbesondere im Hoch- oder Brückenbau, sind gegenwärtig hingegen intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten mit verschiedenen Schwerpunkten festzustellen, die sich zunehmend in Pilotprojekten manifestieren. Die Additive Fertigung verspricht für dieses Anwendungsfeld große Vorteile, da entsprechende Herstellungsverfahren beispielsweise eine größere Formenvielfalt ermöglichen und auf diese Weise mehr Freiheiten für architektonische Entwürfe eröffnen. Zudem können alternative Formen der Baufertigung vor Ort und nach Bedarf sowie die Verwendung zahlreicher neuartiger Materialien bzw. Materialgemische die Additive Fertigung auch für die Baupraxis attraktiv machen. Für eine Überführung solcher Methoden in die praktische Anwendung ist allerdings zu gewährleisten, dass diese in Bezug auf die Dauerhaftigkeit und Sicherheit (Zuver-

lässigkeit) der hergestellten Bauteile den bestehenden Anforderungen mindestens ebenso entsprechen wie die etablierten Fertigungsverfahren. Zudem müssen sie diese hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit noch übertreffen. Um solche Effekte zu erzielen, sind allerdings noch weitere intensive Forschungstätigkeiten notwendig.

4.2.1 Architekturmodelle

Bei Architekturwettbewerben ist es seit jeher üblich, Entwurfsideen durch Modelle zu veranschaulichen. Das gilt insbesondere dann, wenn es sich um Entwürfe außergewöhnlicher oder sehr komplexer Bauwerke bzw. Gebäude handelt. Hinreichend präzise Architekturmodelle erlauben es zudem, komplexe Entwürfe mit Blick auf ihre Geometrie, ihre Konstruktion und ihre Wirkung im Gebrauchszustand hin zu überprüfen – und damit auf ihre Machbarkeit (siehe Abb. 6). Modelle bilden somit eine wichtige Schnittstelle zwischen Architekturbüro und Ingenieurberuf, wobei Ersteres für den Entwurf, Letzterer hingegen für Berechnungen und bauaufsichtlich geforderte Nachweise zuständig ist. Bei der Herstellung solcher Gebäudemodelle werden heute zunehmend additive Fertigungsverfahren eingesetzt, insbesondere dann, wenn hochkomplexe architektonische Entwürfe vorliegen. Die Fertigung erfolgt in solchen

Fällen entweder mittels eigenen 3D-Druckers direkt vor Ort im Architekturbüro oder durch spezialisierte Dienstleistungsunternehmen. Dabei werden verschiedene Drucktechnologien und Materialien (vorwiegend Kunststoffe) eingesetzt.

Bei der Planung und Realisierung größerer Gebäudeensembles, die sich über weite Geländeareale erstrecken, ergeben sich zudem Überschneidungen zwischen Architektur und Raumplanung bzw. Städtebau („Urban Planning“). In diesem Zusammenhang bieten additive Fertigungsverfahren die Möglichkeit, mittels sogenannter Geoinformationssysteme (GIS) erzeugte Geländemodelle zu drucken, um so beispielsweise für die Bau- bzw. Tragwerksplanung schwierige Geländebeziehungen zu visualisieren.

4.2.2 Bauwesen / Hochbau und Brückenbau

Beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren sind der geometrischen Formgestaltung von Bauteilen nur wenige Grenzen gesetzt, sodass auch räumlich gekrümmte, also schalenartige Tragkonstruktionen hergestellt werden können. Durch die additiv ablaufende Formbildung lassen sich bereits im Verlauf der Fertigung bauphysikalisch sinnvolle bzw. technisch erforderliche Hohlräume oder Aussparungen im Bauteil realisieren, wodurch aufwendige und zum Teil unfallträchtige Stemm- und Bohrarbeiten überflüssig werden. Zudem lassen sich mithilfe additiver Technologien beträchtliche Gewichtseinsparungen bei der Bauteilproduktion erzielen, weil Material exakt nur dort eingebracht wird, wo es auch tatsächlich benötigt wird. Insgesamt ist beim Einsatz solcher Verfahren außerdem mit erheblichen Energie- und CO₂-Einsparungen zu rechnen, was zu einer kostengünstigeren und nachhaltigeren Bauweise beitragen kann. Darüber hinaus reduziert sich durch Additive Fertigung der bei traditioneller Bauweise übliche Schalungs- und Rüstungsaufwand oder entfällt gänzlich. Aus wirtschaftlicher Sicht verspricht die vereinfachte La-

gerung von Bau- und Werkstoffen auf der Baustelle schließlich auch verschiedene Vorteile für die Logistik.

Derzeit werden für Anwendungsbereiche im Bauwesen verschiedene Verfahren der Verarbeitung höchst unterschiedlicher Materialien entwickelt, erforscht und im praktischen Einsatz erprobt. Ein wesentlicher Faktor bei der Additiven Fertigung mit zementgebundenem Material im Massivbau ist die Zusammensetzung des Betons. Dieser muss als Frischbeton zunächst eine gute Fließ- und Verarbeitungsfähigkeit aufweisen und anschließend, nach dem Erhärten, bestimmten mechanischen Anforderungen wie Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit genügen. Insbesondere das stark zeitabhängige Materialverhalten von frischem Beton hat Wechselwirkungen während des Druckprozesses zur Folge, die die Verbundfestigkeit zwischen den einzelnen Schichtintervallen und damit auch das Verformungsverhalten des entsprechenden Bauteils beeinflussen.⁹¹ Neben unterschiedlichen Betonmixturen werden gegenwärtig zementgebundene Gemische (z. B. Mischungen aus Zement, Holz und Wasser im additiv gefertigten Holzbau) oder andere Materialkombinationen erprobt oder bereits industriell genutzt.⁹²

4.2.2.1 Additive Verfahren im Bauwesen

In der Additiven Fertigung werden bereits seit längerem Extrusionsverfahren eingesetzt, mit denen auch Werkstoffgemische additiv verarbeitet werden können. In den USA wird am Daniel J. Epstein Department of Industrial and Systems Engineering der University of Southern California seit mehr als zehn Jahren intensiv an einer Überführung additiver Fertigungstechnologien in das Bauwesen, dem sogenannten Contour Crafting geforscht.⁹³ Unter Verwendung eines auf Schienen geführten

⁹¹ Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, o. J.

⁹² Kohl, Kaufhold & Burkhardt, 2018.

⁹³ Khoshnevis, 2004; Molitch-Hou, 2013.



a)



b)

Abbildung 7: Visionen des zukünftigen Hausbaus. a) Computersimulation eines Portalkranroboters beim Druck von Spezialbeton, b) Simulation mehrstöckiger Portalkranroboter beim Verlegen von Trägern auf die additiv gefertigten Strukturen (Bildquelle: Contour Crafting Corporation, Los Angeles).

Makrofertigungsroboter lassen sich im Zuge dieses Verfahrens schichtweise ganze Gebäude, größere Bauwerksabschnitte oder großskalige Tragwerksteile erstellen. Dabei werden auf Grundlage eines nativen 3D-CAD-Modells und mithilfe eines Portalcrans computergesteuert Spritzbetondüsen bewegt, die durch seitliche Führungsbleche (Kellen) begrenzt sein können. Der Portalkran ist zudem in der Lage, mittels entsprechender Greifarme gezielt Einzelteile (Träger, Stürze etc.), verschraubte Stahlbewehrungen, aber auch Installationsmodule oder Elektroleitungen zu verbauen. Die Verwendung von frei fahrenden Portalrobotern ermöglicht schließlich, besonders große bzw. hohe Bauräume zu erschließen (Abb. 7). Insbesondere in China wurde diese Methode bereits von mehreren Unternehmen für die druckbasierte Fertigung von Wohnhäusern eingesetzt.

Ein weiteres Verfahren, das gegenwärtig erforscht wird, ist das „Robot-guided Shotcrete 3D Printing“ (SC3DP).⁹⁴ Dabei handelt es sich um ein robotergestütztes Spritzbetonverfahren, mit dem sich gekrümmte Bauelemente aus Beton herstellen lassen, wobei auf Schalung und Rüstung verzichtet werden kann. Die individuellen Bauteile werden bei diesem Verfahren von einem Roboterarm mit Spritzdüsen additiv gefertigt, während ein zweiter Roboterarm mit CNC-Fräse eine subtraktive Nachbearbeitung der Bauteile ermöglicht, beispielsweise

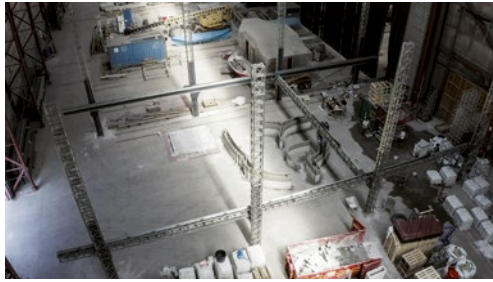
se durch Sägen oder Fräsen millimetergenauer Fugenverläufe.

Erforscht und erprobt werden aktuell zudem additive Fertigungsverfahren, die auf dem Prinzip des selektiven Bindens („Selective Binding“)⁹⁵ basieren. Bei entsprechendem Verfahren wird zunächst schichtweise schüttbares Material (z. B. Sand oder Gesteinskörnungen) ausgebracht, das anschließend an jenen Stellen, die sich zu gebrauchsfertigen Bauteilen verfestigen sollen, mit einem bindungsfähigen Fluid (z. B. Wasser-Zement-Gemisch) benetzt wird. Auf diese Weise entsteht Schicht für Schicht ein zuvor mittels Software modellierter Festkörper. Vorteil eines solchen Verfahrens ist, dass Bauteile mit komplizierter Geometrie ohne Stützkonstruktionen gefertigt werden können. Erprobt werden in diesem Zusammenhang gegenwärtig zwei Verfahrensvarianten, die sogenannte selektive Zementaktivierung und der selektive Zementleimeintrag.

Bei der Verarbeitung metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stahl bzw. Bewehrungsstahl, erfolgt die additive Herstellung zumeist mittels speziell ausgelegter Roboter – entweder durch Schweißroboter in Kombination mit Strangpress-Verfahren oder aber durch Roboter, die vorgefertigte Bewehrungen prozessgesteuert in additiv gefertigte Betonstrukturen einbringen. Al-

⁹⁴ TU Braunschweig, 2019.

⁹⁵ Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, o. J.



a)

b)

Abbildung 8: a) Produktionsprozess eines additiv gefertigten Gebäude eines Anbieter für Hausbau auf Nachfrage („Building on Demand“), b) Haus, dessen Fundament und Wände additiv gefertigt wurden (Bildquelle:COMOD).

lerdings werden auch Lösungsansätze erprobt, bei denen das Einfädeln der Bewehrung bereits im Druckkopf erfolgt. Speziell im Stahlbau kommt seit Kurzem zudem erfolgreich ein Kombinationsverfahren zum Einsatz, das formgebendes Schweißen mit flexibler Robotertechnik verbindet („Wire Arc Additive Manufacturing“, WAAM).⁹⁶

4.2.2.2 Anwendungsbeispiele der Additiven Fertigung im Bauwesen

Weltweit existieren inzwischen verschiedene Beispiele für die Erzeugung von Bauwerken mittels additiver Fertigungstechnologien (Abb. 8), wobei der Bauraum für den Druck im Bauwesen deutlich größere Dimensionen aufweist als der in anderen Fertigungssparten. Das erste funktionsfähige Haus aus Additiver Fertigung wurde 2016 durch die Dubai Future Foundation im Zentrum der arabischen Metropole errichtet. Das sogenannte Office of the Future umfasst ca. 250 Quadratmeter. Seine einzelnen Bestandteile wurden innerhalb von 17 Tagen mittels einer speziell verstärkten Betonmischung, glasfaserverstärktem Gips sowie faserverstärktem Kunststoff gedruckt und anschließend zusammengefügt. Nach Angaben des Bauherrn konnten die Baukosten durch den geringen Personalaufwand in der Fertigung erheblich reduziert werden.⁹⁷

Neben dem Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Hochbau gibt es mittler-

weile auch zunehmend Forschungs- und Bauprojekte, die das Ziel haben, entsprechende Technologien für den Brückenbau nutzbar zu machen. Im Oktober 2017 wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts der Technischen Universität Eindhoven so bereits die weltweit erste additiv gefertigte Brücke in Gemert (Niederlande) eröffnet.⁹⁸ Es handelt sich dabei um eine Fahrradbrücke mit einer Länge von 8 Metern und einer Breite von 3,5 Metern, die aus speziell angemischtem Beton in Wabenstruktur gefertigt wurde. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass zum einen auf die traditionelle, teure Schalung und Rüstung verzichtet werden kann, zum anderen erhebliche Mengen an Beton eingespart werden, ohne dass Stabilität und Tragfähigkeit der jeweiligen Konstruktion darunter zu leiden hätten. Zudem tragen entsprechende Technologien zu einer nachhaltigeren Bauweise bei, da sich die emittierte CO₂-Menge gegenüber traditionellen Bauverfahren erheblich verringert. Die weltweit bislang längste additiv gefertigte Betonbrücke wurde 2019 in Shanghai (China) errichtet. Es handelt sich um eine geschwungene Fußgängerbrücke (Länge: 27 m, Breite: 3,6 m), die einen kleinen Kanal überspannt. Im Verlauf der Fertigung wurde außerdem ein Monitoringsystem verbaut, das die Verformungen der Brücke kontinuierlich überwachen soll.

Darüber hinaus wird aktuell auch an Verfahren zum Design und zur Herstellung

⁹⁶ Feldmann et al., 2019.

⁹⁷ Dubai Future Foundation, 2016.

⁹⁸ TU Eindhoven, 2017.



a)

b)

Abbildung 9: a) Produktionsprozess einer additiv gefertigten Fußgängerbrücke aus Stahl mit einem Schweißroboter (Bildquelle: Oliver de Gruijter, MX3D), b) Fertiggestellte Brücke bei einem Test in Amsterdam (Bildquelle: Tim Geurtjens, MX3D).

additiv gefertigter Brücken aus Stahl geforscht. So hat ein Konsortium der Technischen Universität Delft und des Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions in den Niederlanden eine Methode zur additiven Herstellung stählerner Brückenkonstruktionen entwickelt und im Rahmen eines dreijährigen Bauprojekts zur Fertigung einer Fußgängerbrücke in Amsterdam bereits eingesetzt. Gestützt auf das Prinzip der Topologieoptimierung wurde dabei zunächst ein CAD-Modell der geplanten Brücke erstellt. Anschließend erzeugten Schweißroboter, die computergesteuert und interaktiv additiv

extrudierte Metallstränge verschweißen, eine voll belastbare Tragstruktur (Abb. 9).⁹⁹

Additive Fertigungsverfahren lassen sich außerdem für die Herstellung einfacher Schutzbauten (z.B. aus Polyurethanschaum) verwenden.¹⁰⁰ Entsprechende Technologien haben den Vorteil, dass sie auch in solchen Regionen eingesetzt werden können, die für Menschen unzugänglich sind, beispielsweise in chemisch oder radioaktiv hoch belasteten Arealen, aber auch im Bereich der Weltraumforschung.

4.2.3. Empfehlungen zur Förderung der Additiven Fertigung im Bauwesen

Auch wenn additive Fertigungstechnologien für die Anwendung im Bauwesen großes Innovationspotenzial aufweisen und außerdem Produktivitätsvorteile versprechen, ist mit einer umfassenden Einführung in der baulichen Praxis gegenwärtig nicht zu rechnen. Die Erwartung, dass entsprechende Verfahren vielfältige und zugleich wirtschaftliche Lösungen für effiziente Tragstrukturen ermöglichen, fördert zwar die Motivation, additive Fertigungsverfahren zu erproben und einzusetzen, allerdings stehen einer flächendeckenden Nutzung nach wie vor praktische Hürden im Weg. So bedarf es einer zügigen Weiterentwicklung digitalisierter Planungs-, Entwurfs- und Konstruktionsprozesse („Building Information Modeling“, BIM), da solche Prozesse eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Fertigung darstellen. Darüber hinaus sind zukünftig weitere Nachweise über die volle technische Reife der verschiedenen im Bauwesen einsetzbaren Verfahren zu erbringen. Bei der Überführung der wissenschaftlichen Methoden in die praktische Anwendung dürfen zudem die Eigengesetzlichkeiten im Bauwesen nicht unterschätzt werden. Wesentlich sind hier insbesondere die komplexen und zeitlich nur begrenzten Partnerschaften der am Bau beteiligten Personen, Unternehmen, Handwerksbetriebe und Baubehörden, die eine kurzfristige Einführung entsprechender Fertigungstechnologien erschweren dürften.

⁹⁹ Für weitere Informationen siehe MX3D, o. J.

¹⁰⁰ Keating et al., 2017.

Um die Vorteile der Additiven Fertigung im Bauwesen besser als bisher zur Geltung zu bringen, wird es darauf ankommen, die Entwicklung auf technischer Ebene, also vorrangig im Bereich des Baubetriebs und in der Bauverfahrenstechnik, weiter voranzutreiben. Das betrifft vor allem die Entwicklung von Technologien und Materialien, die praxistauglich und im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren zudem wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Entsprechende Fortschritte werden sich allerdings nur dann einstellen, wenn bei diesem Unterfangen Baustofftechnik, Struktur- bzw. Kontinuumsmechanik, Robotik und Sensortechnik, Spezialmaschinenbau sowie die numerische Simulation und die Informatik/Ingenieurinformatik eingebunden werden. Die Akademien empfehlen daher die folgenden Maßnahmen:

Forschung im Baubetrieb und in der Bauverfahrenstechnik vorantreiben

Sowohl Entwicklung als auch Bereitstellung großskaliger Fertigungsmaschinen erfordern eine interdisziplinäre Kooperation mit dem Spezialmaschinenbau, insbesondere mit der Robotik, aber auch mit Informatik, Ingenieurinformatik oder „Computational Intelligence“. Zudem werden in diesem Zusammenhang innovative Lösungen in der Spritzdüsentechnik benötigt, um computergesteuert für das kontrollierte und präzise Einbringen des jeweiligen Baumaterials zu sorgen. Schließlich sind Sicherheit sowie Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren, die im Bauwesen zum Einsatz kommen sollen, wissenschaftlich zu belegen. Eine entsprechende Bewertung sollte daher in interdisziplinären Forschungsverbänden erfolgen, um Expertinnen und Experten aus den unterschiedlichen Fachgebieten miteinander zu vernetzen.

Baustoffforschung mit Fokus auf die Additive Fertigung intensivieren

Die Erforschung und Entwicklung neuartiger, speziell auf die Additive Fertigung im Bauwesen abgestimmter Werkstoffe bzw. Baustoffe ist zu intensivieren.¹⁰¹ Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die weitere Erforschung von kostengünstigen Hochleistungsmaterialien und mehrphasigen Verbundwerkstoffen, die sich einerseits in verschiedenen Fertigungsverfahren gut verarbeiten lassen und andererseits allen strukturmechanischen Anforderungen genügen. Vielversprechend sind dabei gerade mit Blick auf die Additive Fertigung im Bauwesen aktuelle Forschungsinitiativen zum sogenannten C3-Carbon-Beton-Verbundwerkstoff. Ziel dieser Initiativen ist es, die üblichen Stahlbewehrungen zukünftig durch Carbonbewehrungen zu ersetzen. Darüber hinaus werden detailliertere Erkenntnisse über das Eigenschaftsprofil von Faserbeton benötigt, der die Haltbarkeit des reinen Betons durch Verringerung der Rissbreiten steigert und im Vergleich zum traditionellen Stahlbeton somit dauerhafter ist. Auf Grundlage entsprechender Daten ließen sich zukünftig dann maßgeschneiderte Gradientenwerkstoffe realisieren. Nicht vernachlässigt werden sollte zudem die Erforschung völlig neuartiger Funktionswerkstoffe. Zu diesem Zweck bieten sich Kooperationen zwischen Bauwesen und solchen Forschungszentren an, die sich speziell mit der Entwicklung von „Smart Materials“ befassen. Das betrifft insbesondere Lehrbetriebe und Forschungsinstitute für Baustoffkunde und Baustoffforschung, entsprechende Einrichtungen für Werkstoffe im Bauwesen sowie den konstruktiven Ingenieurbau. Impulse für die Entwicklung neuer Werkstoffe sollten aber auch vonseiten einschlägiger Materialforschungs- und -prüfanstalten zu erwarten sein. Zudem bedarf es weiterer Forschung, um das grundsätzliche Problem der Integration von Stahlbeton in den Druckprozess zu lösen und so zu ermöglichen, flächenhafte und balkenartige Tragwerke additiv zu fertigen. Auch in diesem Zusammenhang bedarf es eines engen Zusammenwirkens verschiedener Disziplinen, hier von Baustofffor-

¹⁰¹ Hier kann man auf Erfahrungen zurückgreifen, die man beispielsweise im Bereich der Spritzbetontechnologie mit Spritzrobotern gewonnen hat (Beranek, 2013; Wietek, 2010), aber auch auf Erkenntnisse aus noch in Bearbeitung befindlichen Forschungsprojekten zu „Smart Materials“ (Cai et al., 2003; Ritter, 2007) und zum „Bauen mit Beton“ (Herrmann & Sobek, 2015).

schung, „Computational Mechanics“, „Computational Engineering“ und Automatisierungstechnik, um das strukturelle Verhalten der verwendeten Baustoffe im Tragwerksverbund durch hinreichend wirklichkeitsnahe numerische Simulationen zu erfassen.

Digitale Transformation beschleunigen

Die Entwicklung bedarfsgerechter, an den Einsatz der additiven Fertigung im Bauwesen angepasster Berechnungs- bzw. Simulationsmethoden und der entsprechenden CAD-Basismodelle ist weiter voranzutreiben. Die digitalen Modelle dürfen nicht nur die dreidimensionalen Geometrieinformationen der notwendigen Bauteile enthalten, sondern müssen – im Sinne eines modernen „Building Information Modeling“ – auch auf alle wesentlichen Managementinformationen (betreffend Werkstoffe, Fertigung, Zeitplan, Kosten etc.) zugreifen können. Da hierbei aufwendige Informations- und Kommunikationsprobleme zu lösen sind, die verschiedene Komplexitätsstufen (Komplexität durch große Datenmengen, komplexe Numerik, Daten- bzw. Modellunschärfen, multiphysikalische Modellierung sowie komplexe logische und arbeitsorganisatorische Strukturen) aufweisen, sind Forschungsk Kooperationen von Ingenieurinformatik bzw. Informatik und sämtlichen anderweitig beteiligten Fachdisziplinen unerlässlich. Zudem gilt es, die einschlägigen Forschungsaktivitäten unmittelbar mit der Bauindustrie abzustimmen oder entsprechende Kooperationen einzugehen, beispielsweise mit Blick auf Datenformate und Datentransfers in der späteren praktischen Anwendung. Anpassungsbedarf besteht dabei insbesondere für die Datenschnittstellen, damit Informationsverluste beim Datentransfer zukünftig minimiert werden können. Außerdem sollte darauf geachtet werden, benutzerfreundliche und möglichst offene Softwarelösungen zu erstellen, die eine Überführung in die praktische Anwendung erleichtern. Da die additive Herstellung großskaliger Objekte ohne den Einsatz von Robotertechnik nicht denkbar ist, sind schließlich auch hierfür entsprechende Simulationen zu integrieren, die störungs- bzw. kollisionsfreie Arbeitsabläufe gewährleisten können.

Günstige Standortbedingungen schaffen

Eine Überführung additiver Fertigungstechnologien in die bauindustrielle Anwendung geht mit spezifischen Anforderungen an die Fertigungsstätten einher. Diese Anforderungen gilt es zukünftig ebenso zu erforschen wie die Möglichkeiten zur Realisierung entsprechender Stätten ggf. direkt am Bauort. So muss der Bauraum über ausreichend geeignete Lagerstellen sowohl für die formlosen Rohstoffe als auch für separat erstellte Bauteile verfügen. Zudem müssen für den Transport der gelagerten Baustoffe und teile passende Fördereinrichtungen verfügbar sein. Neben den obligatorischen Fertigungsmaschinen – vom Fertigungsroboter bis zum Portalkran – bedarf es außerdem einer geeigneten IT-Infrastruktur zur Steuerung und Überwachung des Produktionsablaufs. Bei einer Vor-Ort-Erzeugung von Bauwerken können solche Anforderungen mit den örtlichen Gegebenheiten, insbesondere in eng bebauten Innenstadtbereichen, im konkreten Fall durchaus kollidieren. Für entsprechende Bauvorhaben könnte daher zukünftig eine Abschätzung erforderlich sein, wie die Voraussetzungen für einen reibungslosen Fertigungsablauf unter Berücksichtigung vorgegebener Zeit- und Kostenpläne zu schaffen sind. Eine solche Abschätzung sollte dem Baubetrieb obliegen, der für die Einrichtung der Baustelle zuständig ist und auch den Baumaschineneinsatz inklusive Roboter-technik koordiniert.

Die Einhaltung bestehender Standards gewährleisten und neue Standards entwickeln

Die zahlreichen auf das traditionelle Bauwesen abgestimmten Vorschriften (DIN), Richtlinien und Empfehlungen sind nur bedingt auf den Einsatz additiver Fertigungstechnologien in diesem Sektor übertragbar. So erfordert insbesondere der schichtweise Werkstoffeintrag neue Formen sowohl der Schwachstellenanalyse als auch der computergestützten Berechnung und

Simulation mittels „Computational Mechanics“. Bei der Neuentwicklung von entsprechenden Softwarelösungen ist zu beachten, dass sich durch die Additive Fertigung neue Möglichkeiten für eine kontinuierliche Überwachung der Bauteilzuverlässigkeit ergeben, indem entsprechende Sensoren bei der Fertigung integriert werden können. Zudem ist es aufgrund der hohen Belastung sowie angesichts der enormen Sicherheits- und Stabilitätsanforderungen an zumeist langlebige oder langfristig genutzte Bauwerke unerlässlich, dass alle bestehenden Sicherheitsbestimmungen auf nachprüfbarer Weise erfüllt werden. Daher braucht es eine stetige Weiterentwicklung von Normungsbestimmungen, Richtlinien und rechtlichen Regularien, die neben der Sicherheit und der Stabilität von Bauwerken auch die Anerkennung additiver Fertigungstechnologien bei Zulassungsverfahren zu gewährleisten imstande sind. Hierfür ist es erforderlich, dass die im Bereich der „Computational Mechanics“ bzw. Strukturmechanik forschenden Hochschulinstitute – in enger Zusammenarbeit mit dem für die Normung zuständigen Bereiche im konstruktiven Ingenieurbau – für die Additive Fertigung maßgeschneiderte Softwaresysteme implementieren.

4.3 3D-Druck für Privatpersonen

Die derzeit festzustellende öffentliche Aufmerksamkeit für additive Fertigungsverfahren resultiert unter anderem aus der Tatsache, dass dieser Technologiebereich zunehmend auch außerhalb des industriellen Sektors eine Rolle spielt. Besondere Bedeutung besitzt in diesem Zusammenhang der sogenannte Desktop-3D-Druck. Mit diesem Begriff werden üblicherweise kleinere Maschinen für den Privatgebrauch bezeichnet, die wie industriell eingesetzte Maschinen nach dem Prinzip des Schichtauftrags funktionieren. Der Desktop-3D-Druck ist jene Variante der Additiven Fertigung, die gegenwärtig die meiste öffentliche Aufmerksamkeit erfährt, da sie auch außerhalb industrieller Settings zugänglich ist.

4.3.1 3D-Druck als Gegenstand visionärer Erwartungen

Im Fall des Desktop-3D-Drucks spielten visionäre Ideen bei der technologischen Entwicklung eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang ist vor allem das vor einem Jahrzehnt gestartete Entwicklungsprojekt RepRap („Replicating Rapid-prototyper“) zu nennen. Das immer noch bestehende Projekt war von Beginn an geprägt von der Idee, jedem Menschen die Möglichkeit zu geben, seine Gebrauchsgüter selbst zu produzieren. Um

diese Idee zu realisieren, wurde das Ziel formuliert, individuell einsetzbare Fertigungsmaschinen, sogenannte 3D-Drucker, herzustellen, die weitgehend aus solchen Teilen bestehen, die von ihnen selbst produziert werden können. Das vom RepRap-Initiator Adrian Bowyer 2004 verfasste Manifest mit dem Titel „Reichtum ohne Geld“ war für das Entwicklungsprojekt maßgeblich. In diesem Manifest schrieb Bowyer der 3D-Druck-Technologie (damals noch allgemein als „Rapid Prototyping“ bezeichnet) die Macht zu, Produktionsmittel aus etablierten industriellen Strukturen herauslösen zu können und auf diese technologische Weise „den revolutionären Besitz der Produktionsmittel durch das Proletariat [zu] ermöglichen“.¹⁰² Bowyers Vision technologischer Emanzipation setzt dabei auf „Open Hardware“: Analog zum Open-Source-Modell in der Softwareentwicklung werden Baupläne für 3D-Drucker in offenen Netzwerken erstellt, ausgetauscht und gemeinsam optimiert. Im Kontext einer offenen Innovationsgemeinschaft sollen Desktop-3D-Drucker auf diese Weise sukzessive zu universellen Fabrikatoren weiterentwickelt werden.

Auch aus Sicht von Technologievisionären wie Neil Gershenfeld (Leiter des Center

¹⁰² Bowyer, 2004.

for Bits and Atoms am Massachusetts Institute of Technology) und dem ehemaligen Chefredakteur des Fachmagazins „Wired“ Chris Anderson sind 3D-Drucker vor allem Prototypen universeller digitaler Fabrikatoren, die den Weg zu einer Dezentralisierung der Produktion ebnen sollen. Beide Akteure bewerten die Geräte als Manifestationen einer potenziell revolutionären Technologie, die die herausgehobene Stellung von Großfabriken als traditionelle Orte der Innovation und Produktion infrage stellen sollen. Mit 3D-Druckern ausgerüstete Privathaushalte und kleine Hightech-Werkstätten sollen dabei die Rolle dezentraler Innovations- und Produktionsstätten übernehmen.¹⁰³

Solche Zukunftsdiskurse können als Leitbilder der Technologieentwicklung fungieren. Sie entwerfen neue Anwendungs- und Nutzungsszenarien und können zur Legitimation technologischer Entwicklungspfade herangezogen werden. Darin liegt die besondere gesellschaftliche Relevanz dieser Diskurse.¹⁰⁴ Gerade in öffentlichen Darstellungen des 3D-Drucks werden die Visionen einer Renaissance der Do-it-yourself-Produktion immer wieder aufgegriffen. Doch auch wenn solche Diskurse für die Konstitution des Desktop-3D-Drucks eine maßgebliche Rolle spielen, lassen sich die stattfindenden Innovationspfade kaum als schrittweise Realisierung von technologievisionären Ideen begreifen. Letztere sind vielmehr als technisch-futuristische Übertreibungsmuster zu charakterisieren, die unter anderem bereits den Diskurs um das sogenannte Web 2.0 prägten. Solche Übertreibungsmuster zeichnen sich durch unzutreffende Voraussagen zur schnellen Realisierbarkeit von transformativen Potenzialen aus, durch Übergeneralisierung spezifischer Innovationen zu allgemeingültigen Mus-

tern sowie durch eine zweifelhafte Übertragung von Frühnutzenerfahrungen auf die gesamte Bevölkerung.¹⁰⁵

Gleichwohl ist davon auszugehen, dass die visionären Ideen von Offenheit, Emanzipation und Dezentralisierung weiterhin als Leitbilder wirken, die zur Innovationsdynamik des Desktop-3D-Drucks beitragen werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass gegenwärtige technologische Defizite gemeinhin nicht als Zeichen mangelnder Realisierbarkeit, sondern als Anlässe zur Suche nach weiteren Innovationsoptionen interpretiert werden. Zudem werden die in ihrer Leistungsfähigkeit aktuell nach wie vor sehr begrenzten Desktop-3D-Drucker mit den genannten visionären Erwartungen aufgeladen und entsprechend vermarktet. Mithin wird es als durchaus exemplarisch angesehen, dass mit dem Produktnamen „Replicator“ für einen der populärsten 3D-Drucker für den privaten Gebrauch direkt auf eine frühe Technologieversion in der „Star Trek“-TV-Reihe verwiesen wird.¹⁰⁶

4.3.2 3D-Drucker als gemeinschaftlich genutzte Technologie im „Makerspace“

Eine wichtige Rolle im öffentlichen Diskurs über den 3D-Druck spielt das sogenannte Maker Movement. Dabei handelt es sich um eine transnational vernetzte Bewegung, die Ansätze des Web 2.0 mit Praktiken des „Do it yourself“ (DIY) verbindet.¹⁰⁷ Im „Maker Movement“ bündeln sich Wertvorstellungen von Eigenproduktion, digitaler Vernetzung und Zusammenarbeit sowie spielerischer Technikaneignung. Daher wird die Sozialfigur des „Maker“ auch als Symbol für eine Produktionskultur gesehen, deren Motor die Kreativität des bzw. der Einzelnen ist.¹⁰⁸ Von entscheidender Bedeutung ist dabei der gemeinschaft-

¹⁰⁵ Dickel & Schrape, 2015.

¹⁰⁶ Petschow et al., 2014, S. 22.

¹⁰⁷ Anderson, 2014; Fastermann, 2013.

¹⁰⁸ Der Begriff „Maker“ ist eng verbunden mit dem US-amerikanischen Magazin „MAKE“, das auch die weltweit größten Messen für „Maker“ veranstaltet (Petschow et al., 2014, S. 21; Tocchetti, 2012).

¹⁰³ Anderson, 2014; Gershenfeld, 2012.

¹⁰⁴ Grunwald, 2008.

liche Umgang mit Technik. Diese Technik wird vom „Maker“ als Ressource begriffen, die neue Freiheiten des Experimentierens bietet und zugleich selbst Objekt experimenteller Aneignung ist.

Die analogen Knotenpunkte des digital vernetzten „Maker Movement“ bilden sogenannte Makerspaces (auch „Hackerspaces“ genannt).¹⁰⁹ Diese sind zum Sammelbegriff für Werkstätten geworden, in denen Interessierten unter anderem ein einfacher Zugang zu additiven Fertigungsverfahren eröffnet wird und die in der Regel auch Schulungen zur Bedienung der entsprechenden Maschinen anbieten. Ziel solcher „Makerspaces“ ist es dabei vor allem, einen Raum für Selbstständigkeit, Kreativität und gemeinschaftliches Basteln zu bieten, wobei die einzelnen „Spaces“ sehr verschiedene Formen annehmen können. So variieren diese mit Blick auf ihre Zugänglichkeit für Interessierte, die Beiträge, die Nutzerinnen und Nutzer zahlen müssen, oder die technische Ausstattung und Größe der Räumlichkeiten. Das sogenannte UnternehmerTUM, ein Innovations- und Gründungszentrum an der Technischen Universität München, beherbergt beispielsweise gegenwärtig einen der größten „Makerspaces“ in Deutschland. Die 1.500 Quadratmeter umfassende Werkstatt orientiert sich dabei an der US-amerikanischen Firma „TechShop“, die bis 2017 kommerzielle „Makerspaces“ betrieb, in denen Maker sowie Ingenieurinnen und Ingenieure mit professioneller technologischer Ausstattung Prototypen herstellen konnten.¹¹⁰ Während sich manche „Makerspaces“ zudem explizit als gemeinwohlorientierte Einrichtungen verstehen, definieren

sich andere vor allem als Inkubatoren für kommerziell orientierte Innovationen. In der Regel positionieren sich entsprechende Einrichtungen aber zwischen diesen beiden Polen.

Insbesondere aufgrund der Popularisierung des „Maker Movement“ wird Desktop-3D-Druck gegenwärtig als Treiber einer Demokratisierung von Innovationsprozessen betrachtet. Die Infrastruktur von „Makerspaces“, zu der auch preisgünstige additive Fertigungstechnologien gehören, erlaubt es, Prototypen vergleichsweise einfach herzustellen. Das eröffnet wiederum Innovationsprozesse auch und gerade für solche Personen, die keinen Zugang zu unternehmenseigenen oder akademischen/universitären Innovationslaboren haben.¹¹¹

Es lässt sich also feststellen, dass das „Maker Movement“ in Deutschland mittlerweile fest verankert ist. „Makerspaces“ haben sich als Räume kollaborativen Lernens und Experimentierens etabliert. Als Orte der Produktion von gebrauchsfertigen Produkten sind sie allerdings von lediglich nachgeordneter Bedeutung. Insgesamt ist das „Maker Movement“ als Gemeinschaft von Technologie-Enthusiastinnen und -Enthusiasten einzuordnen, die in ihrer ganzen Breite weniger als Avantgarde einer dezentralen Produktion relevant ist als vielmehr aufgrund ihrer Rolle als öffentlich wirksamer Instanz für die Vermittlung von 3D-Druck-Technologien.

4.3.3 3D-Druck als Mittel der Technikkommunikation und Bildung

Desktop-3D-Drucker ermöglichen den breiten Zugang zu zukunftssträchtigen Produktionstechnologien, die bislang auf professionelle Anwendungskontexte beschränkt waren. Eine Produktion an der Schnittstelle von digitaler und analoger Welt wird durch sie konkret erfahrbar.

109 Zu den unterschiedlichen Begriffsverwendungen: Cavalcanti, 2013. Trotz unterschiedlicher Herkunftskontexte lassen sich scharfe Grenzen zwischen „FabLabs“, „Hacker-“ und „Makerspaces“ kaum ziehen. Auf der Website Hackerspaces („Hackerspaces“, o. J.) wird eine Übersicht der entsprechenden Werkstätten angeboten. Hier waren im Juni 2019 insgesamt 2.328 „Hackerspaces“ eingetragen, wovon 1.413 aktiv und 358 in Planung waren.

110 UnternehmerTUM, o. J. und „TechShop“, o. J.

111 Hippel, 2006.

Box: FabLabs

Die von Neil Gershenfeld initiierten, sogenannten FabLabs („Fabrication Laboratories“) stellen eine stärker institutionalisierte Variante der „Makerspaces“ dar. Sie sind insbesondere den Ideen des gemeinsamen Lernens, des Wissensaustauschs und der Bildung gewidmet. „FabLabs“ zeichnen sich durch eine Mindestausstattung an Geräten aus, zu der in jedem Fall öffentlich zugängliche 3D-Drucker gehören. Das erste deutsche „FabLab“ wurde 2009 in Aachen gegründet. Aktuell sind auf der Internetseite fablabs.io 1.260 „FabLabs“ weltweit registriert, davon 48 in Deutschland.

Damit sind 3D-Drucker auch und gerade als Medien der Technikkommunikation einsetzbar, also als Instrument zur Vermittlung und Aneignung von technischer Kompetenz. „Makerspaces“ besitzen in diesem Zusammenhang eine wichtige Funktion als Orte, die einen Zugang zu sogenannten MINT-Themen¹¹² eröffnen, die Konstruktion von Prototypen erlauben und ein kollektives Experimentieren ermöglichen.¹¹³ Das öffentlich zugängliche Arbeiten mit 3D-Druckern wird daher auch von institutionellen Akteuren vorrangig als neue Art des Umgangs mit Technik und der Heranführung an technologische Zusammenhänge wahrgenommen.

Neben den bereits erläuterten „Makerspaces“ sind für die Technikkommunikation außerdem „Maker-Messen“ von zentraler Bedeutung. Auf solchen „Maker-Messen“ wird Technik vor einer breiteren Öffentlichkeit als Event inszeniert. Entwicklerteams zeigen dabei 3D-Drucker in Aktion und stellen additiv gefertigte Objekte vor, die für das Publikum sicht- und greifbar machen, was sich mit entsprechenden Technologien herstellen lässt. Zudem dienen die Messen oft auch als Plattform für Vorträge zu den technischen Möglichkeiten und gesellschaftlichen Auswirkungen des 3D-Drucks. Zu den größten und bekanntesten Veranstaltungen dieser Art gehören seit 2006 die vom „MAKE“-Magazin ausgerichteten „Maker Faires“. In Deutschland fin-

den solche „Maker Faires“ unter anderem in Hannover und Berlin statt.¹¹⁴ Daneben existieren weitere Messen, die von anderen Veranstaltern verantwortet werden, beispielsweise die „Make Munich“.

4.3.4 3D-Druck als Konsumprodukt

Ogleich Desktop-3D-Drucker die großen Erwartungen, die in sie gesetzt wurden, bislang nicht erfüllen konnten, sind sie dennoch dabei, sich als reguläre Konsumprodukte zu etablieren, die in Elektromärkten oder über den Online-Versandhandel erworben werden können. Dazu trug insbesondere der Ablauf des Patentschutzes für das „Fused Deposition Modeling“ (FDM) bei – ein Verfahren, auf dem bereits die Open-Hardware-Drucker des RepRap-Projekts basierten. Inzwischen ist eine große Zahl verschiedener Desktop-FDM-Drucker auf dem Markt erhältlich, wobei die Preisspanne von ca. 300 Euro bis etwa 3.500 Euro pro Fertigungsmaschine reicht. Zudem werden im Geiste des RepRap-Projekts nach wie vor kostengünstige Drucker im Eigenbau produziert. Und schließlich kommt das FDM-Verfahren auch bei der Anwendung von preisgünstigen 3D-Druck-Stiften zum Tragen, mit denen sich freihändig dreidimensionale Formen zeichnen lassen.

Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich auch für den Bereich der Stereolithografie ab, wengleich die Gerätepreise hier mit ca. 3.500 Euro noch vergleichsweise

¹¹² MINT steht für die Bereiche Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

¹¹³ Dickel, Ferdinand & Petschow, 2014.

¹¹⁴ Im Jahr 2017 besuchten rund 18.000 Teilnehmerinnen und Teilnehmer die „Hannover Maker Faire“.

Box: 3D-Drucker in Bibliotheken

Bibliotheken, die sich im Zuge der Digitalisierung als kollektive Lern- und Wissensorte neu zu positionieren versuchen, richten zunehmend „Makerspaces“ mit 3D-Druckern in ihren Räumlichkeiten ein. Auf diese Weise sollen Bibliotheken nicht zuletzt für Ingenieurwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler (bzw. Studierende entsprechender Studiengänge) attraktiver werden, da diesen so die Möglichkeit gegeben wird, an der Schnittstelle von digitaler und materieller Technik zu lernen und zu arbeiten.¹¹⁴ Beispiele dafür sind die Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden, die Stadtbibliothek Köln sowie der mit Mitteln der Europäischen Union geförderte „Makerspace“ der Schiller-Bibliothek in Berlin. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass „Makerspaces“ in Bibliotheken einen Beitrag zur MINT-Förderung zu leisten imstande sind und 3D-Drucker in ihrem Leistungsangebot zudem die Hauptattraktion darstellen, diese somit besonders geeignet sind, um neue Nutzergruppen zu gewinnen.¹¹⁵

hoch zu veranschlagen sind. Neben dem hohen Anschaffungspreis für den Drucker tragen aktuell aber vor allem die Kosten für das Druckmaterial dazu bei (135 Euro pro Liter), die Zugänglichkeit zu diesem Verfahren für private Anwenderinnen und Anwender zu erschweren. Auch die additive Herstellung von Metallobjekten ist gegenwärtig noch ausschließlich professionellen Anwendern vorbehalten, allerdings haben einzelne Anbieter bereits entsprechende Entwicklungsprojekte angekündigt.

Neben Desktop-3D-Druckern sind für Privatpersonen mittlerweile aber auch Geräte, die industriellen Standards genügen, verfügbar. So gibt es Unternehmen, die 3D-Druck mittels unterschiedlichster Materialien und Verfahren über das Internet als Dienstleistung anbieten. Notwendige Voraussetzung hierfür ist lediglich ein digitales Modell, das von der Nutzerin oder dem Nutzer zunächst hochzuladen ist und anschließend in materielle Form übertragen werden kann. Neben solchen Dienstleistern bieten auch einige wenige „Makerspaces“ sowie spezialisierte 3D-Druck-Shops Privatpersonen Zugang zu solchen professionellen 3D-Druck-Verfahren.

Ein weiterer Faktor für die zunehmende öffentliche Verbreitung des 3D-Drucks ist zudem der einfache Zugang zur digitalen Modellierung einer großen Anzahl von Gegenständen. Während Sharing-Plattformen wie „Thingiverse“ Hunderttausende Designs zum freien Download anbieten, können mit der Verbreitung von Open-Source-CAD-Software entsprechende Modelle auch am eigenen Computer erstellt werden. Hinzu kommt, dass auch 3D-Scan-Verfahren zunehmend für private Nutzerinnen und Nutzer verfügbar gemacht werden. Mit diesen Verfahren kann eine physische Struktur als digitales Modell unmittelbar abgebildet, modifiziert und additiv reproduziert werden. Eine der zugänglichsten Varianten des 3D-Scans stellen gegenwärtig entsprechende Smartphone-Apps dar, die digitale Vorlagen auf Grundlage einer Fotoserie generieren (Fotogrammetrie).

Internetplattformen wie „Thingiverse“ und „Shapeways“ zeigen, dass die Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Drucks für den Konsumentensektor im Grundsatz vielfältig sind, die Anwendungspraxis in der Regel allerdings eher im künstlerischen/designorientierten Bereich zu verorten ist. Daneben dienen die entsprechenden Technologien vor allem dem „Prototyping“ oder spielerischen Zwecken. Zudem sind im privaten Anwendungsbereich additiv gefertigte Güter nach wie vor deutlich von pro-

¹¹⁵ Bonte, Lohmeier & Oehm, 2014.

¹¹⁶ Hanselmann, 2017.

fessionell hergestellten zu unterscheiden. Allerdings zeigt sich, dass der Gebrauch von 3D-Druckern bei der Fertigung von funktionalen (Ersatz-)Teilen dann sinnvoll ist, wenn diese zum einen nur schwer oder teuer zu erwerben sind und zum anderen additiv einfach konstruiert werden können.

Die bislang eher als gering einzuschätzenden praktischen Einsatzmöglichkeiten des 3D-Drucks für Privatpersonen sind in erster Linie auf die nach wie vor stark begrenzten Kapazitäten der Hardware und die Beschränkungen des bislang einsetzbaren Materials (in der Regel Filament für FDM-Drucker) zurückzuführen. Dem gegenüber stehen die enormen Fortschritte im Softwarebereich. Der Makrotrend der Digitalisierung mündet hier in einer großen Vielfalt von Möglichkeiten der Herstellung und Verbreitung digitaler Vorlagen.

Ein wichtiger Faktor für die Steigerung der Verbraucherakzeptanz gegenüber Desktop-3D-Druckern ist deren Benutzerfreundlichkeit. Für verschiedene Geräte wird bereits heute eine sogenannte Plug-and-play-Funktionalität reklamiert, sodass eine intuitive Nutzung ohne nennenswerte Vorkenntnisse zunehmend möglich ist.

4.3.5 Die mediale Popularisierung des 3D-Drucks

Das Thema „3D-Druck“ erfährt in On- und Offlinemedien gegenwärtig wie bereits erwähnt starke Aufmerksamkeit. Die Medien tragen zur Popularisierung bei, indem sie Zukunftsvisionen aufgreifen, die bereits in frühen Phasen der Entwicklung additiver Fertigungstechnologien formuliert wurden. Sie schreiben diese fort und verbreiten sie in der Öffentlichkeit. Wie die Diskussion um 3D-gedruckte Waffen zeigt (siehe auch Kap. 5.1.1), werden dabei nicht nur visionäre Hoffnungen, sondern auch Befürchtungen popularisiert. Sowohl Hoffnungen als auch Befürchtungen finden in den tatsächlichen Möglichkei-

ten des Desktop-3D-Drucks gegenwärtig allerdings kaum eine Entsprechung, sondern speisen sich aus zukunftsgerichteten Extrapolationen. Das Verhältnis von Hoffnungen und Befürchtungen ist in diesem Zusammenhang spiegelbildlich: Beide Formen der Erwartung beziehen sich auf den Verlust der Datenkontrolle durch etablierte Institutionen. Sie folgen damit dem Schema netzpolitischer Diskussionen,¹¹⁷ das mit dem 3D-Druck so auch auf die stoffliche Produktion übertragen wird.

Die gestiegene mediale Aufmerksamkeit, insbesondere für Anwendungen im DIY-Bereich, hat konkrete Folgen für die Entwicklung sämtlicher additiver Fertigungsverfahren. Dabei ist der Prozess dieser Popularisierung selbst eng verbunden mit der Geschichte des mehrdeutigen Begriffs „3D-Druck“. 3D-Druck bezeichnete zunächst ein spezielles additives Fertigungsverfahren neben anderen, wurde aber vor allem in zahlreichen Massenmedien zunehmend häufiger als Sammelbegriff für alle additiven Verfahren verwendet. Die Bezeichnung wird heute von vielen verschiedenen Akteuren aufgegriffen und dient nun vermehrt als Begriff zur Selbstbeschreibung auch durch Vertreter verschiedener industriell etablierter Verfahren der additiven Fertigung.

Mit der Popularisierung und Ausweitung des 3D-Druck-Begriffs ist für Anwender der entsprechenden Technologien allerdings ein Konflikt verbunden. Auf der einen Seite sichert die strategische Verwendung des Begriffs mediale Aufmerksamkeit, die Einladung zu Konferenzen oder die Bewilligung bestimmter Fördergelder. Zudem trägt die große mediale Aufmerksamkeit zum wirtschaftlichen Erfolg von Start-up-Unternehmen bei, die sich mit Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich kleiner, niedrigpreisiger FDM-Drucker und druckbarer Materialien am Markt zu etablieren versuchen. Auch die

¹¹⁷ Seemann, 2014.

Box: Prothetik als Beispiel für funktionalen Desktop-3D-Druck

Die grundsätzliche Fähigkeit zur Individualisierung von Produkten, die mit der Additiven Fertigung einhergeht, könnte zahlreiche etablierte Industriezweige zukünftig stark verändern. Ein Beispiel dafür ist die Prothetik, wo professionelle additive Verfahren mittlerweile immer häufiger zum Einsatz kommen. Zudem etabliert sich parallel dazu eine bedarfsgelenkte Nischenökonomie Betroffener, die mit privaten FDM-Druckern und auf Grundlage von „Open Source Communities“ funktioniert.¹¹⁸ Die Open-Source-Gemeinschaft e-NABLE etwa stellt zahlreiche Dateien für einfache Prothesen zum Download zur Verfügung, die mit einem handelsüblichen 3D-Drucker für Privatanwenderinnen und anwender physisch hergestellt werden können. Zur Weiterentwicklung dieses Ansatzes wurde e-NABLE 2015 im Rahmen der sogenannten Impact Challenge, einem Innovationsförderprogramm des Internetdienstleisters Google, eine Förderungssumme von 600.000 US-Dollar gewährt.¹¹⁹ Innerhalb der aktuell noch in Entstehung begriffenen Innovationsgemeinschaft, die sich mit 3D-gedruckten Prothesen befasst, nehmen von Amputation betroffene Menschen eine zentrale Rolle ein, beispielsweise bei der Entwicklung und dezentralen Produktion von Handprothesen. Im Vergleich zu kommerziellen Produkten sind die Kosten für solche Prothesen sehr gering (ca. 50 US-Dollar). Entsprechende Produkte sind insbesondere für Anwenderinnen und Anwender interessant, die bisher von der Versorgung ausgeschlossen waren, z.B. weil sie über keine Krankenversicherung verfügen. Zudem tragen die Produkte in der Handprothetik zu einem neuen Verhältnis zwischen Prothesenträgerin bzw. träger und Prothese bei, da aufgrund der geringen Kosten und Haltbarkeit ein häufigerer Wechsel zwischen verschiedenen Produkten möglich und nötig ist. Nicht zuletzt verändert der 3D-Druck auch die Ästhetik der Prothesen. So erlaubt er zwar keine hautähnliche Optik, die sich mithilfe von manuell gesteuerten Silikonverfahren erreichen lässt, bietet dafür aber neue Gestaltungsmöglichkeiten. Beispielsweise werden nichtanthropomorphe Designs besonders von jüngeren Prothesenträgerinnen und trägern gut angenommen. Sie stellen nicht nur einen neuen Markt dar, sondern tragen durch ihre hohe Sichtbarkeit auch zum Wandel etablierter Vorstellungen über körperliche Einschränkung und Behinderung bei. Allerdings kann die medizinische Qualität und Sicherheit von gedruckten Prothesen, die nicht industriell gefertigt wurden, kaum garantiert werden. Das Beispiel der DIY-Prothetik demonstriert daher nicht nur die Chancen, sondern auch die Risiken der Amateurfabrikation als Folge einer Popularisierung von 3D-Druck-Technologien im privaten Sektor.

vermeintlich peripheren Geräte und Anwendungen wie 3D-Scanner oder CAD-Software erleben gegenwärtig ein starkes Wachstum, wodurch entsprechende technologische Entwicklungen weiter vorangetrieben werden. Hiervon profitieren auch Anbieter additiver Fertigungstechnologien im industriellen Bereich.

Auf der anderen Seite erschwert eine allzu euphorische Berichterstattung aber auch die Kommunikation über konkrete Projekte und kann zu überhöhten Erwartungen und Frustration bei Verbraucherinnen und Verbrauchern führen. So werden

etwa technische Möglichkeiten falsch eingeschätzt oder irreführende Vergleiche angestellt. Expertinnen und Experten beklagen daher mitunter Missverständnisse, die durch die Verwendung des Sammelbegriffs offenkundig entstanden sind.¹¹⁹

Die Berichte über technische Weiterentwicklungen in sämtlichen Teilbereichen des 3D-Drucks führen zu überzogenen Erwartungen bezüglich der tatsächlichen Leistungsfähigkeit der Geräte, die ähnlich wie der „Replicator“ aus der TV-Serie „Star Trek“ gewissermaßen auf Zuruf die Wün-

¹¹⁸ Walz, 2014; Zuniga et al., 2016.

¹¹⁹ Zaepernick, 2014.

sche der Anwenderin oder des Anwenders erfüllen sollen. Anbieter der Technologie beklagen auf Kundenseite insbesondere zu hohe Erwartungen hinsichtlich der Genauigkeit der Übereinstimmung des Replikats mit der Planungsvorlage, der Materialvielfalt und -kombinierbarkeit, der Bauzeiten und Kosten sowie der Produktqualität. Hingewiesen wird zudem immer wieder auf drei im aktuellen Diskurs nicht ausreichend beleuchtete Punkte: Zunächst unterscheiden sich die einzelnen Verfahren und Fertigungsmaschinen in ihrer Leistungsfähigkeit. Keine Fertigungsmaschine eignet sich für den Universaleinsatz, ist also in der Lage, die

verschiedensten Produkte für die unterschiedlichsten Anwendungsszenarien zu entwickeln. Zudem ist das entsprechende Produkt weder einfach auf Knopfdruck zu fertigen noch im Anschluss an die additive Herstellung sofort einsatzbereit, sondern bedarf in der Regel einer intensiven Vor- und Nachbereitung. Schließlich sind zwar viele Anwendungsszenarien denkbar, aber längst nicht alle auch in wirtschaftlicher Weise zu realisieren. Insgesamt zeigt sich so auch hier, dass die mediale Popularisierung ein unscharfes und oft übersteigertes Bild des 3D-Drucks erzeugt, das der tatsächlichen Anwendungspraxis nicht entspricht.

4.3.6 Empfehlungen zur stärkeren Nutzung von Potenzialen der Additiven Fertigung im privaten Bereich

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist festzustellen, dass der preiswerte 3D-Druck – im Gegensatz zur Additiven Fertigung im industriellen Sektor – als Produktionstechnologie im privaten Bereich bislang keine nennenswerte Rolle spielt. Eine stärkere Relevanz der entsprechenden Technologien ist mittelfristig lediglich für den Fall zu erwarten, dass die Preise im Konsumsektor weiter sinken werden, die Gerätebedienung vereinfacht wird, die Produktionsergebnisse verlässlicher werden und sich die Einsatzmöglichkeiten ausweiten. Nur in ausgewählten Bereichen wie der Prothetik sind bislang funktionale Nutzungsweisen zu registrieren, die über die Ersatzteilerfertigung hinausgehen.

Mittelfristig wird Desktop-3D-Druckern vor allem die Rolle eines Mediums für experimentell-spielerische Formen des Technikumgangs zukommen, mit dessen Hilfe sich eingespielte Praktiken des Web 2.0 (z. B. Tauschen, Teilen, Kooperieren) auch materiell konkretisieren lassen. Dabei verspricht insbesondere die kollaborative Nutzung von preiswerten additiven Verfahren in „Makerspaces“ und „FabLabs“, beispielsweise zum Bau von Prototypen, innovative Impulse, weshalb sich solche Verfahren als Instrumente der MINT-Förderung und Technikkommunikation eignen. Damit die additiven Fertigungstechnologien ihre Potenziale im privaten Bereich noch stärker entfalten können, geben die Akademien folgende Handlungsempfehlungen:

Vorteile der Additiven Fertigung zur nachhaltigen und preiswerten Produktion von Einzelstücken nutzen

Über die Möglichkeit, mittels additiver Fertigungsverfahren preiswerte Einzelstücke zu generieren, können spezifische gesellschaftliche Probleme auf eine neue Weise angegangen werden. So lassen sich entsprechende Technologien, beispielsweise zur Produktion von Ersatzteilen, für defekte Gebrauchsgegenstände einsetzen. Eine solche Produktion würde im Sinne der Nachhaltigkeit das Reparaturprinzip stärken und die Neubeschaffungsoption wieder stärker in den Hintergrund drängen. Auch die Herstellung individueller Hilfsmittel zur Überwindung von Hürden im Alltag für Menschen mit Einschränkungen, z. B. durch Alter oder Behinderung, stellt einen interessanten Anwendungsbereich dar. Eine gezielte Förderung von Projekten, die sich für

die Nutzung additiver Fertigungstechnologien zur Lösung gesellschaftlicher Probleme engagieren, kann zudem in hohem Maße dazu beitragen, Verständnis und Akzeptanz der entsprechenden Technologien in der Bevölkerung zu erhöhen.

Additive Technologien nutzen, um Technikakzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen

Um breiten Bevölkerungskreisen die Teilhabe an additiven Technologien zu ermöglichen und weitere Innovationspotenziale zu schaffen, sollten von technik- und innovationspolitischer Seite insbesondere solche Einrichtungen und Orte (z. B. „Makerspaces“) gefördert werden, die Privatnutzerinnen und -nutzern den Zugang zu 3D-Druckern eröffnen und entsprechende Kompetenzen vermitteln. Eine solche Vorgehensweise würde es erlauben, auch privaten Anwenderinnen und -Anwendern komplexere Verfahren und Geräte sowie ein größeres Materialspektrum zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise ließen sich neue Anwendungsfelder der Additiven Fertigung im privaten Bereich besser erschließen, als dies mit den derzeit im Handel erhältlichen Geräten möglich ist.

4.4 Digitalisierung und additive Herstellung im Bereich der Archäologie und der Kulturgutpflege

4.4.1 Voraussetzungen, Chancen, Herausforderungen

Ins öffentliche Bewusstsein rückten die Nutzungsmöglichkeiten der Additiven Fertigung im Bereich der Archäologie, als anlässlich der systematischen Zerstörung von Kulturgütern und archäologischen Stätten wie Palmyra durch die Terrororganisation „Islamischer Staat“ während des Bürgerkriegs in Syrien darüber diskutiert wurde, ob es möglich wäre, entsprechende Technologien zur Replikation bzw. Restauration von Kulturgütern zu verwenden. Auch unter Fachleuten gehen die Ansichten allerdings nach wie vor auseinander, ob bzw. in welchem Ausmaß eine additive Nachbildung von Objekten oder Objektteilen eine geeignete Maßnahme im Sinne des präventiven Kulturgutschutzes darstellen könnte.¹²⁰

Grundlage der additiven Nachbildung ist die digitale dreidimensionale Dokumentation des entsprechenden Kulturguts, etwa eines archäologischen Objekts, eines Kunstwerks oder eines Kunsthandwerk-

lichen Erzeugnisses. Bereits diese Dokumentation bietet großes, gegenwärtig allerdings erst in Ansätzen erkennbares Nutzungspotenzial. In diesem Zusammenhang ist zunächst die größere Flexibilität und Detailgenauigkeit der 3D-Modelle im Vergleich zu herkömmlichen zweidimensionalen Dokumentations- und Darstellungsverfahren zu nennen, was erhebliche Vorteile für die nachhaltige Kulturgutdokumentation, die Arbeit in kulturbewahrenden Einrichtungen (z. B. Museen) oder die Grundlagenforschung mit sich bringt. Aufgrund technologischer Fortschritte im Bereich der 3D-Dokumentation und -modellierung lässt sich der Einsatz solcher Verfahren bereits heute kostengünstig realisieren, sodass eine serielle Erfassung großer Mengen von Kulturgütern künftig möglich sein wird.

Zudem lassen sich digitale Modelle durch additive Fertigungsverfahren physisch replizieren, was neue Möglichkeiten im Umgang mit Kulturgütern eröffnet, die von der Restaurierung und Reproduktion beschädigter oder zerstörter Objekte bis hin zur Erstellung von Replikaten für die inklusive, barrierefreie Bildung und Vermittlung reichen. Dabei gehen die Verwendungsmöglichkeiten von Kulturgutreplikaten, die mittels Additiver Fertigung erzeugt worden sind, weit über die der Originale hinaus, da sie nicht deren

¹²⁰ Beispielsweise Factum Foundation, 2016; Fless, 2015; Jalabi, 2016.

Schutz- und Sorgfaltsanforderungen unterliegen. Zudem kommt den 3D-Replikaten durch die nahezu beliebige Modifizierbarkeit von Objekteigenschaften (z. B. Größe, Farbe, Material) eine deutlich gesteigerte Flexibilität mit Blick auf unterschiedliche Anwendungsszenarien zu.

Insbesondere bei Objekten mit komplexer Formgebung oder Oberflächenstruktur bietet die physische Rekonstruktion auf Grundlage eines 3D-Modells markante Vorteile gegenüber rein manuellen Verfahren der Nachbildung, beispielsweise was Präzision, Zeit- und Personalaufwand sowie Kosten betrifft. Vorteilhaft ist außerdem die Möglichkeit, Objektgeometrien herzustellen, die mit herkömmlichen

technischen Verfahren kaum oder gar nicht zu reproduzieren sind. Ein weiterer Nutzen additiver Fertigungsverfahren zur Nachbildung von Kulturgütern resultiert aus dem Verzicht auf Werkzeug oder Gussformen. Da die Produktionsdauer bei additiver Herstellung im Vergleich etwa zum Spritzguss bislang deutlich länger ausfällt, besteht die Stärke entsprechender Verfahren allerdings nicht in der schnellen Massenproduktion, sondern in der rentablen Fertigung sehr kleiner Serien oder von Einzelstücken. Je nach Eigenschaftsprofil des entsprechenden Objekts und angestrebter Verwendung des 3D-gedruckten Kulturguttreplikats können unterschiedliche Verfahren der Additiven Fertigung eingesetzt werden.¹²²

4.4.2 Empfehlungen zur weiteren Nutzung der Additiven Fertigung im Bereich der Kulturgutpflege

Um das Potenzial der digitalen 3D-Dokumentation von Kulturgütern zukünftig voll ausschöpfen zu können, sind noch verschiedene technische, regulative und kulturelle Herausforderungen zu bewältigen. Die systematische Erforschung dieser Herausforderungen steht gegenwärtig zwar ebenso erst am Anfang wie die praktische Erprobung und Standardisierung der entsprechenden Verfahren und Instrumente. Allerdings zeigt sich in beiden Handlungsfeldern aufgrund gezielter Förder- bzw. Infrastrukturmaßnahmen bereits heute eine erhebliche Dynamik.¹²³ Um diese Dynamik aufrechtzuerhalten und die Anwendungsmöglichkeiten additiver Technologien im Sinne einer nachhaltigen Nutzung in der Kulturgutpflege weiterzuentwickeln, sprechen die Akademien folgende Empfehlungen aus:

Interdisziplinären wissenschaftlichen Austausch stärken

Wie bei allen anderen Verfahren, die zur Konservierung, Restaurierung und Rekonstruktion von Kulturgütern eingesetzt werden, ist auch im Falle der Additiven Fertigung darüber nachzudenken, unter welchen Voraussetzungen und mit welcher Zielsetzung additive Technologien verwendet werden sollen. Die entsprechende Diskussion ist im Austausch zwischen Kulturwissenschaften, Museologie, Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft sowie Expertinnen und Experten für die 3D-Replikation von Kulturgütern zu führen.

¹²² So nutzt beispielsweise das 3D-Labor am Institut für Mathematik der Technischen Universität Berlin im Rahmen seiner engen Zusammenarbeit mit kulturelhaltenden Institutionen das gesamte Spektrum der ihm zur Verfügung stehenden Technologien zur Additiven Fertigung. Dieses Spektrum umfasst eine Anlage zur selektiven Laser-Sinterung mit Polyamid, einen 3D-Drucker mit Digital-Light-Processing-Verfahren, einen kleinen Stereolithografen, Fused-Deposition-3D-Drucker sowie Pulverdrucker. (Für Informationen zur technischen Ausstattung des 3D-Labors danken wir Herrn Joachim Weinhöhl, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mathematik der Technischen Universität Berlin.)

¹²³ Zu diesen Förder- und Infrastrukturmaßnahmen zählen beispielsweise die „Richtlinie zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Digitalisierung von Objekten des kulturellen Erbes – eHeritage“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) vom 15. Juni 2016, das im Jahr 2015 bei der Stiftung Preußischer Kulturbesitz eingerichtete Zentrum für digitale Kulturgüter in Museen (ZEDIKUM) oder das am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) angesiedelte Projekt Cultlab 3D zur seriellen 3D-Dokumentation von Kulturgütern.

Unterscheidbarkeit von Original und Kopie absichern

Ähnlich wie im Fall des Farbkopierers werden voraussichtlich auch Produkte aus Additiver Fertigung im Zuge der technologischen Weiterentwicklung künftig eine Qualität erreichen, die einer weitgehenden Übereinstimmung zwischen Replikat und Original gleichkommt. Angesichts dieser absehbaren Fortschritte im Bereich in der originalgetreuen Objektreplication ergibt sich daher die Aufgabe, 3D-Replikate von Kulturgütern eindeutig und irreversibel als solche zu kennzeichnen, sodass ihre Unverwechselbarkeit mit dem Original in rechtlich (z. B. Restitution von Kulturgütern) oder wirtschaftlich (z. B. Kunsthandel) relevanten Zusammenhängen gewährleistet ist. Konkret könnte diese Unverwechselbarkeit durch die Integration von messbaren, dauerhaft identifizierbaren Replikationsmarkern sichergestellt werden. Neben solchen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich der Identifizierung und Authentifizierung von 3D-replizierten Kulturgütern ist es zudem erforderlich, klare Regelungen für Fragen des Urheberrechts und der Lizenzierung zu schaffen.

Sofern das 3D-Replikat das entsprechende Original zukünftig in vielen Anwendungsbereichen der Kulturgutpflege (z. B. in einem Museum oder im Kunsthandel) tatsächlich ersetzen sollte, würde dieser Umstand schließlich eine geistes- und kulturwissenschaftliche Neubewertung von Original und Kopie erfordern. Einschlägige Diskussionen werden in der Fachwelt bereits seit einigen Jahren geführt.¹²⁴

Hilfsmittel zur Erfassung und Modellierung von Objekten weiterentwickeln

Besonders drängende Herausforderungen existieren gegenwärtig bei der Objekterfassung und der physischen Objektreplication, bei der Datenspeicherung und -bereitstellung sowie im Fall der Visualisierung und Rekontextualisierung von 3D-Objektmodellen in verschiedenen Anwendungsszenarien, wie in sogenannten Augmented-Reality-(AR)- oder Virtual-Reality-(VR)-Umgebungen.

Beim 3D-Druck von Kulturgutreplikaten, die beispielsweise in der Forschung verwendet werden sollen, stellt sich zunächst die Aufgabe, ein möglichst exaktes 3D-Modell des nachzubildenden Objekts zu erzeugen. Um eine möglichst hohe Detail- und Maßstabtreue des Objektreplikats zu erreichen, ist es im ersten Schritt erforderlich, die Oberflächenstruktur exakt zu erfassen und wiederzugeben und wenn möglich auch die innere Struktur des Artefakts zu erfassen. Zudem sind ein hohes Maß an haptischer Äquivalenz herzustellen und die Farbtreue des Replikats zu gewährleisten.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Weiterentwicklung digitaler Technologien zur 3D-Objekterfassung, zur 3D-Objektmodellierung aus 2D-Bildinformationen und zur Aufbereitung der 3D-Objektdateien für die Additive Fertigung. Da Kulturgüter im Hinblick auf ihr Material, ihre Größe, ihr Gewicht und ihre Oberflächenbeschaffenheit sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen können, ist – insbesondere mit Blick auf die physische Replikation dieser Objekte – zunächst allgemein zu klären, mit welchen Verfahren („Structure from Motion“, Laser-Scan, Streifenlicht-Scan, kombinierte Verfahren) welche Kulturgüter effizient und detailliert erfasst werden können und welche Detailgenauigkeit mit welchem Erfassungsaufwand realisiert werden kann. Dabei ist insbesondere die Digitalisierung von fein strukturierten oder komplexen Oberflächen (z. B. bei mit Keilschrift beschriebenen Tontafeln),

¹²³ Beispielsweise die Studie der Universität Graz zur „Relevanz archäologischer Reproduktionen für Universitäten, Museen, Denkmalschutz und Forschungsvorhaben“ (Karl & Trinkl, 2014).

von Kompositobjekten (z. B. mit Metallbeschlägen versehene Holzgegenstände), von transparenten Objekten (z. B. Gefäße aus Bergkristall) und von Objekten mit spiegelnden Oberflächen (z. B. Metall, Glas) in technischer Hinsicht nach wie vor nicht unproblematisch. Darüber hinaus müssen Verfahren optimiert werden, mit denen sich die Beschaffenheit der Objektoberfläche (Textur, Farbe) möglichst präzise darstellen lässt.

Additive Fertigungstechnologien zum Einsatz originalgetreuer Materialien weiterentwickeln

Um eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Original und Replikat zu erzielen, sollte bei der Fertigung auf entsprechende Ursprungsmaterialien (z. B. Ton, Mineralien, Legierungen) zurückgegriffen werden. Daher ist es erforderlich, die Verfahren der Datenerfassung zur Bestimmung der Materialien sowie die additiven Fertigungstechnologien für deren Verarbeitung auf die Anforderungen der Replikation von Kulturgütern hin anzupassen.

Interdisziplinäre Vernetzung und interdisziplinären Austausch fördern

Bei der Bewältigung von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich des 3D-Drucks von Kulturgutreplikaten sollte sehr viel stärker als bisher mit solchen Institutionen und Unternehmen kooperiert werden, die Anwendungen der Additiven Fertigung für andere Gebiete (z. B. Medizin, Maschinenbau, „Food Engineering“) entwickeln und erproben. Durch den Austausch von Erfahrungen und Expertise lassen sich Synergieeffekte erzielen, die zur Optimierung von Verfahren, Werkstoffen und Werkzeugen beitragen könnten.

Verfahren zur Standardisierung digitaler Modelle international etablieren

Um eine langfristige Auswertbarkeit und Vergleichbarkeit der digitalen Modelle zu gewährleisten und einen internationalen Austausch über die auf ihnen basierenden Forschungsarbeit zu ermöglichen, ist es notwendig, sich international auf standardisierte Verfahren und Referenzwerte zu verständigen.

Internationale Partnerschaften fördern

Eine wesentliche Herausforderung im Zusammenhang der Additiven Fertigung von Kulturgutreplikaten stellt gegenwärtig die asymmetrische Verfügbarkeit von 3D-Technologien in globaler Perspektive dar. Einschlägige technologische Entwicklungen und infrastrukturelle Anpassungen finden aktuell insbesondere in den wirtschaftlich entwickelten Staaten des Nordens statt, während es in zahlreichen anderen, von massiver Kulturgutzerstörung betroffenen Staaten (z. B. Irak, Syrien, Libyen, Jemen) sowohl an technologischer Expertise im Bereich der Additiven Fertigung als auch an entsprechenden Kapazitäten mangelt. Der nachhaltige Schutz von Kulturgütern auch in Kriegs- und Krisensituationen sowie die hierfür erforderliche präventive 3D-Dokumentation der Objekte sind allerdings nur dann zu bewerkstelligen, wenn der Zugang zu additiven Technologien und entsprechender Infrastruktur auch in bislang unterversorgten Staaten gewährleistet ist.

Um sicherzustellen, dass Expertise und Kapazitäten im Bereich der additiv gefertigten Replikation von Kulturgütern auch dort verfügbar sind, wo solche Kulturgüter durch bewaffnete Konflikte oder Naturkatastrophen besonders stark bedroht sind, sind Forschungs- und Entwicklungsaufgaben nach Möglichkeit im Rahmen internationaler Partnerschaften (Nord-Süd) anzugehen. Dabei sollten insbesondere die Erfordernisse einer langfristigen Datenspeicherung bei allen Kooperationspartnern berücksichtigt werden. Zudem sollte der Aufbau internationaler Netzwerke dazu beitragen, das für den Bereich der 3D-Technologie notwendige Investitionsvolumen in wirtschaftsschwachen Staaten zu minimieren.

4.5 Additive Fertigung von Nahrung

Voraussetzung für die Verarbeitung von Lebensmitteln mittels Additiver Fertigung („3D Food Printing“) ist die Bereitstellung viskoser, also fließfähig verfügbarer Zutaten. Für zahlreiche Lebensmittelkategorien (z. B. Back-, Wurst- und Süßwaren, Milchprodukte, Snacks, verarbeitete Obst- und Gemüseprodukte sowie Teigwaren) ist diese Anforderung zumindest prinzipiell erfüllbar. So ist es verschiedenen Forschungsgruppen inzwischen gelungen, mehr als 30 verschiedene Lebensmittel aus den wichtigsten Lebensmittelkategorien mithilfe des „3D Food Printing“ erfolgreich zu verarbeiten. Produziert wurden die Lebensmittel mittels „Material Jetting“, „Binder Jetting“ oder Materialextrusion. Erste Drucksysteme zur Verarbeitung von Lebensmitteln sind bereits am Markt erhältlich. Die Anwendung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Lebensmitteln beschränkt sich gegenwärtig noch überwiegend auf den Süßwarenbereich. Entsprechende Verfahren werden in diesem Zusammenhang insbesondere zur Verarbeitung von Schokolade und Gummibonbons eingesetzt. Allerdings wurden auch auf Insektenproteinen basierende Zutaten mittels Additiver Fertigung bereits verarbeitet.¹²⁴

4.5.1 Individualisierung von Grundnahrungsmitteln

Aufgrund der wachsenden Bedeutung von Lebensmittelallergien oder -unverträglichkeiten und in Anbetracht der großen Nachfrage nach speziellen Ernährungsvarianten (z. B. vegetarisch, vegan, Low Carb) und Lebensmittelformen (Textur, Optik, Geschmack) betrachtet die Lebensmittelindustrie additive Fertigungsverfahren als vielversprechendes Instrument, um künftig innovative Lebensmittelideen zu realisieren.

Bei der Aufnahme und Verarbeitung verschiedener Lebensmittel bzw. Inhaltsstoffe gibt es mitunter große individuelle Unterschiede im menschlichen Stoffwechsel, die sich auch auf die Gesundheit des bzw. der Einzelnen auswirken können.¹²⁵ Analog zum Pharmabereich, wo die Entwicklung hin zur personalisierten Medizin bereits seit Jahren in Gang ist, könnte zukünftig daher auch ein Markt für personalisierte Lebensmittel entstehen. Die computergestützte, schichtweise Herstellungspraxis eröffnet in diesem Zusammenhang beispielsweise neue Möglichkeiten im Bereich der Lebensmitteltextur und Geschmackskomposition. So ist bekannt, dass der Salzgehalt eines Lebensmittels insgesamt deutlich gesenkt werden kann, wenn das Salz in ganz bestimmten Schichten eingebracht wird.¹²⁶

4.5.2 Ergänzung von Grundnahrungsmitteln

Mithilfe von 3D-Druck-Technologien lassen sich auch Grundnahrungsmittel nachstellen oder modifizieren.¹²⁷ Um bei einer spezifischen Unterversorgung mit physiologisch bedeutsamen Nährstoffen Mangelerscheinungen vorzubeugen, könnte es daher zielführend sein, geeignete Speisen – von der Backware bis hin zum Gemüseprodukt – im Zuge additiver Verarbeitungsprozesse mit entsprechenden Inhaltsstoffen zu ergänzen. So wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts bereits ein 3D-Food-Printing-System zur Herstellung personalisierter Lebensmittel für Patientinnen und Patienten mit Kau- und Schluckstörungen entwickelt,¹²⁸ mit dessen Hilfe pürierte natürliche Lebensmittel (Gemüse, Fleisch, Sättigungsbeilagen) mit exakt abgestimmten Mengen an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten angereichert und anschließend in ihre ursprüngliche Form gebracht werden konnten (Abb. 10). Die optisch ansprechende, natürlich

¹²⁵ Zeevi et al., 2015.

¹²⁶ Guilloux et al., 2013.

¹²⁷ Yang, Zhang & Bhandari, 2017.

¹²⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.

¹²⁴ Ligon et al., 2017.



Abbildung 10: Mit dem Material-Jetting-Verfahren gedruckte Lebensmittel: Geliertes Schweineschnitzel mit Gnocchi (Foto-Bildquelle: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf).

anmutende Form der entsprechenden Nahrung kann dazu beitragen, bei Patientinnen und Patienten die Akzeptanz gegenüber additiv verarbeiteten Lebensmitteln zu steigern, während die Anreicherung mit Nährstoffen dazu beiträgt, auch bei reduzierter Verzehrmenge Mangelerscheinungen zu vermeiden.

Skeptisch zu sehen ist allerdings der bereits von einigen Autoren diskutierte Einsatz von 3D-Verfahren in der Fleischerzeugung mit dem Ziel, Versorgungsengpässe zu bekämpfen, z.B. in Krisengebieten.¹²⁹ Neben erheblichen technischen Schwierigkeiten, die es in diesem Anwendungsfeld noch zu überwinden gilt (siehe auch Kap. 4.1.2), sind in diesem Zusammenhang auch Fragen nach Sinn und Effektivität einer entsprechenden Anwendung in Krisengebieten zu berücksichtigen, wo niedrighschwellige, robuste und einfach zu handhabende Lösungen benötigt werden. Für den heimischen Markt gibt es mit Blick auf aus ökologischen und ethischen Gründen gewünschte Reduzierung der Tierhaltung ebenfalls Interesse an solchen alternativen Methoden der Fleischerzeugung. Aber auch hier gibt es noch Vorbehalte in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, die Nachhaltigkeit und die Verbraucherakzeptanz

gegenüber einer In-vitro-Erzeugung von Fleisch.¹³⁰ Auch hier sollte in der öffentlichen Kommunikation vermieden werden, frühzeitig zu hohe Erwartungen an neue Produktionsmethoden zu wecken.

4.5.3 Akzeptanz additiv gefertigter Lebensmittel

Im Gegensatz zu anderen Anwendungsfeldern existieren für additiv gefertigte Produkte in Medizin und Lebensmittelindustrie direkte Verbraucherbefragungen, die Aufschluss zur Akzeptanz von Nutzerinnen und Nutzern geben. Dabei ist ganz allgemein zu berücksichtigen, dass die Akzeptanz eines Produkts nicht unmittelbar von der Wirkung seiner Eigenschaften abhängig ist. Für die Kategorie der 3D-gedruckten Lebensmittel konnte mithilfe von Konsumentenbefragungen in Australien gezeigt werden, dass die Akzeptanz nicht allein vom gesundheitlichen Mehrwert und Geschmack der Lebensmittel abhängt. Vielmehr beurteilen Konsumentinnen und Konsumenten die Produkte außerdem danach, ob auch die einzelnen Bestandteile des Produkts als natürlich, gesund oder schmackhaft einzustufen sind und inwieweit die verwendeten Zutaten zuvor bearbeitet wurden.¹³¹

¹²⁹ Bhat, Kumar & Bhat, 2017.

¹³⁰ Hocquette, 2016.

¹³¹ Lupton, 2017.

4.5.4 Empfehlungen zur weiteren Etablierung additiver Verfahren in der Lebensmittelproduktion

Die additive Herstellung von Nahrungsmitteln befindet sich gegenwärtig noch im Entwicklungsstadium. Inwieweit der Mehrwert, den additive Fertigungstechnologien in diesem Anwendungsfeld bieten, auch ihren weitreichenden Einsatz zur Folge haben wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht sicher abzusehen. Daher gilt es, die Erforschung der Potenziale und Risiken solcher Technologien im Bereich der Lebensmittelproduktion weiter voranzutreiben. Aus diesem Grund empfehlen die Akademien folgende Maßnahmen:

Herstellungsnormen und Hygienestandards in der additiven Lebensmittelherstellung etablieren

Vor einer Ausweitung additiver Fertigungsprozesse in der Nahrungsmittelproduktion ist zunächst insbesondere die Frage zu klären, ob sich die im Bereich der Lebensmitteltechnik prinzipiell einzuhaltenden Hygienevorschriften auch bei der Anwendung von additiven Fertigungsverfahren umsetzen lassen und wie solche Vorschriften in der Praxis umgesetzt werden können. Zu diesem Zweck sind entsprechende Normen und Kontrollverfahren zu entwickeln und anschließend zu etablieren.

Additiv gefertigte Lebensmittel ernährungsphysiologisch ausgewogen gestalten

Sollen spezifische Personengruppen wie Allergiker oder pflegebedürftige Menschen einen signifikanten Teil ihres Nahrungsbedarfs zukünftig mit additiv gefertigten Nahrungsmitteln decken, ist mithilfe repräsentativer Studien im Vorfeld zu prüfen, ob solche Nahrungsmittel sämtliche Nährstoffe, die eine physiologisch adäquate Ernährung sicherstellen, in ausreichendem Maß und in einer für den menschlichen Stoffwechsel verwertbaren Form enthalten.

5 Wechselwirkungen zwischen der Additiven Fertigung und der Gesellschaft

5.1 Akzeptanz und Akzeptabilität

Akzeptanz ist im sozialwissenschaftlichen Verständnis ein empirisches Konzept, das die Interessen von Nutzerinnen und Nutzern wiedergibt und sich auf die subjektiv formulierte Wendung „Was wollen wir?“ bringen lässt. In der technologischen Entwicklung ist es ein wichtiges Ziel, Produkte oder Technologien zu entwickeln, die auf Akzeptanz stoßen. Darüber hinaus wird jedoch auch angestrebt, akzeptierbare Technik anzubieten, die gewissen normativen Standards genügt. Der Begriff der „Akzeptabilität“ wird daher verwendet, um normativ-ethische Überlegungen mit in den Diskurs der Technologieentwicklung einzubinden („Was sollten wir wollen?“).

Konkrete technologische Entwicklungen beeinflussen die Akzeptanz der Additiven Fertigung in gleichem Maße, wie umgekehrt das Nutzerverhalten technische Entwicklungen vorantreiben oder hemmen kann. So hängt die Akzeptanz kundenindividueller Massenproduktion aus dem 3D-Drucker einerseits von der Qualität der entsprechenden Produkte und damit vom aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ab. Andererseits führt eine größere Nachfrage nach additiv gefertigten Produkten zu einer Intensivierung von Forschung und Entwicklung in diesem Bereich. Die intensivierte Entwicklung wirkt sich dann wiederum auf die Qualität additiv hergestellter Produkte aus und erzeugt so ein positives Feedback auf Kundenseite. Gerade dann, wenn Qualität und Sicherheit der Produkte ausschlaggebend für deren Akzeptanz sind, haben regu-

latorische Eingriffe wie die Qualitätskontrolle durch den TÜV oder einheitliche internationale Standards immense Bedeutung für deren Realisierung. Die Additive Fertigung kann dabei als soziotechnisches System betrachtet werden: Das Technische und das Soziale greifen untrennbar ineinander. Das Soziale umfasst in diesem Zusammenhang alle relevanten Interessensgruppen sowie formelle und informelle Institutionen, die deren Zusammenleben und Umgang mit der entsprechenden Technik regeln (z. B. TÜV).¹³²

Neben der Sicherheit von Produkten und Prozessen ist ein weiterer für Vertrauen und Akzeptanz relevanter Aspekt die Datensicherheit. Bei der Fertigung individualisierter Produkte wird von verschiedenen Scan-Technologien Gebrauch gemacht, wobei die entsprechend erhobenen Daten anschließend online geteilt werden können. Die Frage des ethisch vertretbaren Gebrauchs von additiven Fertigungstechnologien ist somit auch eine Frage des Datenschutzes im Netz. Daher sollten entsprechende Schutzmaßnahmen, beispielsweise zur Verhinderung von Hacking und Missbrauch, aber auch zum Schutz vor Raubkopieaktionen bei der technologischen Entwicklung stets mitbedacht werden. Zudem stellen sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte wesentliche Faktoren für die gesellschaftliche Akzeptanz additiver Verfahren dar.

¹³² Neely, 2016.

Box: Dual Use – Waffen aus dem 3D-Drucker?

Zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte verfolgen gesellschaftlich anerkannte Ziele, gehen aber zugleich auch mit der Gefahr eines Missbrauchs ihrer Ergebnisse für schädliche Zwecke einher. Diese sogenannte Dual-Use-Problematik löst immer wieder Diskussionen über Chancen und Risiken einzelner Forschungstätigkeiten aus und fordert damit die Wissenschaft beständig heraus, sich in ihrem Tun zu hinterfragen.

Ein potenzielles Risiko der Additiven Fertigung wird in der Möglichkeit ihrer missbräuchlichen Nutzung zur Herstellung von Schusswaffen gesehen. 2012 verkündete die US-amerikanische Gruppe „Defense Distributed“ ihr Vorhaben, mittels privat verfügbarer 3D-Druck-Technologien Schusswaffen herzustellen und die entsprechenden Methoden öffentlich zur Verfügung zu stellen. Das politische Ziel der libertär orientierten, texanischen Organisation besteht nach eigenen Angaben in einer Demokratisierung der Waffenfertigung – und überträgt so die Forderung des „Maker Movement“ nach einer Demokratisierung der Produktion auf den Bereich der Handfeuerwaffen. Am 6. Mai 2013 veröffentlichte „Defense Distributed“ eine Dateivorlage für die additive Herstellung einer Pistole mit der Bezeichnung „Liberator“, die sich weltweit verbreitete und über 100.000 Mal heruntergeladen wurde. Mithilfe eines handelsüblichen 3D-Druckers (mit FDM-Technologie) lässt sich so ohne detaillierte Vorkenntnisse eine Waffe produzieren. Ein metallener Schlagbolzen muss gleichwohl noch hinzugefügt werden.

Diese Pistole gilt als ungenau, fehleranfällig und ist bereits nach einem Schuss unbrauchbar, sodass Qualität und Zuverlässigkeit von 3D-gedruckten Schusswaffen nicht mit der Funktionsfähigkeit einer professionell gefertigten Feuerwaffe zu vergleichen ist. Weitere bislang veröffentlichte 3D-Druck-Waffen sind mitunter zwar funktionaler, allerdings handelt es sich dabei auch um Hybridkonstruktionen, bei denen nur einzelne Bestandteile mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden. Auch für Waffen auf Metallbasis sind mittlerweile Fertigungsentwürfe veröffentlicht worden, doch befinden sich die entsprechenden Fertigungstechniken (z.B. laserbasiertes Pulverbett-Schmelzen) durch die Investitionskosten im sechsstelligen Bereich bislang kaum in der Reichweite von Privatanwenderinnen und -anwendern.¹³⁷ Der Zugang zu Daten alleine reicht also nicht aus, um gebrauchsfertige Objekte herzustellen, welche eine Qualität wie professionell gefertigte Schusswaffen aufweisen. Daher sah auch die deutsche Bundesregierung im September 2018 in ihrer Antwort auf eine Kleine Anfrage zur Verbreitung von Waffen aus dem 3D-Drucker keinen Anlass für eine weiterreichende Regulierung der Verbreitung entsprechender Baupläne oder Software.¹³⁴

Dennoch lässt sich nicht ausschließen, dass die Verfügbarkeit solcher Anleitungen zu Missbrauch führt, wie der terroristische Anschlag von Halle vom Herbst 2019, bei dem zwei Menschen ums Leben kamen, deutlich vor Augen führte. Teile einer der vom Täter hergestellten Waffen stammen nach bisherigem Kenntnisstand aus online verfügbaren Bauplänen und wurden in einem handelsüblichen 3D-Drucker hergestellt. Der Fall zeigt somit zum einen, dass Waffen(teile) aus dem 3D-Drucker bereits Realität sind und Menschenleben fordern können. Er demonstriert aber zum anderen zugleich die Grenzen additiv gefertigter Schusswaffen. Die technischen Limitationen der vom Täter selbst hergestellten Waffen ließen einen Anschlag in dem von ihm geplanten Ausmaß nicht zu.

133 Hacker, Fritsch & Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, 2015; Birtchnell & Urry, 2016.

Öffentlich zugängliche Plattformen versuchen einem solchen Missbrauch entgegenzuwirken, indem sie die Verbreitung von Waffen in ihren Nutzungsbedingungen explizit ausschließen. Dennoch bleiben die entsprechenden STL-Dateien über andere Online-Plattformen zugänglich. Obgleich das Gefährdungspotenzial durch solche Anleitungen aufgrund der technischen Limitationen durch den Herstellungsprozess heute noch nicht höher einzuschätzen ist als der Missbrauch von anderen Gebrauchsgegenständen, wie z.B. Messern, oder anderen Produktionsmethoden, wie z.B. CNC Fräsen und Drehen, ist es für die Zukunft nicht auszuschließen, dass technische Weiterentwicklungen eine Neubewertung erforderlich machen könnten. Dies wäre z.B. der Fall, wenn Verfahren zum 3D-Druck von hochfesten und temperaturbeständigen Kunststoffen entwickelt werden würden oder der 3D-Druck von Metallen durch starke Preisenkungen auch für private Nutzer verfügbar würde¹³⁵.

5.1.1 Privatpersonen als Nutzerinnen und Nutzer von 3D-Druckern

Oft wird ohne weiteren empirischen Nachweis unterstellt, dass additive Verfahren innerhalb der Gesellschaft große Akzeptanz genießen. In Fachliteratur und Publikumsmedien finden sich Begriffe wie „Massenmarkt“, „industrielle Revolution“ oder „disruptive Technologie“.¹³⁵ Diese Annahme einer vermeintlichen Akzeptanz stützt sich auf ein überaus positives Bild, das zahlreiche Medien vom Potenzial des 3D-Drucks zeichnen. Einer solch euphorischen Berichterstattung zufolge müssten additive Fertigungsverfahren es jeder Person ermöglichen, nahezu alle gewünschten Gegenstände in jeder nur vorstellbaren Form zu produzieren, was allerdings weder den gegenwärtigen noch den zukünftigen Möglichkeiten solcher Technologien entspricht (siehe auch Kap. 4.3).¹³⁶

Eine kritische Berichterstattung fand hingegen im Zusammenhang mit einer im Internet verfügbaren Anleitung zur additiven Herstellung von Handfeuerwaffen statt. So wurde 2013 bekannt, dass 15 der 16 notwendigen Bestandteile einer

Schusswaffe auf heimischen 3D-Druckern gefertigt werden können. Da hierfür ausschließlich nichtmetallische Werkstoffe zum Einsatz kommen sollten, ließe sich auf diese Weise eine Waffe fertigen, die von Metalldetektoren nicht erkannt werden kann (siehe auch Box „Dual Use – Waffen aus dem 3D-Drucker?“). Solche Anwendungsmöglichkeiten wurden auch 2018 noch einmal breit diskutiert, als US-Behörden den Verkauf der entsprechenden Druckdatei nicht als eindeutigen Verstoß gegen das US-Waffengesetz werteten.¹³⁷ Die Diskussion, die in diesem Zusammenhang geführt wurde, scheint sich allerdings kaum auf die überwiegend positive mediale Haltung gegenüber additiven Technologien insgesamt ausgewirkt zu haben.

Neben dem Einsatzspektrum und der Bedienungsfreundlichkeit der für den Privatbereich verfügbaren Geräte zur Additiven Fertigung sowie der Produktqualität ihrer Erzeugnisse spielt für die private Nutzung additiver Fertigungstechnologien auch die Frage des Gesundheitsschutzes eine große Rolle. So wird eine Vielzahl der industriell genutzten Werkstoffe als gesundheitsschädlich eingestuft, weshalb solche Materialien nur unter Einhaltung entsprechender Arbeitsschutzauflagen verwendet werden dürfen (siehe Kap. 5.2.7). Verfahren, in denen solche Werkstoffe zum Einsatz kommen,

¹³⁴ Bundesregierung, 2019.

¹³⁵ Beispielsweise Sissons & Thompson, 2012. In dieser Stellungnahme wird auf eine ausführliche Diskussion der verschiedenen bereits existierenden und zukünftig möglichen Geschäftsmodelle für den Vertrieb additiv gefertigter Produkte verzichtet, da das Thema bereits ausführlich in der Akademienstellungnahme „Additive Fertigung“ behandelt wurde (acatech, Leopoldina & Akademieunion 2016).

¹³⁶ Stahl, 2013; Barnett, 2014.

¹³⁷ Beispielsweise ZEIT ONLINE, AP, ces, 2018.

sind für Anwendungspraktiken im Sinne des DIY-3D-Drucks daher nicht geeignet. Im Bereich der Heimanwendung kommen gegenwärtig stattdessen vor allem FDM-, vereinzelt auch Stereolithografie-Verfahren zum Einsatz. Dabei ist darauf zu achten, dass die angebotenen Rohstoffe (Kunststofffilamente, Kunstharze) nicht gesundheitsgefährdend sind und beim Herstellungsvorgang keine gesundheits-schädlichen Dämpfe freigesetzt werden, da nicht garantiert werden kann, dass Endverbraucherinnen und verbraucher bestehende Empfehlungen, etwa zur Prozessgasabsaugung, tatsächlich umsetzen.

5.1.2 Privatkunden als Zielgruppe für additiv gefertigte Produkte

Bislang gibt es nur wenige Anwendungsbereiche, in denen sich das Angebot der additiven Fertigung von individuellen Produkten für Privatkunden rentiert. Es ist festzustellen, dass der Großteil der Verbraucherinnen und Verbraucher nach wie vor konventionell hergestellte Produkte aus industrieller Massenfertigung bevorzugt, da hierfür üblicherweise die Möglichkeit eines Umtauschs besteht. Zudem ist auf Konsumentenseite bislang nur wenig Bereitschaft zu erkennen, für eine Individualisierung von Produkten mehr Geld oder Zeit zu investieren. Anders verhält es sich allerdings, wenn aus der individualisierten Fertigung ein Funktionsvorteil erwächst, beispielsweise im Falle additiv gefertigter Laufschuhe, die individuell angepasst werden können.

Ein weiteres Akzeptanzhindernis, das über die technischen Charakteristika der Additiven Fertigung und das Eigenschaftsprofil des additiv gefertigten Produkts hinausgeht, ist betriebswirtschaftlich bedingt. So wird die momentane Schwierigkeit von individualisierten Angeboten am

Markt, mit Produkten der Massenproduktion zu konkurrieren, damit in Verbindung gebracht, dass es hierfür noch keine ausreichend angepassten Geschäftsmodelle gebe. Beispielsweise lassen sich individualisierte Produkte nicht ubiquitär in Geschäftsauslagen bewerben. Klassische Marketing- und Vertriebsstrategien stoßen bei individualisierter Fertigungsweise somit an ihre Grenzen.

5.1.3 Gewerbliche Nutzung

Im industriellen Sektor findet die Additive Fertigung gegenwärtig insbesondere beim „Rapid Prototyping“ und beim „Rapid Tooling“, also bei der schnellen Prototypenerstellung und beim schnellen Werkzeugbau Verwendung. Zeit- und somit Geldersparnis werden hier als wichtige Faktoren für die Akzeptanz der additiven Technologien gesehen. Mithilfe entsprechender Verfahren werden Prototypen, deren Herstellung in der Vergangenheit häufig in Niedriglohnländern ausgelagert wurde, bereits seit den 1980er Jahren vermehrt wieder in den Staaten hergestellt, in denen sie zuvor entwickelt wurden. Eine solche Vorgehensweise spart Iterationsschleifen und somit Zeit. Verschiedene Unternehmen, die sich ursprünglich ausschließlich dem „Rapid Prototyping“ gewidmet hatten, produzieren mittels additiver Fertigungsverfahren heute auch größere Stückzahlen und bieten zudem Nachbearbeitung oder Beratung an, was auf eine steigende Akzeptanz im industriellen Sektor hindeutet. Im Jahr 2018 wurde der weltweite Markt für additive Fertigungstechnologien zudem auf einen Wert von 9,3 Milliarden US-Dollar geschätzt, das Wachstum betrug 18 Prozent, was ebenfalls als Indikator für die steigende Akzeptanz zu werten ist.¹³⁹

Qualität und Haltbarkeit additiv gefertigter Produkte sind sowohl im privaten als auch im industriellen Bereich wichtige Voraussetzungen für ihre Akzeptanz auf

¹³⁸ Es gibt derzeit bereits Bestrebungen von Forschungsinstituten (z.B. Fraunhofer ILT, Aachen) und Firmen (z.B. OneClick Metal, Markforged), „Low-cost“-Metall-3D-Drucker mit Preisen unter 20.000 Euro zu entwickeln.

¹³⁹ SmarTech Analysis, 2018.

Anwenderseite. In der Fertigungswirtschaft hängt die Akzeptanz einer Technik maßgeblich von der Dauer des Produktlebenszyklus ab. In der Automobil-, Luftfahrt- und Schwermaschinenindustrie haben sich additive Verfahren unter anderem deswegen bereits durchsetzen können. Die Lebenszyklen entsprechend gefertigter Produkte betragen in diesen Anwendungsfeldern drei, zehn oder sogar zwanzig Jahre.¹⁴⁰ Für die Akzeptanz additiver Technologien im industriellen Sektor sind zudem die Dauer der Herstellung und damit zusammenhängend deren Kosten (insbesondere bei großer Stückzahl) von zentraler Bedeutung. Während additive Verfahren, wie oben beschrieben, für Prototypen und Einzelteile einen Vorteil durch zeitnahe Fertigung aufweisen, sind sie bei größeren Stückzahlen in der Regel deutlich zeitintensiver als die konventionelle Produktion.

In anderen Bereichen wie dem Bauwesen erschweren schließlich heterogene Unternehmens- und Betriebsstrukturen sowie komplexe Arbeitsabläufe (z. B. zeitlich befristete Kooperation verschiedener Unternehmen und Gewerke, Einsatz unterschiedlichster Materialien, Beachtung zahlreicher Vorschriften, Normen und örtlich geltende Bestimmungen) die Integration additiver Fertigungsverfahren in die Produktionskette.

5.1.4 Additive Fertigung und Innovationskultur

Die Zurückhaltung industrieller Anwender bei der Etablierung additiver Verfahren ist allerdings nicht nur auf die spezifischen Verfahrens- und Produkteigenschaften im Kontext der Additiven Fertigung zurückzuführen. Verschiedentlich wird diese Zurückhaltung auch mit der besonderen Innovationskultur in Deutschland in Zusammenhang gebracht.¹⁴¹ Demnach ist bei deutschen

Unternehmen die Risikobereitschaft bei der Einführung neuer Geschäftsmodelle auf Grundlage innovativer Technologien deutlich geringer ausgeprägt als in den USA. Dies gilt insbesondere für Innovationen im Bereich der Digitalisierung.¹⁴²

Eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung im Auftrag des Arbeitgeberverbands Südwestmetall zum Einfluss der Digitalisierung auf kleine und mittelständische Unternehmen konnte zeigen, dass insbesondere größere Unternehmen sensibel auf Hindernisse wie Sicherheitsbedenken, Vorbehalte vonseiten der Arbeitnehmervertretung und fehlende Nutzentransparenz reagieren.¹⁴³ Als bedeutende unternehmensinterne Hindernisse konnten zudem fehlende Mitarbeiterkompetenzen und eine ablehnende Haltung gegenüber Neuerungen identifiziert werden. Die Einführung neuer Technologien erfordert von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern auf allen Betriebsebenen Einarbeitungsbereitschaft und aktive Wissensaneignung. Kleine Unternehmen sind der Studie zufolge dabei allerdings weniger sensibel sowohl für externe als auch für interne Hindernisse. Ein ähnliches Ergebnis lässt sich auch für die Akzeptanz der Additiven Fertigung vermuten.

¹⁴⁰ Petch, 2017.

¹⁴¹ Richter & Wischmann, 2016.

¹⁴² Deutsche MittelstandsNachrichten, 2014.

¹⁴³ Schöllhammer et al., 2017.

5.1.5 Empfehlungen zur Aufrechterhaltung von Akzeptanz und Akzeptabilität additiver Fertigungstechnologien

Durch die Einführung additiver Fertigungsmethoden werden voraussichtlich viele verschiedene gesellschaftliche Bereiche berührt. Bislang existieren allerdings nur wenige Studien zu den konkreten Auswirkungen auf verschiedene Gruppen der Bevölkerung, seien sie positiver oder negativer Art. Um die bislang tendenziell positive Grundstimmung gegenüber additiven Fertigungsverfahren aufrechtzuerhalten, ist es im Zuge ihrer weiteren Etablierung in industriellen, medizinischen oder privaten Anwendungsfeldern erforderlich, eine transparente Risiko-Nutzen-Kommunikation zu praktizieren. Zu berücksichtigen sind in diesem Zusammenhang neben ökonomischen auch ökologische und ethische Aspekte sowie auch soziale Kriterien wie das der Akzeptanz. Die Akademien empfehlen daher die folgenden Maßnahmen:

Begleitforschung zu den gesellschaftlichen Auswirkungen der Additiven Fertigung etablieren

Um sowohl positive als auch negative Auswirkungen additiver Fertigungsverfahren im Vorfeld besser abschätzen und so die Entwicklung und Förderung der entsprechenden Technologien gezielter steuern zu können, ist intensive interdisziplinäre Begleitforschung erforderlich. So können beispielsweise Szenarioanalysen für die Abschätzung langfristiger Technologiefolgen hilfreich sein, indem sie unter anderem konkretere Einschätzungen über die Netto-Nachhaltigkeit additiver Fertigungsverfahren erlauben. Zudem sollten aus sozial- und geisteswissenschaftlicher Perspektive auch weiterhin öffentliche Erwartungen und Hype-Diskurse sowie die praktischen Verwendungs- und Aneignungsbedingungen des (Desktop-)3D-Drucks aufmerksam verfolgt und analysiert werden.

Ergebnisse der Begleitforschung in die Regulierung additiver Technologien einbeziehen

Um die positiven Nutzenpotenziale additiver Verfahren in der Praxis auch realisieren und mögliche Rebound-Effekte vermeiden zu können, muss der soziotechnische Systemcharakter ernst genommen werden. Institutionellen Regelungen im Umgang mit additiven Verfahren kommt daher eine zentrale und ggf. auch steuernde Rolle zu.

5.2 Veränderungen in der Arbeitswelt

Neue Technologien beeinflussen die Arbeitswelt in mehrfacher Hinsicht. Sie erfordern entsprechende Kompetenzen und Qualifizierungsmaßnahmen, beeinflussen Berufsprofile, wirken sich auf Arbeitsbedingungen und -organisation aus und rufen Effekte auf den Arbeitsmarkt hervor. Additive Fertigung ist Ausdruck und Bestandteil eines sogenannten Megatrends, der als „Digitalisierung“ bezeichnet wird und dessen Auswirkungen auf die Arbeitswelt bereits vielfach diskutiert werden. Genauso wie die Digitalisierung im Allgemeinen übt auch die Additive Fertigung Einfluss auf die Qualifizierung der Beschäftigten aus. Sie beeinflusst die Struktur der Arbeitsplätze und

ruft möglicherweise Rationalisierungsmaßnahmen hervor. Mit welcher Geschwindigkeit und Intensität sich diese Prozesse vollziehen, wird auch von der Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren und ihrer Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Verfahren abhängen. Zudem sind Veränderungen auf den betroffenen Märkten, neue Ansätze in Aus- und Weiterbildung, neue Geschäftsmodelle sowie die Aufeinanderfolge von Innovationen, also Variationen der Verfahrenstechnologien, für zukünftige Entwicklungen innerhalb der Arbeitswelt maßgeblich.

5.2.1 Neue (Ausbildungs-)Berufe, Fortbildung

Im Kontext der Additiven Fertigung stellt sich zunächst die Frage, ob die Etablierung ihrer Technologien in den verschiedens-

ten Anwendungsfeldern die Einführung neuer Berufe in ähnlichem Maße erfordert wie beim Siegeszug der Informationstechnologie in den 1990er Jahren.¹⁴⁴ Innerhalb der Metall- und Elektroindustrie sind sich die für die Modernisierung der Berufsbilder Verantwortlichen darüber einig, dass es ausreicht, die bestehenden Berufsprofile für die sogenannte Industrie 4.0 anzupassen, dass aber darüber hinaus keine neuen Berufsbilder geschaffen werden müssen.¹⁴⁵ Im Gegensatz dazu verfasste beispielsweise die Messegesellschaft Erfurt gemeinsam mit dem Fachbeirat der Technologiemesen „Rapid.Tech“ und „FabCon 3.D“ 2017 eine Petition an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), in der die Beteiligten sich dafür einsetzten, das Thema „Bildung und Ausbildung“ im Bereich additiver Technologien auf die politische Tagesordnung zu setzen und die additiven Technologien besser in die schulische, berufliche und universitäre Ausbildung zu integrieren.¹⁴⁶ Im Rahmen dieser Kritik wurde allerdings zu wenig gewürdigt, dass additive Fertigungsverfahren bereits seit 2008/2009 Eingang in verschiedene Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrpläne gefunden haben.¹⁴⁷

5.2.2 Qualifizierungsbedarf für die Additive Fertigung

In ihrem gemeinsamen Basispapier „Agiles Verfahren“ vom März 2017 haben der Arbeitgeberverband Gesamtmetall, der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) sowie die Industriegewerkschaft Metall (IG Metall) Handlungsempfehlungen zur Ausbildung und Qualifizierung für die Industrie 4.0 formuliert.¹⁴⁸ Dabei äußern sie die Ansicht, dass durch die offene

Struktur der Metall- und Elektroindustrierberufe sowie durch Ergebnisse aus entsprechenden Forschungen und betrieblichen Erfahrungen belegt werde, dass aktuell keine neuen Berufsbilder bzw. neue Zuschnitte von Berufsbildern erforderlich seien. Sie folgern vielmehr, dass die Berufe durch ihre gestaltungsoffene Struktur bedarfsgerecht aktualisiert werden könnten.¹⁴⁹ Die beteiligten Sozialpartner weisen darauf hin, dass als kurzfristig realisierbares Angebot zusätzliche Qualifizierungsmaßnahmen eingesetzt werden könnten, um Kompetenzen für Tätigkeitsfelder in der Industrie 4.0 zu vermitteln. Für die Metallberufe¹⁵⁰ wird neben Systemintegration und Prozessintegration ausdrücklich auch die Additive Fertigung als solche Zusatzqualifikation aufgeführt. Kritisch zu sehen ist bei dieser Qualifizierungsstrategie das Freiwilligkeitsprinzip, da hiermit gewisse Risiken verbunden sind.¹⁵¹ Ist die Schulung an einem spezifischen Verfahren nämlich lediglich optional vorgesehen, so steht es dem einzelnen Unternehmen frei, die Handhabung dieses Verfahrens seinen Auszubildenden zu vermitteln – oder auch nicht. Auszubildende, deren Ausbildungsunternehmen keine additiven Fertigungsverfahren verwendet und demzufolge auch keine entsprechenden Kenntnisse vermittelt, haben dann keine Möglichkeit, sich notwendige Kompetenzen zur Handhabung additiver Technologien anzueignen.

2018 wurden entsprechende Änderungen in den Berufsausbildungsverordnungen der industriellen Metall- und Mechatronikberufe veröffentlicht. Dem Vorgehen der Metall- und Mechatronikindustrie hat

144 Vittur, 1996; Petersen & Wehmeyer, 2003.

145 ME Gesamtmetall, 2017.

146 Messe Erfurt GmbH, 2017.

147 Das betrifft die Berufsfelder Produktionstechnologie, Technischer Modellbau, Technisches Produktdesign, Gießereimechanik, Gravur, Metallbildung (Marschall, 2016).

148 ME Gesamtmetall et al., 2017.

149 ME Gesamtmetall et al., 2017, S. 4.

150 Anlagenmechaniker/-in, Industriemechaniker/-in, Konstruktionsmechaniker/-in, Werkzeugmechaniker/-in und Zerspanungsmechaniker/-in.

151 In der Änderungsverordnung heißt es: „[...] kann die Ausbildung in einer oder mehreren der folgenden Zusatzqualifikationen vereinbart werden [...]“. Zweite Verordnung zur Änderung der Verordnung über die Berufsausbildung in den industriellen Metallberufen vom 7. Juni 2018, § 28 Zusatzqualifikationen, BGBl (Bundesanzeiger, 2018).

sich zudem die Gießereibranche abgeschlossen,¹⁵² sodass mittlerweile Berufstätige in diesen Berufen die Möglichkeit haben, sich für additive Fertigungsverfahren zusätzlich zu qualifizieren. Die sogenannte Zusatzqualifikation Additive Fertigungsverfahren setzt sich zusammen aus den Positionen Modellieren von Bauteilen, Vorbereiten von Additiver Fertigung sowie Additives Fertigen von Produkten, wobei auch Kenntnisse über verfahrensspezifische Vorschriften zur Arbeitssicherheit und zum Umweltschutz Berücksichtigung finden.¹⁵³ In die Rahmenlehrpläne anderer Ausbildungsordnungen haben die additiven Fertigungsverfahren hingegen noch keinen Eingang gefunden.

Eine Möglichkeit, die korrekte Handhabung additiver Fertigungstechnologien in der Ausbildung zu verankern, ohne die Ausbildungsordnung hierfür anpassen zu müssen, wurde vom Zahntechnikerhandwerk realisiert. Rechtliche Grundlage der Ausbildung ist hier nach wie vor die Ausbildungsordnung aus dem Jahr 1997. Dennoch gelingt es, Auszubildenden die Handhabung additiver Fertigungsverfahren zu vermitteln, indem die entsprechenden Technologien im Rahmen einer überbetrieblichen Lehrlingsunterweisung mit einer Lehrgangsdauer von einer Arbeitswoche berücksichtigt werden.¹⁵⁴ Da eine Arbeitswoche bezogen auf eine Gesamtausbildungsdauer von dreieinhalb Jahren allerdings nach wie vor ein äußerst geringes Zeitbudget für die Vermittlung anspruchsvoller Qualifikationen darstellt, hat der Verband Deutscher Zahntechniker-Innungen (VDZI) mittlerweile beschlossen, die Ausbildungsordnung in naher Zukunft zu novellieren, um verschiedene Aspekte

der Digitalisierung stärker als bisher in der Ausbildung berücksichtigen zu können.¹⁵⁵

5.2.3 Integration additiver Fertigungsverfahren in das Berufsbildungssystem

Die Integration neuer Technologien in die berufliche Bildung und in die Arbeitswelt erfolgt in der Regel in mehreren Schritten: Zunächst werden in einzelnen Unternehmen Anpassungsqualifizierungen „on the Job“ durchgeführt, entsprechende Kompetenzen also im Rahmen regulärer Arbeitsabläufe vermittelt. Bei der Einführung neuer technischer Anlagen und Geräte kann diese Erstunterweisung auch im Rahmen einer Herstellerschulung erfolgen. Anschließend werden weitere Kenntnisse in der Regel im Unternehmen durch selbstorganisiertes, systematisches Lernen erworben. Schließlich findet die neue Technologie Eingang in die Programme von Weiterbildungsanbietern. Um das vorhandene Personal für additive Fertigungsverfahren zu qualifizieren, gibt es gegenwärtig bereits zahlreiche Angebote von verschiedenen Institutionen sowie Industrie-, Handels- und Handwerkskammern. Hierzu gehören berufliche Weiterbildungen mit zusätzlichen Elementen der Additiven Fertigung, ein- und mehrtägige Seminare, firmenindividuelle Schulungs- und Beratungsangebote sowie mehrtägige Lehrgänge mit Zertifikat der Industrie- und Handelskammern (IHK) oder ein berufsbegleitendes Studium.

Erst im Anschluss folgt dann die Übernahme entsprechender Lehrinhalte in Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrpläne gemäß Berufsbildungsgesetz (BBiG). Das bedeutet, dass die Akteure im Berufsbildungssystem, die an der Entwicklung neuer Tätigkeitsprofile oder der Modernisierung bereits bestehender Berufe beteiligt sind, sinnvollerweise erst dann tätig werden, wenn offensichtlich ist, dass sich eine Technologie am Markt tatsächlich auch dauerhaft durchsetzen wird.

152 Auskunft des Vereins Deutscher Gießereifachleute (VDG) vom 16. Mai 2018.

153 Bekanntmachung der Neufassung der Verordnung über die Berufsausbildung in den industriellen Metallberufen vom 28. Juni 2018, Anlage 7, Teil C, S. 81: Zusatzqualifikation Additive Fertigungsverfahren (Bundesanzeiger, 2018).

154 Heinz-Piast-Institut für Handwerkstechnik, 2011.

155 Auskunft des VDZI vom 22. Mai 2018.

Während die Akademisierung, also die Einführung spezialisierter Bildungsgänge an Universitäten und Hochschulen, bei vielen neuen Technologien erst am Ende der Handlungskette steht, ist dieser Schritt im Fall der Additiven Fertigung bereits an erster Stelle erfolgt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Entwicklung der verschiedenen additiven Fertigungstechnologien bislang maßgeblich von Hochschulen, Universitäten und Forschungsgesellschaften (z. B. Fraunhofer-Gesellschaft) ausgegangen ist.¹⁵⁶ Additive Fertigungsverfahren sind bereits seit Jahren in unterschiedlicher Weise und Intensität in die Lehre von Hochschulen und Universitäten integriert. Das betrifft weniger die Etablierung eigener Studiengänge als vielmehr fachintegrierte Angebote, wie in der Automatisierungstechnik, der Baukonstruktion, der Lasertechnik, im Maschinenbau oder in der Produktentwicklung. Die unterschiedliche Benennung der Anwendungsbereiche, die rasche Differenzierung der additiven Verfahren und der Einsatz verschiedener Materialien erschweren eine systematische Übersicht der einschlägigen Vermittlungsangebote an Hochschulen und Universitäten. Für die Studiengänge ist es daher nicht leicht, die entsprechenden Studieninteressierten anzusprechen und für ein Studium zu gewinnen. Ähnliches gilt für Unternehmen, die Absolventen rekrutieren möchten und nicht ohne Weiteres den für sie optimalen Studiengang identifizieren können. Die mittlerweile vollzogene Standardisierung der Bezeichnung additiver Fertigungsverfahren¹⁵⁷ könnte daher als Impuls genutzt werden, um auch Anwendungsgebiete und Hochschulangebote einheitlich zu benennen.

5.2.4 Berufe und Qualifikationen in der Additiven Fertigung

Die Qualifikationen und Berufe, die Beschäftigte im Bereich der Additiven Ferti-

gung besitzen und ausüben, hängen vom jeweiligen Unternehmenstyp ab, wobei sich im Wesentlichen drei Unternehmenstypen unterscheiden lassen. Zunächst zählen hierzu die Hersteller von Anlagen zur additiven Fertigung aus den typischen Berufsfeldern Elektronik und Elektrotechnik, Systemelektronik, Informatik, Mechatronik, Servicetechnik sowie Industriekaufleute. Darüber hinaus existieren zahlreiche Dienstleister, die ausschließlich oder überwiegend Dienstleistungen auf Grundlage additiver Fertigungsverfahren für andere Unternehmen anbieten, wie dies etwa in den Berufsfeldern der Werkzeugmacher oder der Zahntechnik der Fall ist. Bei der Einstellung wird hier gern auf Personen zurückgegriffen, die eine grundlegende Berufsausbildung im Handwerk, manuelle Fertigkeiten, Kompetenzen in der Handhabung unterschiedlicher Verfahren sowie einschlägige Materialkenntnisse besitzen. Schließlich sind in diesem Zusammenhang auch solche Unternehmen relevant, die grundsätzlich konventionell produzieren, sich aber zusätzlich auch Anwendungsfelder der Additiven Fertigung erschließen. Ihre Beschäftigten sollten neben additiven nach wie vor auch konventionelle Fertigungsverfahren beherrschen, um flexibel einsetzbar zu sein.

Mittlerweile haben sich zudem Mischformen der hier erläuterten Unternehmenstypen etabliert. So bieten Anlagenhersteller für andere Unternehmen additive Fertigungsleistungen an, und überwiegend konventionell arbeitende Unternehmen, deren Anlagen zur additiven Fertigung nicht ausgelastet sind, erstellen für andere Unternehmen Modelle und Prototypen.

Die in den verschiedenen Berufen erforderlichen Kenntnisse und Fertigkeiten für die Anwendung additiver Technologien hängen vom spezifischen Verfahren und vom jeweiligen Produkt ab, das additiv herzustellen ist.¹⁵⁸ Die Bedienung von

¹⁵⁶ Marschall, 2016.

¹⁵⁷ Beuth Verlag GmbH, 2017.

¹⁵⁸ Marschall, 2016.

Laser-Sinter- oder Laser-Schmelz-Anlagen obliegt in der Regel Ingenieurinnen und Ingenieuren mit weitreichenden Materialkenntnissen, während bei der Herstellung sogenannter Otoplastiken (Hörgeräteschalen) mittels Stereolithografie vorwiegend Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter agieren, die handwerkliche, manuelle und gestalterische Kompetenzen besitzen, um den Scan der Abformung des äußeren Gehörgangs am Monitor bearbeiten zu können. Bei der Verwendung von 3D-Druckern zur Erstellung von Modellen sind zudem in der Regel Nachbearbeitung und Veredelung erforderlich, was ebenfalls handwerkliches Geschick voraussetzt.¹⁵⁹ Schließlich führen das Zusammenwachsen von Konstruktion und Herstellung, aber auch der verstärkte Kundenkontakt als Folge einer kundenindividuellen Produktionsweise zu einem höheren Bedarf an kommunikativen Kompetenzen im Tätigkeitsfeld der Additiven Fertigung.¹⁶⁰

5.2.5 Kooperationen zwischen Schulen, Unternehmen und Institutionen

Gemeinschaftliche Standorte von Berufsschulen (berufliche Erstausbildung) und Fachschulen (Techniker- und Meisterkurse) ermöglichen es, im Bereich der Additiven Fertigung Synergien zwischen unterschiedlichen Berufsgruppen mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus zu nutzen. Mittlerweile besitzen immer mehr Berufsschulen und Kollegs eigene 3D-Drucker, die sowohl in der Aus- als auch in der Weiterbildung eingesetzt werden können. Da die schulische Ausstattung in der Regel von der Finanzlage der jeweils zuständigen Kommune abhängt, sind zahlreiche Schulen auf Maschinenspenden von Unternehmen angewiesen, die ihre Auszubildenden nicht selten in der entsprechenden Bildungseinrichtung unterrichten lassen. Von der Zusammenarbeit profitieren somit bei-

de Seiten. Unternehmen haben zudem die Möglichkeit, mithilfe der Schulen Impulse zur stärkeren Berücksichtigung additiver Technologien im Lehrplan an die Bildungs- und Kultusministerien der Länder zu richten. Inzwischen bestehen etablierte Austauschbeziehungen zwischen Schulen, Unternehmen und Landesministerien.¹⁶¹

Auch Universitäten und Hochschulen engagieren sich bereits in Schulen und Betrieben, um dort Interesse an der Additiven Fertigung zu wecken. So bietet beispielsweise die Fachhochschule Aachen ein rollendes 3D-Druck-Labor, den „FabBus“, an, und das 3D-Kompetenzzentrum Niederrhein entwickelt gemeinsam mit den Projektpartnern Hochschule Rhein-Waal, Hochschule Ruhr West und RWTH-Aachen ein Konzept zur stärkeren Verankerung von Kompetenzen der digitalen Produktion in den Lehrplänen der Hochschulen und Schulen der Region. Dabei bieten Letztere auch Bildungsangebote und Beratung für Industrie und Handwerk an.¹⁶² Auch die Kammern können sich in solchen Clustern z. B. durch kurzfristig geschaffene Lehrgänge und Fortbildungen auf Grundlage einer Kammerregelung einbringen.¹⁶³

5.2.6 Auswirkungen auf Arbeitsmarkt und Arbeitskräfte

5.2.6.1 Digitalisierung, Automatisierung und Geschäftsmodelle

Im Rahmen der Diskussion um Auswirkungen der Digitalisierung werden gegenwärtig unterschiedliche Szenarien diskutiert,¹⁶⁴ die für Beschäftigte mit verschiedenen Qualifikationsniveaus unter-

161 Ein Beispiel hierfür ist die Andreas-Gordon-Schule Erfurt („Kompetenzzentrum für Aus- und Weiterbildung in Technik- und Dienstleistungsberufen“), welche zwei Unternehmenspartner gewinnen konnte und nun im Rahmen der Digitalwerkstatt mit den Thüringer Ministerien für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft sowie für Bildung, Jugend und Sport zusammenarbeitet, um den 3D-Druck in Thüringer Lehrplänen zu implementieren (Pohlemann, 2017).

162 Hochschule Rhein-Waal, 2017.

163 Hackel et al., 2015.

164 Hirsch-Kreinsen, 2014; Hochschule Rhein-Waal, 2017.

159 Marschall, 2016.

160 Marschall, 2016; Gebhardt, Dobischat & Hans-Böckler-Stiftung, 2015.

schiedliche Folgen haben würden. Aus Sicht von Arbeitnehmerinnen und -nehmern stellt sich in diesem Zusammenhang im Wesentlichen die Frage nach der Arbeitsplatzsicherheit und einer möglichen Gefährdung ihrer Stellung im Unternehmen. Daher ist zu überlegen, ob der erhöhte Anteil additiver Fertigungsprozesse zukünftig zur Verdrängung menschlicher Arbeitskraft führen wird oder ob durch die Einführung additiver Technologien möglicherweise auch neue Arbeitsplätze entstehen könnten. Die tatsächlichen Effekte sind noch nicht abzusehen und werden maßgeblich von der Gestaltung der entsprechenden Fertigungsanlagen abhängen. Im Gegensatz zu den USA wird in Deutschland nach wie vor Wert auf den Erhalt qualifizierter Facharbeit gelegt, weshalb Maschinen hierzulande zumindest nicht gezielt daraufhin konstruiert werden, dass sie von gering qualifiziertem Personal zu bedienen sind.

Jedoch gibt es auch in Deutschland Entwicklungen, die zur Verringerung einfacher Tätigkeiten im Rahmen der additiven Fertigung führen können. Ursprünglich manuell durchzuführende Nachbearbeitungsprozesse beispielsweise werden mittlerweile durch Entfernung des losen Pulvers in Auspackstationen und automatisierten Reinigungskabinen übernommen. Weitere Schritte zur Automatisierung im „Post Processing“ werden voraussichtlich folgen. Zudem übernehmen Programme für die Korrektur von Druckdaten durch STL-Reparatur und Optimierung zunehmend Eingriffe, die zuvor manuell durchgeführt wurden. Schließlich können mit „Spatial Grammar“ Maschinendaten und Bauteilinformationen auf eine Weise in Steuerungssoftware integriert werden, als besäße die Maschine Facharbeiterwissen.¹⁶⁵

Neue wirtschaftswissenschaftliche Studien weisen allerdings darauf hin, dass die Einführung neuer Technologien oftmals

zu einer Aufgabenverschiebung führt, nicht aber zwingend in einer Verringerung von Arbeitsplätzen resultiert.¹⁶⁶

5.2.6.2 Auswirkungen auf die Arbeitnehmermobilität durch neue Geschäftsmodelle

Da sich die Einführung additiver Fertigungsverfahren in Unternehmen oft sukzessive vollzieht, ist die unternehmensspezifische Integration der Additiven Fertigung sehr unterschiedlich ausgeprägt. Zunächst konstruieren Unternehmen oft noch selbst und lassen die Bauteile von Dienstleistungsunternehmen additiv fertigen. Erst später übernehmen sie mit eigener Anlage dann den gesamten Fertigungsprozess. Allerdings existieren auch gebrochene Prozess- bzw. Logistikketten, bei denen zwischen den Unternehmen, die Bauteile benötigen, und den Fertigungsdienstleistern noch Vertriebsunternehmen oder Marktplätze geschaltet sind. Möglichkeiten für Arbeitnehmerinnen und -nehmer, von einem Arbeitsplatz in der konventionellen Produktion in die Additive Fertigung zu wechseln, werden durch die Verteilung von Aufgaben auf solche voneinander entkoppelten Akteure im Produktionsprozess naturgemäß nicht erleichtert. Dadurch wächst auch für den Arbeitsmarkt im Bereich der Additiven Fertigung die Bedeutung von Jobvermittlungsportalen.

5.2.6.3 Qualifikationsniveau

Inwiefern der Einsatz additiver Fertigungstechnologien zukünftig zu neuen Organisationsformen in der Arbeitswelt führen und sich auf die Beschäftigtenzahlen auswirken wird, hängt nicht zuletzt von der Gestaltung unseres Berufsbildungssystems und der Weiterentwicklung der entsprechenden Berufsbilder ab. Sofern es gelingt, Beschäftigte aus ihren bestehenden Berufen heraus für die neuen Technologien weiterzuqualifizieren, wird es auch möglich sein, sie im Beschäftigungssystem der Zukunft in Arbeit zu hal-

¹⁶⁵ Marschall & Steinberger, 2015.

¹⁶⁶ Atasoy, 2013; Atasoy, Banker & Pavlou, 2016.

ten. Daher sollten Unternehmen mithilfe betrieblicher Weiterbildungsmaßnahmen und individueller Förderung das lebenslange Lernen ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter unterstützen.

Die Bemühungen der Sozialpartner, bestehende Berufsbilder um technologische Kompetenzen zur Handhabung additiver Verfahren zu erweitern, sind als wesentlicher Beitrag zum Erhalt des Qualifikationsniveaus der Beschäftigten zu sehen. Eine Einführung neuer, spezifisch angepasster Berufsprofile bei gleichzeitiger Stagnation der Qualifizierung in traditionellen Berufen würde mittelfristig hingegen zu einer umfangreichen Dequalifizierung der Arbeitnehmerschaft der traditionellen Berufe führen.

Sollen im Bereich der Additiven Fertigung zusätzlich neue Berufe etabliert werden, ist es zudem wichtig, bereits im Vorfeld über deren Einordnung in bestehende Unternehmensstrukturen nachzudenken und dabei auch bisherige Erfahrungen zu berücksichtigen. So wird das Berufsbild der Produktionstechnologie – dessen Ausbildung explizit auch die Handhabung additiver Fertigungsverfahren umfasst und das speziell für die Anforderungen der Industrie 4.0 konzipiert wurde – von Unternehmensseite bislang kaum nachgefragt. Zur Begründung werden zum einen die hohen Anforderungen im Vergleich zu anderen gewerblich-technischen Ausbildungsberufen angeführt, die Auszubildende überfordern würden, zum anderen die Konkurrenz zu akademisch ausgebildeten Arbeitskräften, die in der Regel vorgezogen würden. Darüber hinaus sei das Berufsbild zu eng gefasst und biete weder die erforderliche Kompetenz noch den nötigen Tiefgang.¹⁶⁷

5.2.6.4 Fachkräftegewinnung

Unternehmen gewinnen Fachkräfte, indem sie diese entweder selbst qualifizieren – sei es durch Aus- und Weiterbildung oder

durch „Learning by Doing“ am Arbeitsplatz –, indem sie entsprechendes Personal auf dem regulären Arbeitsmarkt rekrutieren oder qualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter anderer Unternehmen abwerben. Die Verfügbarkeit von Fachkräften hängt dabei vor allem vom regionalen Umfeld ab, also davon, wie viele potenzielle Fachkräfte in der Region tatsächlich präsent sind. Die Konkurrenz wirtschaftlich starker Branchen, die höhere Löhne anbieten oder ein höheres Maß an Arbeitsplatzsicherheit vermitteln, kann die Rekrutierung qualifizierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter oder Auszubildender zudem spürbar erschweren.¹⁶⁸ Gegenläufige Entwicklungen (z. B. bei Schließung von Produktionsstätten) können den verfügbaren Fachkräftepool hingegen deutlich vergrößern. Zudem gibt es für Unternehmen, die neben der Additiven Fertigung nach wie vor auch eine konventionelle Produktionsweise praktizieren, die Möglichkeit, geeignetes Ausbildungs- und Fachpersonal aus der konventionellen Fertigung zu übernehmen oder in einem der Berufe auszubilden, in deren Lehrplan additive Fertigungsverfahren bereits integriert sind (z. B. im Modellbau oder beim Produktdesign).

Solche Unternehmen, die bislang keine eigenen Ausbildungsplätze anbieten, weil ihr Tätigkeitsspektrum nur wenig spezifische Anwendungsmöglichkeiten für ein solches Berufsprofil bietet, können erwägen, ob eine Ausbildung in einem der neu eingeführten Industrie-4.0-nahen Berufe (z. B. Technisches Produktdesign) zu ihrem Aufgabenspektrum passen würde. Eine entsprechende Ausbildung ließe sich dann möglicherweise im Verbund mit anderen Unternehmen, vielleicht auch unter Einbeziehung einer überbetrieblichen Ausbildungsstätte anbieten.

5.2.7 Arbeits- und Gesundheitsschutz

Da das Ausgangsmaterial für zahlreiche additive Fertigungsverfahren in Pulver-

¹⁶⁷ Pfeiffer et al., 2016.

¹⁶⁸ Marschall, 2016.



Abbildung 11: Sicherheitsvorkehrungen zum Umgang mit Pulvern in der additiven Fertigung (Bildquelle: Max Planck Institut für Eisenforschung, Düsseldorf).

form vorliegen muss, ergeben sich erhöhte Anforderungen an den Arbeitsschutz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die entsprechende Fertigungsmaschinen beschicken, bedienen und reinigen. Kritisch ist in diesem Zusammenhang der kaum zu vermeidende und teilweise nicht dokumentierte Feinstaubanteil bei Pulvern, die für Pulverbett-Verfahren verwendet werden (Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$). Die einschlägigen Richtlinien empfehlen eine Abtrennung des Feinanteils, was neben dem Gesundheitsschutz auch dem Explosionsschutz dient und zudem die Pulverfließfähigkeit verbessert. Dabei ist es dringend geboten, geschlossene, teilautomatisierte Fraktionierungsapparaturen zu verwenden. Einige Maschinenhersteller bieten solche Systeme bereits an. Jedoch gehen die Anforderungen an den Atem-, den Brand- und Explosionsschutz nicht über das in vielen Industriebetrieben bereits bekannte und handhabbare Maß hinaus.¹⁶⁹

Um in Zukunft eine sichere Produktion auf Grundlage additiver Fertigungstechnologien zu ermöglichen, werden gegenwärtig sowohl von der American Society for Testing and Materials (ASTM) als auch von der International Organization for Standardization (ISO) entsprechende Standards entwickelt. Zudem hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) bereits die Richtlinie 3405 für Prozesse und Anwendersicherheit in der Additiven Fertigung veröffentlicht,¹⁷⁰ während mit dem von der Europäischen Union geförderten Projekt „Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing“ (SASAM) ein Aktionsplan für die Standardisierung im Bereich der Additiven Fertigung formuliert wurde.¹⁷¹ Darüber hinaus beschäftigen sich weitere Institutionen wie die Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN),¹⁷² die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG

¹⁷⁰ VDI, 2018b; VDI, i. E. (Letzteres befand sich zum Zeitpunkt der Textredaktion (Oktober 2019) noch im Entwurfsstadium.

¹⁷¹ Rübenach & Käfer, 2017.

¹⁷² Mattiuzzo, 2016.

¹⁶⁹ Holdich, 2002; Khambekar & Pittenger, 2013.

EITEM),¹⁷⁴ das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)¹⁷⁵ und die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)¹⁷⁶ mit verschiedenen Aspekten der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes im Zusammenhang mit additiven Fertigungsverfahren.

Neben dem Risiko einer Gesundheitsgefährdung von Arbeitnehmerinnen und -nehmern versprechen additive Fertigungsverfahren allerdings auch Verbesserungen im Sinne des Arbeitsschutzes. Ähnlich wie beim Einsatz von Produktionsrobotern können mithilfe additiver Fertigungsverfahren Bauteile so hergestellt werden, dass der Einsatz menschlicher Arbeitskräfte in gefährlicher Umgebung reduziert oder ganz vermieden wird. Ein Beispiel dafür

stellt die additive Herstellung von komplexen Tragwerken bzw. Bauwerken dar, die vielfach mit Gefahren (unfallträchtigem Arbeiten in unzugänglichen oder hohen Bereichen, teilweise mit Todesfällen) verbunden ist, die es zu verhindern gilt.

Ein Aspekt, der für den Arbeits- und Gesundheitsschutz im Rahmen additiver Herstellungsprozesse eine zunehmend wichtigere Rolle spielt, betrifft zusätzliche Einsätze von Personal am Wochenende sowie die Bereithaltung von Mitarbeitenden in Rufbereitschaft. Beides ist durch die langen Laufzeiten der Fertigungsanlagen bedingt und macht es aus Rationalisierungsgründen erforderlich, dass auch zu gewöhnlich für Freizeitaktivitäten reservierten Zeiten Produktionsabläufe angestoßen werden.

5.2.8 Empfehlungen zur Anpassung der Arbeitswelt an die Anforderungen der Additiven Fertigung

Die Anforderungen der Additiven Fertigung und ihre Auswirkungen auf Arbeitsprozesse stärker in Berufsausbildung und Weiterbildung abbilden:

Sollen additive Fertigungstechnologien flächendeckend Einzug in die industrielle Fertigung, das Bauwesen und relevante Bereiche des Handwerks halten, ist es erforderlich, die wissenschaftliche Aus- und Weiterbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren, aber auch die Berufsausbildung von Facharbeiterinnen und -arbeitern entsprechend anzupassen. Ziel sollte es sein, den Studierenden und Auszubildenden ein grundlegendes Bewusstsein zum Umgang mit den Möglichkeiten und Anforderungen additiver Technologien zu entwickeln, auch wenn diese sich erst in einem frühen Stadium ihrer Entwicklung befinden. Neben der obligatorisch zu vermittelnden Handhabung additiver Fertigungsverfahren ist im Rahmen der Ausbildung auch darauf einzugehen, wie sich diese auf den Ablauf der gesamten Produktionsprozesse und die übergeordneten Organisationsstrukturen auswirken und welche Anpassungsanforderungen sich hieraus ergeben.

Voraussetzung hierfür sind weiterführende betriebssoziologische Untersuchungen, die eine personalorientierte Ergänzung zu den technologischen Entwicklungen bilden würden.¹⁷⁷ Auf diese Weise könnten die konkreten Anforderungen an die Beschäftigten, die sich aus der Integration additiver Fertigungstechnologien in Unternehmen im Hinblick auf Arbeitsorganisation, Arbeitsbedingungen, Arbeitszeitmodelle etc. ergeben, ermittelt werden.

173 BG ETEM, 2018.

174 Beispielsweise unter IFA, o. J.

175 Schmauder et al., 2018.

176 Ein Beispiel für ein solches Forschungsvorhaben stellt das Projekt „Integration additiver Herstellverfahren in die industrielle Prozess-, Fertigungs- und IT-Kette (PROFiT)“ dar: „PROFiT Projekt“, 2017.

Additive Fertigung in Ausbildungsformate des fertigen Handwerks integrieren

Für die Stärkung der Innovationsfähigkeit des Handwerks in Deutschland ist es erforderlich, den Umgang mit additiven Fertigungstechnologien nicht nur optional als Zusatzqualifikation anzubieten, sondern in sämtlichen Ausbildungsformaten, in denen die Entwicklung realer physischer Objekte eine Rolle spielt, hinreichend zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sind sowohl die Grundprinzipien der Additiven Fertigung als auch die Bandbreite ihrer Einsatzmöglichkeiten zu vermitteln.

Im Falle bereits bestehender Berufsprofile, die mit der Produktion von materiellen Gegenständen zu tun haben und modernisiert werden müssen, sollte Grundlagenwissen zur Additiven Fertigung und zu ihren verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten nicht nur als Zusatzqualifikation, sondern als Querschnittskompetenz in die Rahmenlehrpläne aufgenommen werden. Außerdem sollte das Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), das im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in der Vergangenheit bereits den Modernisierungsbedarf der vier dualen IT-Ausbildungsberufe analysiert hat,¹⁷⁸ nun eine berufsübergreifende Untersuchung zu den ausbildungsspezifischen Integrationsperspektiven der Additiven Fertigung durchführen. Dabei ist insbesondere die Frage zu klären, in welcher Weise Kompetenzen zum Umgang mit additiven Fertigungstechnologien in die Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrpläne zukünftig zu modernisierender Berufe einbezogen werden können. Sofern sich in diesem Zusammenhang herausstellen sollte, dass für eine adäquate Anwendung entsprechender Technologien neue Berufsbilder etabliert werden müssen, wäre deren Einordnung in bestehende Unternehmensstrukturen zu berücksichtigen.

Berufliche Schulen und Unternehmen stärker vernetzen

Die für Aus- und Weiterbildung zuständigen Landesministerien sollten Kooperationen zwischen beruflichen Schulen und Unternehmen sowie entsprechende Projekte auf lokaler Ebene fördern, um den Erwerb von Wissen zur Additiven Fertigung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung zu erleichtern. Unternehmen spielen dabei eine wichtige Rolle, da sie Schulen Zugang zu technologischem Know-how und Equipment bieten können. Umgekehrt profitieren so auch die Unternehmen, weil ihre Auszubildenden im schulischen Rahmen auf diese Ausstattung und Expertise zurückgreifen können. Zudem ermöglicht die Zusammenarbeit mit der entsprechenden Ausbildungseinrichtung den Unternehmen, ihre anwendungsbezogenen Anforderungen an Lehrinhalte an die Schulen zu vermitteln. Allerdings sollten Unternehmen mithilfe geeigneter Weiterbildungsmaßnahmen auch im eigenen Betrieb die Kompetenzen ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zur Handhabung additiver Fertigungsverfahren stärken. Auch Verbände sollten zudem Ausbildungsverbände verschiedener Unternehmen fördern. Auf diese Weise wäre die Vermittlung additiver Technologien auch für solche Auszubildenden sicherzustellen, deren Ausbildungsstätte keine Anwendungsmöglichkeit bietet, weil sie selbst keine additiven Fertigungsanlagen betreibt. Entsprechende Ausbildungsverbände könnten daher dazu beitragen, den Pool an verfügbaren Fachkräften in Deutschland mittelfristig zu vergrößern.

Bestehende Angebote besser zugänglich machen

Es bestehen zwar bereits vielfältige Möglichkeiten der Aus- und Weiterbildung in verschiedenen Anwendungsfeldern der Additiven Fertigung, allerdings ist ihre Existenz nach wie vor nicht hinreichend bekannt. Damit Studieninteressentinnen und -interessenten sowie

¹⁷⁷ Schwarz et al., 2016.

Unternehmen Orientierung erhalten, sollten daher Maßnahmen getroffen werden, um über Bildungsangebote zur Additiven Fertigung an Hochschulen und Universitäten und die entsprechenden Qualifizierungserfordernisse zu informieren. Dies kann beispielsweise durch den Aufbau einer bundesweiten Datenbank mit den entsprechenden Informationen erfolgen. Es wäre außerdem eine wichtige Aufgabe für die Fachverbände, in Kooperation mit den Sozialpartnern, den Kammern (Deutscher Industrie- und Handelskammertag, DIHK, und Deutscher Handwerkskammertag, DHKT), der Kultusministerkonferenz und dem Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) verbindliche Standards für die Qualifizierung im Bereich der Additiven Fertigung zu entwickeln.

Additive Fertigungsverfahren in der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung berücksichtigen

Die Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt für additive Fertigungstechnologien sind zurzeit sehr dynamisch.¹⁷⁹ Allerdings wird diese Dynamik in den Modellen und Prognosen der Wirtschafts- und Arbeitsmarktforschung nur unzureichend berücksichtigt, da in diesen Modellen die additive Fertigung zumeist noch nicht als eigene Kategorie erfasst und somit eine veraltete Branchen- und Berufsstruktur fortgeschrieben wird.¹⁸⁰

Die beteiligten Institute und Behörden, beispielsweise das Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), das Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) oder das Statistische Bundesamt (Destatis), sind deshalb aufgefordert, ihre Analyseinstrumente und Modelle so zu erweitern, dass Entwicklungen im Bereich der Additiven Fertigung präzise und zeitnah erfasst werden können, um auf Grundlage entsprechender Ergebnisse dann im Anschluss möglichst treffsichere Prognosen erstellen zu können.

5.3 Nachhaltigkeit der Technologie

5.3.1 Energie- und Materialbedarf der Produkte Additiver Fertigung über ihren gesamten Lebenszyklus

Additiven Fertigungsverfahren wird gemeinhin eine besonders gute Ökobilanz bescheinigt, da Bauteile mit ihrer Hilfe endkonturnah herzustellen sind. Das bedeutet, dass bei der Produktion kein oder nur wenig Abfall entsteht, wie dies etwa beim Drehen oder Fräsen in Form von Spänen der Fall wäre. Diese hervorragende Effizienz bei der Materialausnutzung ist ein Grund für das rege Interesse der Luft- und Raumfahrt an additiven Technologien, weil dort vielfach teure Werkstoffe

zum Einsatz kommen, die in der Herstellung energie- und emissionsintensiv sind (z. B. Titanlegierungen). Bei der Herstellung leichter und filigraner Bauteile werden mittels subtraktiver Bearbeitungsverfahren in der Regel über 90 Prozent des Materials entfernt. Man spricht dann von einem ungünstigen Buy-to-fly-Verhältnis. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren führt hingegen zu einer deutlichen Verbesserung dieses Verhältnisses. So wird zum einen nur dort Material eingesetzt, wo es im Bauteil auch tatsächlich benötigt wird. Zum anderen ist es möglich, überschüssiges Material, wie es u. a. beim SLM-Verfahren im Pulverbett anfällt, relativ einfach aufzubereiten und wiederzuverwenden.¹⁸⁰ In der Additiven Fertigung wird zudem anders als in der spanenden Bearbeitung kein Kühlschmiermittel eingesetzt, das in der Gesamtökobilanz der subtraktiven Fertigungsverfahren hingegen eine große Rolle spielt.¹⁸¹

¹⁷⁸ Stettes, 2018.

¹⁷⁹ So kommen additive Fertigungsverfahren in einer Prognose des IAB beispielsweise überhaupt nicht vor (Zika et al., 2019). Das Statistische Bundesamt hat dagegen 2018 begonnen, im Rahmen der jährlichen Erhebung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Unternehmen auch die Nutzung von 3D-Druck zu erfassen (Statistisches Bundesamt (2018) und berücksichtigt in der monatlichen Produktionserhebung die Herstellung von 3D-Druckern.

¹⁸⁰ Ford & Despeisse, 2016.

¹⁸¹ Faludi et al., 2015; S. H. Huang et al., 2013.

Ein weiterer Vorteil der Additiven Fertigung besteht in dem – zumindest theoretisch – geringeren Energieaufwand bei Transport und Logistik der fertigen Produkte. Da die Produktion mit additiven Fertigungsverfahren dezentral durchgeführt werden kann, lassen sich entsprechende Bauteile in unmittelbarer Nähe ihres Einsatzortes herstellen.¹⁸² Gegenwärtig sind solche dezentralen Fertigungseinrichtungen allerdings noch die Ausnahme.

Darüber hinaus können sich Energieeinsparungen auch während der Verwendung additiv gefertigter Bauteile ergeben. Die ausgeprägte geometrische Freiheit im Rahmen additiver Fertigungsprozesse ermöglicht es, Bauteile leichter zu konstruieren und damit beispielsweise die Effizienz der Flug- und Fahrzeuge, in denen sie verbaut sind, zu steigern.¹⁸³ In der Recyclingphase wirkt sich außerdem positiv aus, dass additiv gefertigte Bauteile bislang vorwiegend aus einem einzigen Material bestehen und sich aus diesem Grund vergleichsweise gut recyceln lassen. Außerdem erleichtert die Tatsache, dass viele Einzelteile durch ein einziges additiv hergestelltes Bauteil ersetzt werden können, die Wiederverwertung am Ende der Lebensdauer. Schließlich werden additive Technologien auch zur Reparatur von Komponenten verwendet, womit sich ebenfalls Einsparungen erzielen lassen, da Bauteile nicht komplett ersetzt, sondern lediglich erneuert werden müssen.¹⁸⁴

Ob sich all die genannten Vorteile der Additiven Fertigung in einer ganzheitlichen Betrachtung des Energie- und Materialbedarfs über die gesamte Lebensdauer eines Bauteils hinweg tatsächlich positiv auswirken, ist allerdings nicht einfach zu beantworten,¹⁸⁵ denn es sind in diesem

Zusammenhang auch kritische Aspekte zu berücksichtigen. So müssen Rohstoffe für die Additive Fertigung zunächst in eine geeignete Form – also in Pulver- oder Drahtform – gebracht werden, was den zusätzlichen Einsatz von Energie und Material erfordert, beispielsweise von Edelgas zur Verdüsung von Metallpulvern. Zudem müssen die Rohstoffe von ihrer Gewinnung zur Aufbereitung für die Additive Fertigung bis zu ihrem Einsatz in der Fertigungsanlage ggf. mehrfach transportiert werden.¹⁸⁶

Außerdem ist der Energiebedarf bei der Additiven Fertigung mit Polymeren höher als bei der Fertigung eines vergleichbaren Bauteils mit konventionellen Methoden, beispielsweise mittels Kunststoffspritzguss. Da mithilfe additiver Fertigungsverfahren allerdings filigranere oder hohle Bauteile hergestellt werden können, kann das Ergebnis am Ende dennoch zugunsten additiver Technologien ausfallen. Die Gesamtenergiebilanz hängt aber von vielen weiteren Faktoren ab, etwa von der Beladung der Bauplattform im SLS-Prozess oder der Gesamtauslastung der Fertigungsmaschine.¹⁸⁷ Wenn bei der Herstellung zudem ein Material mit höherem Energiebedarf verwendet wird als bei konventioneller Fertigung – beispielsweise Holz durch Kunststoff ersetzt wird –, kann das die Energiebilanz der additiven Technologien wiederum verschlechtern.¹⁸⁸

Schließlich ist festzustellen, dass der oben beschriebenen Wiederverwertung von Pulverwerkstoffen (Metalle und Kunststoffe) gegenwärtig noch enge Grenzen gesetzt sind, da sich das Material im Laufe mehrerer Prozesszyklen nach und nach mit Sauerstoff aus der Prozessatmosphäre anreichert und somit verunreinigt wird. Eine solche Verunreinigung mit Sauerstoff kann sich bei bestimmten Werk-

¹⁸² Khajavi, Partanen & Holmström, 2014.

¹⁸³ R. Huang et al., 2016.

¹⁸⁴ Ford & Despeisse, 2016; Khajavi, Partanen & Holmström, 2014.

¹⁸⁵ S. H. Huang et al., 2013.

¹⁸⁶ Kellens et al., 2017.

¹⁸⁷ Faludi et al., 2015; Kreiger & Pearce, 2013.

¹⁸⁸ Stahl, 2013.

stoffen (z. B. Titanlegierungen) negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken.¹⁹⁰ Bei Polymerpulvern sind so beispielsweise Neupulverzugaben von bis zu 50 Prozent des ursprünglichen Pulvervolumens erforderlich. Die Optimierung von Maschinen oder Produktionsorganisation und die Entwicklung von Werkstoffen, die toleranter gegenüber Wärmelast und Sauerstoffverunreinigung sind, können das Recycling im Bereich der Additiven Fertigung zukünftig effizienter machen. Falls künftig allerdings zunehmend Multimaterial-3D-Druck-Technologien eingesetzt werden sollten, wird das negative Auswirkungen auf die Wiederverwertbarkeit additiv gefertigter Materialien haben.

Es besteht bislang kein Konsens darüber, ob additive Fertigungsverfahren hinsichtlich ihres Energie- und Materialverbrauchs insgesamt besser oder schlechter abschneiden als konventionelle Produktio-

nsverfahren. Allerdings existieren bereits erste Modelle zur Vorhersage der Nachhaltigkeit bei der Fertigung bestimmter Komponenten.¹⁹¹ Dabei ist es auch möglich, dass Kombinationen von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren mit Blick auf die Energiebilanz zu optimalen Ergebnissen führen.¹⁹² Gegenwärtig ist der weltweite Markt für additiv hergestellte Produkte aber noch zu klein, um über einzelne Fallstudien hinaus allgemeingültige Aussagen zur Nachhaltigkeit der additiven Technologien treffen zu können.

Die in der Additiven Fertigung eingesetzten Werkstoffe entsprechen heute größtenteils denen der konventionellen Fertigungsverfahren (siehe Kap. 3.3). Deshalb ergeben sich mit Blick auf die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe aktuell keine Bedenken, die über die bekannten (z. B. Knappheit Seltener Erden als Legierungselemente) hinausgehen würden.

5.3.2 Handlungsempfehlungen zum nachhaltigen Einsatz additiver Fertigungstechnologien

Die Additive Fertigung hat das Potenzial, durch geringeren Energie- und Materialeinsatz sowie weniger Ausschuss in der Produktion die Umwelt zu entlasten. Wie groß dieser Effekt im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren insgesamt sein wird, ist gegenwärtig noch unklar. Es ist allerdings wahrscheinlich, dass sich keine allgemeine Bilanz des Einsparpotenzials additiver Technologien ziehen lassen wird. Stattdessen müssen voraussichtlich für jeden Einsatzbereich und möglicherweise für jede Bauteilart gesonderte Betrachtungen angestellt werden. Dabei ist allerdings nicht nur der eigentliche additive Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Vielmehr müssen sämtliche vor- und nachgelagerten Prozess- und Transportschritte analysiert und mit konventionellen Prozessketten verglichen werden.

Es gibt innerhalb der Prozesskette der gegenwärtig bekannten additiven Fertigungsverfahren keine neuen, bislang unbekanntes Gefahrstoffe für Umwelt, Personal oder Verbraucherinnen und Verbraucher. Selbstverständlich ist allerdings auf eine sorgfältige Einhaltung der bestehenden Umwelt- und Arbeitsschutzvorschriften zu achten, was beispielsweise die Verwendung von Materialien wie Metall- oder Kunststoffpulver sowie Kunstharze und Säuren zum Entbindern von gedruckten Kunststoff-Grünkörpern betrifft.¹⁹³ Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang auch der populärer werdende Einsatz von potenziell umweltschädlichen Chemikalien im Heim-3D-Druck (z. B. lösliche Supportmaterialien, Rohstoffe für Stereolitho-

¹⁸⁹ Tang et al., 2015.

¹⁹⁰ Beispielsweise Bourhis et al., 2013; Priarone & Ingarao, 2017.

¹⁹¹ Le, Paris & Mandil, 2017.

¹⁹² Faludi et al., 2015.

grafie). Hier ist zunächst vor allem auf eine frühe und grundsätzliche Aufklärung von Verbraucherinnen und Verbrauchern zu achten. Für die zukünftige Anwendungspraxis ist zudem ein unbedenklicher Ersatz zu entwickeln.

Mit Blick auf eine mögliche Umweltbelastung durch additive Fertigungsverfahren wird gegenwärtig auch der schädliche Eintrag feiner Kunststoffpartikel in Meere, Fließ- und Stillgewässer diskutiert.¹⁹⁴ Die gut dokumentierten Materialflüsse in der industriell betriebenen Additiven Fertigung bieten in diesem Zusammenhang allerdings keinen Grund für besondere Besorgnis.

Um die Einführung additiver Fertigungsverfahren nachhaltig gestalten und potenzielle Vorteile für die Umwelt optimal nutzen zu können, empfehlen die Akademien die folgenden Maßnahmen:

Daten zu Energie- und Materialverbrauch additiver Verfahren erfassen

Der tatsächliche Energie- und Materialverbrauch, der mit der Herstellung und Verwendung eines additiv gefertigten Bauteils über dessen gesamten Lebenszyklus verbunden ist, sollte weiterhin erforscht werden. Wie oben bereits dargestellt, ist bislang nicht eindeutig zu bestimmen, ob die Additive Fertigung tatsächlich so ressourcenschonend arbeitet, wie oft behauptet wird. Daher ist eine ganzheitliche Analyse des Energieverbrauchs sorgfältig und für den gesamten Produktlebenszyklus durchzuführen, wobei individuelle Prozesse, Bauteile und Anwendungen detailliert zu berücksichtigen sind. Zu diesem Zweck sollten Anreize dafür geschaffen werden, dass Forschung und Industrie die Daten zum Verbrauch additiver Verfahren in ihrem jeweiligen Kontext erfassen und zur weiteren Auswertung sowie für Vergleichsanalysen zur Verfügung stellen. Dabei sollte die ökologische Bilanz der Additiven Fertigung nicht nur mit der konventionellen Verarbeitung gleicher Materialien, sondern auch mit der Herstellung von Produkten aus natürlichen Rohstoffen (z. B. Holz, Bambus, Baumwolle oder Keramik) verglichen werden.¹⁹⁵

Ressourcenschonung bei der Planung des additiven Fertigungsprozesses berücksichtigen

Auf Grundlage der entsprechenden Lebenszyklusanalysen sollten die Konstruktionsrichtlinien für die Additive Fertigung so angepasst werden, dass das Prinzip der Ressourcenschonung hinreichend Berücksichtigung findet. Zudem sollten Kriterien für die Auswahl der nachhaltigsten Fertigungstechnologien für die verschiedenen Anwendungsfelder der Additiven Fertigung erarbeitet werden.

Bestehende Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen auf additive Fertigungsverfahren ausweiten

Über die Einhaltung bestehender Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen hinaus (siehe Kap. 5.2.7), sollten geschlossene Materialkreisläufe für alle im Kontext der Additiven Fertigung verwendeten Gefahrstoffe Standard werden. Auf die strikte Umsetzung der Vorgaben zum Umwelt- und Arbeitsschutz ist insbesondere in solchen Bereichen besonders zu achten, in denen die additive Fertigung neu etabliert wird.

¹⁹³ Cole et al., 2011.

¹⁹⁴ May, Stahl & Taisch, 2016.

6 Anhang

Regulatorische Aspekte

Additive Fertigungsverfahren werden in vielen Bereichen der Produktion, der Wartung und des Vertriebs zur Etablierung neuer Prozess- und Verfahrensketten führen. Dies hat zur Folge, dass auch juristische Fragen, die in diesen Bereichen auftreten, neu bewertet werden müssen. Im Wesentlichen betrifft dies Fragestellungen im Hinblick auf das geistige Eigentum, haftungs- und kartellrechtliche Fragen. Um mit diesen neuen Konstellationen umzugehen, bedarf es neuer rechtlichen Regelungen, innerhalb der gegebenen rechtlichen Rahmenbedingungen finden sich alle hierfür notwendigen Instrumente. Allerdings ist noch nicht ganz klar abzusehen, wie diese in konkreten Fällen auszulegen sind. Hierfür bedarf es der Verhandlung von Präzedenzfällen, auf deren Grundlage sich eine gängige Rechtspraxis etablieren wird. Im Folgenden wird eine rechtliche Einordnung immaterialgüterrechtlicher Fragen in Bezug auf additive Fertigungsverfahren aus zwei entgegengesetzten rechtlichen Perspektiven unternommen.

A Immaterialgüterrecht (R. M. Hilty)

A.1 Ausgangslage

Im Hinblick auf Immaterialgüterrechte – also namentlich Patent-, Urheber-, Design- oder Markenrechte – lassen sich zwei grundsätzliche Konstellationen unterscheiden:

Entweder liegen **Rechte** an etwas **Vorbestehendem** bei einem **Dritten** als **Rechteinhaber**. Dabei können sich

Rechte an Vorbestehendem auf den **Gegenstand** selbst beziehen, der nachgebaut wird. Durch Additive Fertigung mag aber auch etwas bislang noch nicht Existierendes hergestellt werden; auch diese Herstellung wird jedoch – ähnlich dem konventionellen Bau eines Gegenstandes nach einem technischen Plan – auf der Basis einer Art „**Anleitung**“ erfolgen, die ihrerseits Rechtsschutz genießen kann. Wird dieses Vorbestehende – sei es der Gegenstand selbst, sei es die „Anleitung“ – im Rahmen einer Additiven Fertigung ohne Autorisierung durch den Rechteinhaber verwendet, stellt sich die Frage, ob dadurch eine Rechtsverletzung begründet wird.

Oder es liegen **Rechte** bei jener **Partei**, die die **Additive Fertigung** vornimmt. Diese Rechte können sich wiederum einerseits auf den **Gegenstand** als solchen beziehen, der hergestellt wird, sofern die dafür erforderlichen Schutzvoraussetzungen erfüllt werden. Aber auch an der „**Anleitung**“, die die Grundlage der Additiven Fertigung bildet, können Rechte bestehen. Verwendet ein Dritter ohne Autorisierung durch den Rechteinhaber entweder den Gegenstand selbst, der im Rahmen einer Additiven Fertigung hergestellt worden ist, oder verwendet er eine entsprechende „Anleitung“ dazu, stellt sich ebenfalls die Frage der Rechtsverletzung.

A.2 Übernahme eines vorbestehenden Gegenstandes

A.2.1 Patentrecht, Gebrauchsmusterrecht

Ein vorbestehender Gegenstand kann mehreren Schutzrechten unterliegen. Bezogen auf das **Patentrecht** kann insbesondere ein **Erzeugnispatent** vorlie-

gen, z. B. eine bestimmte **Vorrichtung**; durch das Patentrecht ist dessen technische Funktionalität geschützt. Denkbar wäre etwa ein bestimmtes Profil, das dann patentierbar ist, wenn es gegenüber dem bisherigen Stand der Technik neu und für den Fachmann auf dem betreffenden Gebiet zum Zeitpunkt der Patentanmeldung nicht naheliegend war (Art. 27 TRIPS; Art. 54 EPÜ; § 4 PatG). Wird ein patentgeschütztes Erzeugnis ohne Erlaubnis des Rechteinhabers nachgebaut, verletzt dies das Patent; aus patentrechtlicher Sicht spielt dabei keine Rolle, wie genau der Nachbau erfolgt – also z. B. mit traditionell mechanischen Werkzeugen oder eben mit Additiver Fertigung.

Erzeugnispatente können sich aber auch auf das Material beziehen, d. h., geschützt werden kann das, was im Patentrecht in der Regel „Stoff“ genannt wird, wiederum unter der Voraussetzung, dass jener bei Anmeldung gegenüber dem Stand der Technik neu und nicht naheliegend war. Wie der Stoff hergestellt wird, spielt abermals keine Rolle; eignet sich Additive Fertigung also dazu, einen Stoff so herzustellen, wie er patentiert ist, verletzt mangels Erlaubnis des Rechteinhabers auch dies das Patent.

Die zweite große Kategorie stellen **Verfahrenspatente** dar; primär geschützt ist hier die Art und Weise, wie etwas hergestellt wird, mit der Besonderheit, dass die sogenannten „unmittelbaren Verfahrenserzeugnisse“ vom Schutz des betreffenden Verfahrenspatents miterfasst sind (Art. 28 Nr. 1 Bst. b TRIPS; Art. 64 Abs. 2 EPÜ; § 9 Nr. 3 PatG). Wichtig ist diese Schutzerweiterung namentlich bei der Arzneimittelherstellung. Gegenüber Verfahren, die auf traditionellen Technologien beruhen, stellt die Additive Fertigung damit eine interessante Option dar. Denn erlaubt sie, den gleichen Gegenstand mit alternativen Verfahren herzustellen, wird damit das Verfahrenspatent eines Dritten nicht verletzt.

Bezieht sich das Schutzrecht auf einen vorbestehenden Gegenstand an sich (geht es also um ein **Erzeugnispatent**) und wird dieser Gegenstand mittels eines 3D-Scanners dergestalt vermessen, dass dadurch die Daten generiert werden, die erforderlich sind, um den Drucker im Rahmen der Additiven Fertigung dieses Gegenstandes steuern zu können, so sieht die ganz herrschende Ansicht darin noch keine Rechtsverletzung, sondern eine bloße Vorbereitungshandlung. Mit anderen Worten greift das Schutzrecht erst gegen die eigentliche Herstellung des Erzeugnisses. Werden die so generierten Daten jedoch weitergegeben, um einem Dritten die Additive Fertigung eines entsprechenden Gegenstandes zu ermöglichen, so sieht ein Teil der Lehre darin einen Akt der mittelbaren Patentverletzung. Dieser Ansatz setzt freilich voraus, dass man die in § 10 PatG genannten „Mittel, die sich auf ein wesentliches Element der Erfindung beziehen“ dahingehend weit fasst, dass darunter auch unkörperliche Gegenstände fallen können.

Der Vollständigkeit halber zu ergänzen ist, dass in gewissen Ländern auch **Gebrauchsmusterrechte** erworben werden können, die jedoch national unterschiedlich ausgestaltet sind. Daraus kann sich eine mehr oder weniger weitreichende Überschneidung mit dem Patentrecht ergeben. In Deutschland hat der Bundesgerichtshof (BGH) mit Beschluss vom 20. Juni 2006 (X ZB 27/05) entschieden, für beide Schutzrechte seien die Schutzvoraussetzungen gleich zu interpretieren. Damit besteht der Unterschied hierzulande – nebst kürzerer Schutzdauer für Gebrauchsmusterrechte – namentlich noch darin, dass Verfahren vom Gebrauchsmusterschutz ausgeschlossen sind (§ 2 Nr. 3 GebrMG).

A.2.2 Urheberrecht, Designrecht

Der mittels Additiver Fertigung hergestellte Gegenstand kann auch vom **Urheber-**

rechtsschutz erfasst sein. Typischerweise wird es um Werke der Bildenden Kunst oder der Angewandten Kunst gehen, wobei die Abgrenzung unterschiedlicher Werkkategorien (§ 2 UrhG) vorliegend keine Rolle spielt; denn vom Schutz erfasst ist in jedem Fall stets – nur – die (ästhetische) Ausdrucks- bzw. Erscheinungsweise des Gegenstandes. Wird von diesem eine Kopie hergestellt, ist es irrelevant, welche Technik dafür verwendet wird; damit kann der Rechteinhaber auch einen Nachbau unter Einsatz der Additiven Fertigung untersagen. Ebenso spielt es keine Rolle, wenn andere Materialien verwendet werden, solange der ästhetische Gesamteindruck übernommen wird.

Ähnliches gilt für das **Designrecht**, wo es ebenfalls definitionsgemäß nicht um den Schutz einer technischen Funktionalität geht, sondern um jenen der Eigenart der Gestaltung. Die Abgrenzung zwischen Urheber- und Designrecht beschäftigt die Praxis seit jeher, und sie wird auch nicht in allen Rechtsordnungen gleich gesehen (für Deutschland grundlegend: BGH vom 13. November 2013, I ZR 143/12). Für den Einsatz Additiver Fertigung ist dies aber unerheblich; was dem einen oder dem anderen Rechtsschutz unterliegt, darf ohne Einwilligung des Rechteinhabers ungeachtet der verwendeten Technologie nicht nachgebaut werden.

Das **Einscannen** eines urheberrechtlich geschützten Gegenstandes ist bereits als solches als Vervielfältigungshandlung zu werten. Dass dieses Einscannen dem Zwecke der späteren Reproduktion dient, spielt keine Rolle, d. h., sowohl diese Vorbereitungshandlung für die Additive Fertigung als auch jene selbst stellen je für sich eine Rechtsverletzung dar, falls sie ohne Einwilligung des Rechteinhabers erfolgen. Auch die Weitergabe solcher Daten an Dritte stellt eine Rechtsverletzung dar, sei dies im Sinne einer Verbreitung, falls ein Träger übergeben wird, oder sei es als öffentliche Zugänglichmachung, falls Da-

ten über Internet verfügbar gemacht werden (z. B. im Rahmen von Tauschbörsen).

A.2.3 Markenrecht

Das **Markenrecht** erfasst – knapp ausgedrückt – die „kennzeichenmäßige“ Verwendung des geschützten Zeichens, welches nicht nur zwei-, sondern auch dreidimensional sein kann. Insoweit liegen die Dinge bei der Additiven Fertigung ähnlich wie bei der Reproduktion eines geschützten grafischen Kennzeichens durch einen normalen Drucker. Dieser Druck an sich ist nicht untersagt, sondern entscheidend ist, was damit gemacht wird. So darf auch – um das vielleicht bekannteste Beispiel zu nennen – der Mercedes-Stern mittels Additiver Fertigung an sich nachgebaut werden, doch jegliche Verwendung dieses Nachbaus dahingehend, dass Verbraucher den Eindruck erhalten könnten, damit werde eine Ware oder Dienstleistung des Rechteinhabers gekennzeichnet, kann untersagt werden. Bei sogenannten bekannten Zeichen wie eben dem Mercedes-Stern geht der Schutz sogar noch weiter – aber auch hier ist irrelevant, wie der betreffende Gegenstand hergestellt wird. Die Additive Fertigung wirft insoweit keine besonderen Fragen auf. Da diese Technologie ohnehin nur auf die Herstellung eines Gegenstandes an sich gerichtet ist, bleibt auch die Frage irrelevant, ob ein bestimmtes Abweichen von der geschützten dreidimensionalen Marke ausreicht, um aus deren Schutzbereich herauszutreten; auch insoweit spielt es keine Rolle, welche Technologie für den abweichenden Gegenstand verwendet wird, der möglicherweise eine dreidimensionale Marke verletzt.

A.2.4 Übernahme einer vorbestehenden „Anleitung“

Ein vorbestehender physischer Gegenstand ist für eine Additive Fertigung nicht zwingend erforderlich, wohl aber eine Art „**Anleitung**“, um dem Drucker Befehle darüber zu erteilen, welche Aktionen er zu welchem Zeitpunkt ausführen soll.

Diese „Anleitung“ muss ihrerseits nicht physisch vorliegen; typischerweise zum Einsatz kommen wird stattdessen eine CAD-Software (CAD = Computer-aided Design), dies in Verbindung mit einem Datensatz, der jene Informationen enthält, die den durch Additive Fertigung herzustellenden Gegenstand definieren. CAD-Software erlaubt es dabei in erster Linie, diesen Gegenstand bereits vor seiner Herstellung virtuell (auf einem Bildschirm) wahrnehmbar zu machen. Um für die Additive Fertigung einsetzbar zu sein, muss die verwendete Software außerdem den Drucker steuern können. Insoweit besteht die für eine Additive Fertigung erforderliche „Anleitung“ einerseits aus den **Daten** über den zu fertigenden Gegenstand, andererseits aus **Software**, die bestimmte Funktionen erfüllt.

Betrachtet man die beiden Elemente zunächst getrennt, unterliegt die **Software** selbst prinzipiell dem Schutz des **Urheberrechts**, und zwar – wie bei allen anderen Werkkategorien – unmittelbar, d. h., mit dem Akt der Schöpfung („Schöpferprinzip“, hier der Programmierung) entsteht der Schutz ohne Formalakt. Ein Softwareschutz durch **Patentrecht** ist zwar ausgeschlossen, soweit es sich um „Programme für Datenverarbeitungsanlagen“ als solche handelt (Art. 52 Abs. 1 Bst. c i. V. m. Abs. 2 EPÜ). In der Praxis lässt sich das aber leicht umgehen, indem die Software für bestimmte Verwendungszwecke angemeldet wird. Gerade im Falle der Additiven Fertigung dürfte dies regelmäßig möglich sein. Folge ist, dass der Einsatz von Software zum Zwecke der Additiven Fertigung die Erlaubnis jener Parteien voraussetzt, die daran Rechte haben. Wird entsprechende Software eigens für eine bestimmte Additive Fertigung von einer Drittpartei programmiert, ist es sinnvoller, bereits im Rahmen einer Beauftragung sicherzustellen, dass dem Anwender die notwendigen Lizenzen eingeräumt werden.

Bezogen auf die **Daten**, welche jene Informationen enthalten, die den durch Additive Fertigung herzustellenden Gegenstand definieren, ist darauf abzustellen, wie diese gewonnen werden. Werden die Daten selbst generiert, gilt das bezogen auf den Schutz eines vorbestehenden Gegenstandes Ausgeführte (siehe oben). Werden Daten hingegen als solche von einem Dritten übernommen und – unautorisiert – verwendet, wird das **Urheberrecht** nicht greifen. Denn dessen Schutz bezieht sich gerade nicht auf die Information an sich – den Inhalt –, sondern einzig auf die Ausdrucksform, d. h. auf eine Gestaltung, die wahrnehmbar sein muss (z. B. visuell). Insoweit mag die CAD-Darstellung auf einem Bildschirm Schutz genießen, zumal dafür weder eine stabile noch eine physische Verkörperung notwendig ist (wie dies beispielsweise bei einer technischen Zeichnung der Fall wäre); virtuelle Wahrnehmbarkeit genügt.

Daten an sich unterliegen hingegen unter gegebenen Voraussetzungen dem **Datenbankrecht sui generis**, das im Rahmen einer EU-Richtlinie etabliert wurde (RL 96/9 vom 11. März 1996 über den rechtlichen Schutz von Datenbanken) und das in einer gewissen Verwandtschaft zum Urheberrecht gesehen werden kann. Konkret genießt der Inhaber einer Datenbank Schutz dagegen, dass aus jener in quantitativer oder qualitativer Hinsicht wesentliche Teile entnommen werden (Art. 7 Abs. 1). Darunter fällt auch die „Weiterverwendung“, worunter insbesondere „jede Form öffentlicher Verfügbarmachung der Gesamtheit oder eines wesentlichen Teils des Inhalts der Datenbank“ fällt (Art. 7 Abs. 2 Bst. b).

Anders als das Urheberrecht schützt das **Patentrecht** die Information an sich, wobei es sich allerdings um eine „Lehre zum technischen Handeln“ handeln muss, die zum Zeitpunkt der Anmeldung gegenüber dem Stand der Technik

neu und nicht naheliegend gewesen war. Von einer in diesem Sinne patentierbaren Handlungsanweisung ist bei Daten an sich, die den Gegenstand definieren, der durch Additive Fertigung hergestellt werden soll, eher nicht auszugehen.

Aus praktischer Sicht dürfte eine Trennung von Software und Daten aber oft nicht möglich sein, d. h., eine „**Anleitung**“, die übernommen werden mag, um eine konkrete Additive Fertigung vorzunehmen, wird in der Regel beide Elemente enthalten. Entsprechend ist es auch möglich, dass diese „Anleitung“ als solche die Voraussetzungen für einen **Patentschutz** erfüllt, wobei es sich dann um ein Verfahrenspatent handeln dürfte. In diesem Fall verletzt eine Anwendung des geschützten Verfahrens das Patent, falls sie ohne Autorisierung durch den Rechteinhaber erfolgt. Wird die „Anleitung“ einem Dritten weitergegeben, dürfte Entsprechendes gelten wie bei der Weitergabe von eingescannten Daten eines Erzeugnisses, die für eine Additive Fertigung erforderlich sind, d. h., es ist von einer mittelbaren Patentverletzung auszugehen, wenn sich § 10 PatG auch auf unkörperliche Gegenstände beziehen kann.

Auch ohne Patentschutz wird eine „Anleitung“ angesichts der darin enthaltenen Softwarekomponenten den Schutz des **Urheberrechts** genießen, welches entsprechend verletzt wird, wenn eine Nutzung ohne Autorisierung durch den Rechteinhaber erfolgt. Auch die Weitergabe einer solchen „Anleitung“ – z. B. im Rahmen von CAD-Tauschbörsen – ist damit nicht erlaubt, selbst wenn die darin ebenfalls enthaltenen Daten, die den durch Additive Fertigung herzustellenden Gegenstand definieren, nicht durch eigene Vervielfältigung im Rahmen eines 3D-Scannings entstanden sind.

A.2.5 Schutz des Gegenstandes der Additiven Fertigung

Der **Gegenstand**, der mittels Additiver Fertigung hervorgebracht wird, kann im

Verhältnis zu dem, was zuvor bestanden hat, neu sein, womit bezogen auf diesen Gegenstand unter gegebenen Voraussetzungen mehrere Schutzoptionen bestehen. Infrage kommen dafür die schon genannten Schutzrechte, wobei diese verschiedene Funktionen erfüllen.

Vom **Patentrecht** erfassen lässt sich namentlich der Gegenstand als solcher, wenn dieser neue technische Eigenschaften aufweist, die zu entwickeln einem Fachmann nicht nahelagen. Wie der Gegenstand entwickelt wird, spielt dabei keine Rolle; Additive Fertigung ist insoweit als „Werkzeug“ zu betrachten. Geschützt sein mag dabei sowohl der Gegenstand an sich (etwa die technische Funktionalität einer bestimmten Form) als auch die Materie (d. h. der durch Additive Fertigung entstehende Stoff).

Auch bezogen auf das **Urheberrecht** ist denkbar, dass die Additive Fertigung als „Werkzeug“ dient, das die Herstellung eines Gegenstandes erlaubt, der den Schutzvoraussetzungen genügt. Genauso wie ein Computer eingesetzt werden kann, um ein (z. B. grafisches) Werk zu schöpfen, statt sich eines Pinsels zu bedienen, kann auch ein 3D-Drucker anstelle einer Feile zum Einsatz gelangen, um einen schöpferischen Gegenstand hervorzubringen. Führt dies zu einem Urheberrechtsschutz, bezieht sich dieser auf den Gegenstand an sich; dabei liegen die Rechte bei jener Partei, die den Drucker so bedient hat, dass der Gegenstand geschöpft werden konnte. Ist der Gegenstand zwar anders als vorbestehende Gegenstände, lehnt er sich aber an einen solchen an, so kann darin – falls der vorbestehende Gegenstand Urheberrechtsschutz genießt – auch eine Bearbeitung liegen. Diese ist urheberrechtlich genau gleich zu beurteilen wie beim Einsatz jeder anderen Technologie, die das Hervorbringen eines ähnlichen Gegenstandes erlaubt (z. B. Bildhauerei).

Kann der im Rahmen einer Additiven Fertigung entstehende Gegenstand urheberrechtlich geschützt sein, kommt im Prinzip auch der Schutz des **Designrechts** infrage. Zu erfüllen sind hier aber andere Schutzvoraussetzungen, d. h., vorliegen müssen Neuheit und Eigenart, dies mit nicht eindeutiger Abgrenzung der beiden Schutzrechte zueinander (siehe dazu oben). Entscheidender Unterschied ist jedenfalls, dass Designs grundsätzlich zum Schutz angemeldet werden müssen, womit ein zeitlich zwar deutlich kürzerer (mit fünfjährlichen Erneuerungen maximal 25 Jahre), aber einfacher durchsetzbarer Schutz gegen Übernahmen erlangt werden kann.

Der vom **Markenrecht** ausgehende Schutz erfasst wie ausgeführt nicht einen Gegenstand an sich, sondern dessen kennzeichenmäßige Verwendung im Rahmen der Vermarktung von Waren oder Dienstleistungen. Dem Rechteinhaber obliegt es, wie er den zur Kennzeichnung verwendeten Gegenstand – z. B. eine unterscheidungskräftige Figur, in dessen Verbindung Waren verkauft werden – herstellt. Auf der anderen Seite kommt es nicht darauf an, wie ein Dritter dies tut. Additive Fertigung mag jeweils eine Möglichkeit sein; deren Einsatz hat aber keinen Einfluss darauf, welche kennzeichenmäßigen Verwendungen dem Rechteinhaber ausschließlich vorbehalten sind bzw. welche er Dritten untersagen kann.

A.2.6 Schutz der „Anleitung“ zur Additiven Fertigung

Wird eine „Anleitung“ durch jene Partei erstellt, die die Additive Fertigung vornimmt, so gilt für sie bezogen auf die gegebenen Schutzmöglichkeiten das bereits Ausgeführte. Namentlich wird damit eine Programmierung einhergehen, die zu einem **Softwareschutz** führen kann. Dieser wird prinzipiell durch das **Urheberrecht** gewährt. Unter gegebenen Voraussetzungen kann aber auch ein **Patentrecht** erworben werden, wobei sich der

Rechtsschutz insbesondere auf ein konkretes Verfahren zur additiven Fertigung beziehen kann, soweit dieses bislang nicht bekannt und für einen Fachmann aus dem vorbestehenden Stand der Technik heraus nicht naheliegend war. Daten als solche könnten dem **Datenbankschutzrecht sui generis** unterliegen.

Um sich effektiv dagegen zu wehren, dass Dritte eine „Anleitung“ **unautoriisiert** nutzen, ist Patentschutz vorzuzugswürdig; gerade bezogen auf Software ist der urheberrechtliche Rechtsschutz nur praktikabel, solange jene unverändert übernommen wird. Hingegen wirft eine Umprogrammierung die Frage auf, ob die vom Dritten eingesetzte Software noch im Schutzbereich der geschützten Software liegt; insoweit bietet das Patentrecht einen deutlich sichereren und vorhersagbareren Schutz als das Urheberrecht.

A.2.7 Kommerzielle vs. private Nutzung

Die vorstehende Analyse des Einflusses von Immaterialgüterrechten auf die Additive Fertigung bezieht sich generell auf Konstellationen kommerziellen Handelns. Dort greifen bestehende Ausschließlichkeitsrechte unbeschränkt durch. Liegen Nutzungshandlungen hingegen im privaten oder sonst privilegierten Bereich (z. B. Nutzung geschützter Gegenstände für Forschungs- oder Ausbildungszwecke), können in unterschiedlicher Weise gesetzliche Nutzungserlaubnisse (sogenannte Schranken) Anwendung finden. Dies bedeutet, dass eine an sich unzulässige Verwendung eines Schutzgegenstandes auch ohne Zustimmung des Rechteinhabers erlaubt ist. Solche Regeln gelten grundsätzlich, ohne dass bezogen auf die Additive Fertigung Besonderheiten zu beachten wären. Hier nicht zu vertiefen ist die namentlich bezogen auf das Urheberrecht geführte Debatte, dass gewisse gesetzlich erlaubte Nutzungen im Prinzip eine Vergütungspflicht implizieren. Dies führt etwa zur Diskussion, inwieweit 3D-Drucker (wie heute schon konventionelle

Drucker) mit einer Urheberrechtsabgabe belastet werden sollen, um die notwendige Entschädigung für erlaubte Vervielfältigungen von geschützten Gegenständen sicherzustellen.

B Schutz von 3D-Modellen (J. Ensthaler)

B.1 Patent- und Urheberrecht

1. Im Zusammenhang mit der additiv generativen Fertigung geht es beim patent- und urheberrechtlichen Schutz um die Frage, ob bereits das druckfertige 3D-Modell, welches in einen G-Code konvertiert wird, schutzfähig ist, wenn die Inhalte die erfinderische Leistung (Patentrecht) oder eine geistig persönliche Schöpfung (Urheberrecht) wiedergeben. Andernfalls wäre es um den Schutz durch Additive Fertigung herzustellender Produkte schlecht bestellt. Die Kopie des druckfertigen G-Codes ist gleichbedeutend mit der Übernahme der Konstruktions- und der Fabrikationsphase eines Produkts. Sollte der Schutz tatsächlich erst mit dem produzierten Erzeugnis beginnen, wäre für den Plagiator eine schutzfreie Zone eröffnet, die bei wirtschaftlicher Betrachtung die gesamten Entwicklungs- und den größten Teil der Herstellungskosten umfasst. Gegenwärtig spricht viel dafür, dass dieser Freiraum in der Tat besteht. Das Patentrecht schützt den erfinderischen Gedanken erst, wenn er im Erzeugnis zum Ausdruck gekommen ist. Geschützt wird die erfinderische Leistung durch den Schutz des der Erfindung entsprechenden Produkts. Im Urheberrecht verhält es sich ebenso. Nicht die Idee für eine schöpferische Leistung wird geschützt, sondern das Ergebnis des schöpferischen Gedankens, das dadurch entstandene Werk. Nach dem Patentrecht wird die Lehre zum Gemeingut, nur ihre Verwendung für die Fertigung des in der Anmeldung benannten Erzeugnisses wird für 20 Jahre geschützt. Der Erfinder geht ein Tauschverhältnis ein, Erfindung

gegen den Schutz eines durch die Erfindung ermöglichten Erzeugnisses.

Ähnliches gilt auch im Urheberrecht; geschützt ist die konkrete Gestaltung, geschützt ist das Werk. Keinen Schutz erhalten die Gedanken, die Anweisungen zur Werkausführung, diese können von jedem aufgegriffen und verwandt werden; es sei denn, sie werden derart verwandt, dass das gleiche oder ein nur geringfügig abweichendes Werk entsteht (sogenannte unfreie Benutzung).

Die Normzwecke der Schutzgesetze sind zur Verhinderung zu großer Monopolbildungen auf das durch die Erfindung, den schöpferischen Gedanken entstehende bzw. entstandene Erzeugnis (Patentrecht) oder Werk (Urheberrecht) beschränkt.

2. Wie wird dieser auch oder gerade aus wirtschaftlicher Sicht anzuerkennende Normzweck dem additiven Fertigungsverfahren gerecht?

Aus technischer Sicht bzw. vom Sachverhalt ausgehend verhält es sich so, dass die der Werkschaffung bzw. der Herstellung des Erzeugnisses zugrunde liegende Idee, der zugrunde liegende schöpferische Gedanke, bereits in einem Erzeugnis verwirklicht werden muss, um einen derart begrenzten Ideenschutz zu erhalten. Einschränkunglos im Patentrecht, aber auch auf das Urheberrecht übertragbar kann festgestellt werden, dass es der erfinderische oder der schöpferische Gedanke ist, der Schutz erfahren soll, aber eben begrenzt durch ein bestimmtes Erzeugnis oder Werk.

Für das additive Fertigungsverfahren ist dann festzustellen, dass die den Schutz begründende neue technische Lehre bzw. der neue schöpferische Gedanke bereits zu dem Zeitpunkt mit allen Merkmalen vorhanden ist, in dem die digitale Darstellung in einem „Computer-aided Design“ (CAD) erstellt, in ein STL-Format exportiert und

durch ein Slicer-Programm (Teil des CAM-Systems) in einen G-Code konvertiert wird. Weiterhin sind alle den patentrechtlichen oder urheberrechtlichen Schutz begründenden Merkmale in digitalisierter Form in der zum Ausdruck vorbereiteten Datei enthalten. Der Schutzbereich ist dadurch konkretisiert, begrenzt, und die Schutzvoraussetzungen – geistig persönliche Schöpfung und erfinderische Leistung – sind überprüfbar vorhanden.

Die CAD-Datei, welche in einen G-Code konvertiert wurde, ist aus rechtlicher Sicht gerade nicht nur Anweisung/Anleitung zur Fertigung, sondern kennzeichnet alle Merkmale der Erfindung bzw. der schöpferischen Idee. Die Beschreibung der Datei als Anleitung zur Fertigung passt auf die Additive Fertigung gerade nicht, weil das Erzeugnis bzw. das Werk bereits bis ins kleinste Detail im druckfertigen, erzeugten G-Code enthalten ist. Es wird nicht mitgeteilt, wie zu produzieren ist, sondern die Eigenarten des Produkts bestimmen den Fertigungsprozess und sind insofern im G-Code enthalten.

Wesensmerkmal des Immaterialgüterrechtsschutzes ist immer die Idee, benannt als Erfindung, als schöpferischer Gedanke; der Schutz wird dann begrenzt durch die konkrete Ausführung der neuen Idee. Diese Eingrenzung ist nötig, um den Ideenschutz einzugrenzen, damit das Monopol nicht zu groß wird. Diese Voraussetzung wird aber durch die für den Druck aufbereitete CAD-Datei erfüllt, weil in ihr alle schöpferisch/erfinderischen Merkmale ganz konkret enthalten sind.

Es ist auch mittlerweile in der Rechtsprechung zum Urheberrecht anerkannt, dass eine Bauausführung auf der Grundlage eines Bauplans bereits als unzulässige Vervielfältigung des Bauplans bewertet werden kann. Voraussetzung ist, dass im Plan alle den Schutz begründenden Eigenarten enthalten sind (OLG Karlsruhe vom 3. Juni 2013, 6 U72/12). Das bedeutet, dass der

Plan auch im Hinblick auf das fertige Produkt/Werk geschützt ist, andernfalls wäre die Bauausführung nicht unzulässige Vervielfältigung des Plans. Plan und Bauwerk unterscheiden sich von der Art der Wahrnehmung erheblich; urheberrechtlich ist dies nach der Rechtsprechung ohne Belang, soweit nur die schutzbegründenden Merkmale jeweils, also auch im Plan, vorhanden sind. Es kommt demnach nicht darauf an, in welcher Form die individuellen Merkmale verkörpert sind.

3. Im Zusammenhang mit dem patentrechtlichen Schutz ist es auch denkbar, die Vorschriften über die mittelbare Patentverletzung heranzuziehen. Zwischen der Fertigstellung des Erzeugnisses und der zum Drucken durch die Slicer-Software (Teil des CAM-Systems) aufbereiteten CAD-Datei liegt nur noch der mechanisch durchgeführte Fertigungsvorgang durch die CNC-Maschine; es ist naheliegend, diese Prozesssituation mit der Fertigung eines Teils des geschützten Erzeugnisses zu vergleichen, wie es bislang für die mittelbare Patentverletzung verlangt wird.

4. Für die durch Additive Fertigung produzierten Güter ist auch die jüngere Rechtsprechung des Bundesgerichtshofs (BGH) zu den urheberrechtlichen Anforderungen von Bedeutung. Die Anforderungen sind gerade für die Werke der Angewandten bzw. Bildenden Kunst erheblich herabgesetzt worden. (Grundlegend: BGH vom 13. November 2013, Az. I ZR 143/12).

Nach der bisherigen Rechtsprechung waren Werke der sogenannten Angewandten Kunst urheberrechtlich nur geschützt, wenn sie die Durchschnittsgestaltungen der jeweiligen Art „deutlich überragen“. Die Begründung war nachvollziehbar, weil es für diese Werke ein dem Urheberrecht untergeordnetes Leistungsschutzrecht gibt, das Geschmacksmusterrecht, es ist im Designgesetz geregelt. Der BGH begründet damit, dass das Geschmacksmusterrecht seit der Novellierung des

Gesetzes im Jahr 2004 kein „kleines Urheberrecht“ mehr sei, sondern ein eigenständiges gewerbliches Schutzrecht, sodass es vorkommen kann, dass die Voraussetzungen für beide Rechte gegeben sind. Um es transparenter auszudrücken: Die allgemein für das Urheberrecht vom BGH anerkannte geringe Anforderung an Originalität gilt nun auch für den Bereich, der durch ein Leistungsschutzrecht unterlegt ist. Was für die Werke der Bildenden Kunst gilt, findet deshalb auch für die Angewandte Kunst Anwendung.

Für die Werte der Bildenden Kunst sind die Anforderungen an Originalität gering.

B.2 Haftungsfragen

1. Beim additiv generativen Verfahren ist zu klären, wer bei arbeitsteiliger Fertigung hinsichtlich Gewährleistung, Garantie und Produkthaftung Hersteller bzw. Verantwortlicher ist.

Hersteller ist derjenige, der eine bezogen auf das Produkt „eigenverantwortliche Tätigkeit“ wahrnimmt. Davon ist der Lieferant einer Sache abzugrenzen, der nur „notfalls“ als Haftungsadressat in Anspruch genommen werden kann, wenn der Hersteller nicht erkennbar ist (vgl. § 4 Abs. 3 ProdHG).

Wenn ein Unternehmen im Hinblick auf das fertige Produkt nur die Dienstleistung des „Ausdruckens“ übernimmt, wenn dieses Unternehmen nicht die CAD-Datei entwickelt hat, wenn es für die Druckmaterialien nicht verantwortlich ist, so kann die Produzenteneigenschaft nicht begründet werden. Es steht auch außerhalb traditioneller Fertigungsverfahren außer Frage, dass jemand, der eine Anlage nur aufstellt, mehrere Teile durch gegebene Anweisung und vorgegebene Materialien für eine Anlage zusammenfügt, nicht Hersteller ist.

2. Eine mit dieser Wertung verbundene Frage ist dann aber, an wen soll sich der

Verbraucher eines derart hergestellten Produktes wenden, wenn dieses Produkt fehlerhaft ist und diese Fehlerhaftigkeit zu seiner Verletzung führte?

Schadensersatzpflichtig ist der, der ein Erzeugnis geliefert hat, das zu dem eingetretenen Schaden führte. Der Kreis der Schädiger kann dabei groß sein; schon die CAD-Datei kann falsch sein, die Treibersoftware kann mit der CAD-Datei nicht kompatibel sein, die Materialien können untauglich sein. Der Konsument wird nicht in der Lage sein, den Kreis der möglichen Schadensverursacher auszumachen. Für diesen Fall hilft das Rechtsinstitut, das die Verantwortung des sogenannten Quasi-Herstellers begründet.

Quasi-Hersteller ist der Lieferant nach § 4 Abs. 3 ProdHG, der der eigenen Haftung nur entgehen kann, wenn er die Identität der Erzeugnislieferanten dem Kunden offenbart. Soweit, wie hier begründet, das Druckunternehmen nicht Produzent ist, so ist es zumindest Lieferant. Das Liefern der Ware ist in der gegebenen Situation das interessengerechte Minus gegenüber der Produzententätigkeit. Wenn das schlichte Ausdrucken für die Herstellereigenschaft nicht reicht, so bleibt aber immer noch das Liefern der Ware, und diese Lieferantstellung kann durch eine geminderte bzw. nicht ausreichende Produzenteneigenschaft nicht aufgehoben werden. Dies bedeutet, dass der Konsument nicht rechtlos gestellt ist, sondern dass er vom Fertigungsunternehmen (Lieferanten) verlangen kann, dass dieser ihm seine Zulieferer und die jeweils zugelieferte Ware nennt. Der Geschädigte wird dann diese bzw. einen aus dem Kreis – regelmäßig auf der Grundlage in Auftrag gegebener Gutachten – in Anspruch nehmen können.

Es ist dabei nicht auszuschließen, dass es dem Nutzer nicht in jedem Fall möglich sein wird, den Kausalitätsnachweis zu führen, d. h. nachzuweisen, welcher Zulieferer den Schaden durch sein fehlerhaftes Verhalten verursacht hat. Dieses Problem

betrifft den gesamten Bereich von Industrie 4.0. Durch die Vernetzung der Anlagen bzw. Systeme wird es nicht in jedem Fall möglich sein, den Verursacher eines Schadens festzustellen. In den Vereinigten Staaten von Amerika haben die Gerichte für diese Situation bereits mit der Begründung einer Risikogemeinschaft geantwortet. Soweit die Möglichkeit der Schadensverursachung besteht, soll dann zwischen den Beteiligten noch eine Haftungsgemeinschaft entstanden sein, aus der heraus diese gesamtschuldnerisch dem Geschädigten haften.

Ob die Etablierung einer Risikogemeinschaft sich auch im deutschen Haftungsrecht durchsetzt, etwa durch eine derart weitgehende Interpretation von § 830 Abs. 1 S. 2 BGB, lässt sich zurzeit noch nicht sagen.

3. Eine weitergehende Frage ist die, ob das Unternehmen, das lediglich aufgrund zugelieferter Materialien bzw. Dateien und Software das Produkt ausdruckt, nicht auch deliktisch haftet. Auf der Grundlage von § 823 Abs. 1 BGB lassen sich auch für den Lieferanten Verkehrssicherungspflichten bzw. Sorgfaltspflichten begründen. Zu diesen Sorgfaltspflichten gehört, dass das fertigende Unternehmen sich im Rahmen seiner technischen und organisatorischen Möglichkeiten davon überzeugt, ob die zugefertigten Waren ein fehlerfreies Produkt ermöglichen; im Einzelfall kann dem Lieferanten auch auferlegt sein, Probedrucke zu fertigen, die dann zu untersuchen sind. Insofern gibt es auch eine eigenständige – deliktische – Verpflichtung des Lieferanten.

Bei den Fragen zur Gewährleistung oder zu eventuell abgegebenen Garantieerklärungen durch das ausliefernde Unternehmen gibt es keine Abweichungen zum bislang praktizierten Kaufrecht. Gewährleistung und Garantie entstehen durch Verträge (regelmäßig Kaufverträge), die die Vertragsparteien verpflichten bzw. den Ver-

käufer gewährleistungs- und ggf. garantispflichtig machen. Dieser mag dann bei seinen Zulieferern Regress nehmen.

Glossar

Aktor	Antriebsselement, das aktiv in einen Prozess eingreift. Dabei werden elektrische Signale in eine mechanische Bewegung oder eine andere physikalische Größe, beispielsweise Temperatur, umgewandelt.
Akzeptabilität	Zentraler Begriff der Akzeptanzforschung/Technikethik. Verbunden mit dem Begriff ist die Frage des richtigen, gesellschaftsverträglichen (bspw. möglichst Nutzen bringenden / Schaden vermeidenden) Umgangs mit einer Technologie, ob die jeweilige Technologie also nach bestimmten ethischen Kriterien umgesetzt werden sollte, wobei insbesondere auch eine Risikoabwägung erfolgt.
Akzeptanz	Im Kontext technologischer Innovationen und Anwendungen, hier der Additiven Fertigung, Bezeichnung für eine empirisch feststellbare Haltung von Nutzerinnen und Nutzern.
Algorithmik	Teilgebiet der Mathematik und Informatik. Algorithmen beschreiben eindeutige Handlungsvorschriften zur Lösung von Problemen.
Augmented Reality	Computergestützte Erweiterung von Realitätswahrnehmungen. Die reale Welt wird durch künstliche, virtuelle Dinge und Sachverhalte ergänzt.
Ausdehnungskoeffizient	Mathematische Größe zur Beschreibung messbarer Änderungen in Länge oder Volumen eines Stoffes aufgrund von Temperaturveränderungen. Der alternative Begriff „Wärmedehnungskoeffizient“ weist darauf hin, dass der Wärmefluss die steuernde Größe ist und berücksichtigt, dass sich das Material je nach Temperaturänderung sowohl ausdehnen (expandieren) als auch zusammenziehen (kontrahieren) kann.
Binder-Druck	Additives Fertigungsverfahren, das auf dem Fügeprinzip des Verklebens von Pulver mit flüssigem Binder basiert. Der Binder-Druck gehört zur Kategorie der Binder-Jetting-Verfahren.
Binder Jetting	Kategorie additiver Fertigungsverfahren, bei denen pulverförmiges Ausgangsmaterial lokal mit einem Binder verklebt wird. Ein Verfahren dieser Kategorie ist der Binder-Druck.
Biofabrication	(Auch: „3D-Bioprinting“) Bezeichnung für die additive Herstellung von Objekten aus lebenden Zellen.
Bionik	Verfahren oder Objekteigenschaften, die natürliche Eigenschaften oder Funktionsweisen nachzubilden versuchen. Bionische Strukturen sind also Folge einer Übertragung natürlicher Prinzipien auf die Welt der technologischen Produktion. So basiert beispielsweise die Konstruktion des Pariser Eiffelturms auf der Balkenstruktur von Knochen.
Bioprinting	Siehe „Biofabrication“.
Cloud Computing	Bezeichnung für ein Funktionsprinzip der Datenverarbeitung auf Grundlage einer spezifischen IT-Infrastruktur, die Rechenleistung oder Speicherplatz über das Internet zur Verfügung stellt.
Computertomografie	Im Kontext der Additiven Fertigung Technologie zur 3D-Datenermittlung von Körpern im Sinne des „Reverse Engineering“. Als bildgebendes Verfahren findet die Computertomografie außerdem nach wie vor in der diagnostischen Radiologie Verwendung.

Contour Crafting	Additives Fertigungsverfahren zur computergestützten Errichtung von Gebäuden.
Desktop-3D-Druck	Spezifische additive Fertigungsverfahren für den Privatgebrauch, die üblicherweise mithilfe kleinerer Geräte anzuwenden sind. In der Regel handelt es sich dabei um Strangablege-Verfahren oder Stereolithografie-Verfahren.
Disruption	Verdrängung bestehender Geschäftsmodelle oder Technologien durch Etablierung von Innovationen.
Do it yourself	Bezeichnung für die selbstständige Durchführung anspruchsvoller technischer oder handwerklicher Tätigkeiten ohne professionelle Hilfe.
Dual Use	Bezeichnung für qualitativ gegensätzlich zu bewertende Anwendungsmöglichkeiten einer Technologie oder eines Produkts. Neben positiven Nutzeffekten besteht bei entsprechenden Technologien und Produkten auch die Gefahr eines Missbrauchs.
Elektronenstrahl-Schmelzen	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip des Schmelzschweißens funktioniert. Die Konturerzeugung des Objekts erfolgt dabei durch lokal kontrolliertes Schweißen mittels eines fokussierten Elektronenstrahls, geführt durch Magnetfelder. Das Elektronenstrahl-Schmelzen gehört zur Kategorie des pulverbettbasierten Schmelzens. Siehe „Laserstrahl-Schmelzen“.
Entbindern	Verfahren zur Herauslösung des Binders im Anschluss an den additiv vollzogenen Fertigungsverfahren. Ziel ist dabei die vollständige Herauslösung des Binders ohne Beeinflussung der Bauteilgeometrie und der chemischen Reinheit des Werkstoffs. Das Verfahren wird beispielsweise beim Binder-Druck eingesetzt.
Extruderdüse	Bestandteil einer Anlage zur Additiven Fertigung (siehe „Strangablege-Verfahren“). Mittels Extruderdüse wird das extrudierte Material lokal aufgetragen und so das physische Bauteil erstellt.
FabLab	(Abkürzung für „Fabrication Laboratory“) Spezifische Variante des „Makerspace“, die stärker institutionalisiert ist. Dabei handelt es sich um eine offen zugängliche Fertigungswerkstatt, die sowohl technologisches Equipment und Infrastruktur zur Verfügung stellt als auch Wissensaustausch, Bildung und gemeinsame Innovationsaktivitäten ermöglicht.
Fused Deposition Modeling	Additives Fertigungsverfahren, das von dem Unternehmen Stratasys vertrieben wird. Siehe „Strangablege-Verfahren“.
Gradientenwerkstoff	Material, das seine Eigenschaften kontinuierlich entlang einer (oder mehrerer) Raumrichtung(en) ändert. Die Veränderung wird durch die von Schicht zu Schicht gezielt modifizierte Materialzusammensetzung oder Parametereinstellung in der Herstellungsphase erzielt.
Hydrogel	Polymeres, wasserunlösliches Material, das durch Quellung eine große Menge an Wasser aufnehmen kann, das seinerseits in einem Netzwerk chemisch oder physikalisch gebunden ist.
Hygroskopie	Spezifische Eigenschaft eines Materials, das auf Feuchtigkeit mit massiver Volumenzunahme reagiert. Hygroskopische Materialien lassen sich zur Realisierung linearer Dehnungen oder für Faltvorgänge nutzen.
In vitro	Bezeichnung für organische Vorgänge, die außerhalb eines lebenden Organismus stattfinden. Das Gegenteil bilden Vorgänge im lebenden Organismus (in vivo).
Iterationen	Mehrfache Wiederholungen gleicher oder ähnlicher Rechenoperationen zur Erreichung einer bzw. Annäherung an eine Lösung.
Komposit	Verbundwerkstoff aus mehreren Materialien. Die Verbindung der verschiedenen Materialien erfolgt durch Stoff- und/oder Formschluss.
Laser Beam Melting	Additives Fertigungsverfahren. Siehe „Laserstrahl-Schmelzen“.

Laser-Sintern	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip des Flüssigphasen-Sinterns erfolgt. Die Konturerzeugung des Objekts erfolgt dabei durch lokal kontrollierte Belichtung mittels eines fokussierten CO ₂ -Laserstrahls, geführt durch Scan-Spiegel. Das Laser-Sintern findet überwiegend Anwendung bei der Verarbeitung von Kunststoffen und gehört zur Kategorie des pulverbettbasierten Schmelzens.
Laserstrahl-Schmelzen	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip des Schmelzschweißens funktioniert. Die Konturerzeugung des Objekts erfolgt dabei durch lokal kontrolliertes Schweißen mittels eines fokussierten Festkörperlaserstrahls, geführt durch Spiegel. Das Laserstrahl-Schmelzen gehört zur Kategorie des pulverbettbasierten Schmelzens.
Magnetresonanztomografie	(Kurz: MRT, auch: Kernspintomografie) Technologie zur 3D-Datenermittlung von Körpern bzw. Objekten im Sinne des „Reverse Engineering“. Dabei werden mithilfe von magnetischen Feldern und Radiowellen detaillierte Schnittbilder aus dem Objektinneren erzeugt. Als bildgebendes Verfahren findet die Kernspintomografie außerdem nach wie vor in der diagnostischen Radiologie Verwendung.
Maker Movement	Transnational vernetzte Bewegung zur Förderung, Entwicklung und Anwendung moderner Technologien im Sinne des Do-it-yourself-Prinzips und des Web 2.0. Im „Maker Movement“ verbinden sich Wertvorstellungen von Eigenproduktion, digitaler Vernetzung und Kooperation mit Praktiken spielerischer Technikaneignung.
Makerspace	Analoge Knotenpunkte des digital vernetzten „Maker Movements“. „Makerspace“ ist ein Sammelbegriff für verschiedene Varianten einer offen zugänglichen Fertigungswerkstatt, die sowohl technologisches Equipment und Infrastruktur zur Verfügung stellt als auch Wissensaustausch, Bildung und gemeinsame Innovationsaktivitäten ermöglicht.
Makroebene	Eine von insgesamt drei Betrachtungsebenen in der Systemanalyse. Hier werden übergeordnete Zusammenhänge zwischen verschiedenen Systemen dargestellt und betrachtet.
Mehrskaligkeit	Eigenschaften eines Systems und Interaktionen können sich auf Mikro-, Meso- und Makroebene unterscheiden oder kongruent sein.
Mesoebene	Eine von insgesamt drei Betrachtungsebenen in der Systemanalyse. Hier werden Beziehungen und Zusammenhänge innerhalb eines Systems dargestellt und betrachtet.
Mikroebene	Eine von insgesamt drei Betrachtungsebenen in der Systemanalyse. Hier werden einzelne Bestandteile und Akteure innerhalb eines Systems dargestellt und betrachtet.
Morphologien	Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes.
Numerik	Teilgebiet der Mathematik, das sich mit der Entwicklung und Analyse von Algorithmen für kontinuierliche mathematische Probleme befasst.
Open Source	Prinzip der Gestaltung und Verwendung von Software, deren Quelltext öffentlich einseh-, änder- und nutzbar ist. Open-Source-Software ist in der Regel kostenlos und ein wichtiges Instrument des „Maker Movement“.
Photopolymer	Polymer, das seine Eigenschaften ändert, wenn es mit UV-Licht bestrahlt wird. Photopolymere finden Verwendung im Rahmen von Stereo-lithografie-Verfahren. Dabei wird das Photopolymer lokal ausgehärtet, wodurch das gewünschte Objekt entsteht.
Plug-and-play	Bezeichnung für eine spezifische Funktionsweise in der Computer-, Elektro- und Produktionstechnik. Der Begriff verweist auf die sofortige Einsatzbereitschaft eines neuen Geräts, beispielsweise eines Desktop-3D-Druckers, der an die Stromversorgung angeschlossen und unmittelbar danach verwendet werden kann, ohne dass zuvor manuell Bestandteile montiert, Einstellungen konfiguriert oder Gerätetreiber installiert werden müssen.

Poisson-Verhältnis	Beschreibung der spezifischen Eigenschaft eines Materials, das in einer Richtung gestaucht wird, sich in den Richtungen senkrecht zur Stauchachse auszudehnen.
PolyJet-Prozess	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip der Photopolymerisation funktioniert. Die Konturerzeugung des Objekts erfolgt dabei durch lokal kontrolliertes Aufbringen von Photopolymeren mittels eines Tintenstrahldruckkopfs. Das Verfahren gehört zur Kategorie des „Material Jetting“, wobei PolyJet eine Markenbezeichnung darstellt. Der PolyJet-Prozess gehört zur Kategorie der Harz-Drucke.
Polymer	Chemische Verbindung aus Ketten- oder verzweigten Molekülen, die in der Additiven Fertigung als Ausgangsmaterial dient. Siehe auch „Photopolymere“.
Rapid Prototyping	Bezeichnung für die additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität, aber hinreichender Ausprägung spezifischer Merkmale.
Rapid Tooling	Bezeichnung für die additive Herstellung von Werkzeugen, Formen oder Formeinsätzen.
Reverse Engineering	Bezeichnung eines Prinzips zur Fertigung von Bauteilen, die mittels Scan und digitaler Rekonstruktion eines bereits existenten Objekts als dessen Nachbildung gefertigt werden.
Sensor	(Auch: Detektor) Technisches Bauteil, das spezifische physikalische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder quantitativ erfassen kann. Die ermittelten Eigenschaftswerte werden in elektrische Signale umgewandelt und im System weiterverarbeitet.
Sintern	Verfahren zur Verdichtung eines Werkstücks unter hohen Temperaturen, zum Teil auch unter hohem Druck.
Skalenanalyse	Ein Verfahren, mit dem man Informationen darüber gewinnt, welche Parameter eines physikalischen Problems auf welcher Betrachtungsstufe den größten Einfluss auf das raum-zeitliche Systemverhalten haben und wie deren Interaktionswirkung ist. Die Skalenanalyse ist ein Werkzeug zur Komplexitätsreduktion.
Skaleneffekt	Beschreibung der Abhängigkeit der Produktionsmenge von den verwendeten Produktionsfaktoren.
Stent	Medizinisches Implantat zum Offenhalten von Gefäßen oder Hohlorganen.
Stereolithografie	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip der Photopolymerisation funktioniert. Die Konturerzeugung des Objekts erfolgt dabei durch lokal kontrollierte Belichtung mittels eines fokussierten Laserstrahls, geführt von Scan-Spiegeln oder inkohärentem Licht. Die Stereolithografie gehört zur Kategorie der Photopolymerisation.
Strangablege-Verfahren	Additives Fertigungsverfahren, das nach dem Fügeprinzip des Schmelzklebens bzw. der Schmelzschichtung funktioniert. Die Konturerzeugung erfolgt dabei durch Extrusion eines drahtförmigen Ausgangsmaterials aus einer verfahrbaren Extruderdüse. Das Strangablege-Verfahren gehört zur Kategorie der Materialextrusion.
Strukturoptimierung	Numerische Methode zur Form- und Topologieoptimierung eines digitalen Bauteilmodells. Siehe „Formoptimierung“ und „Topologieoptimierung“.
Thermoplast	(Auch: Plastomer) Kunststoff, der sich in einem bestimmten Temperaturbereich verformen lässt. In der Additiven Fertigung bilden Thermoplaste das Ausgangsmaterial zur Herstellung physischer Bauteile, beispielsweise beim Strangablege-Verfahren oder beim Laser-Sintern.
Tissue Engineering	Bezeichnung eines Prinzips zur künstlichen Herstellung biologischer Gewebe durch kontrollierte Dispensierung und Kultivierung körpereigener Zellen.

Verbundwerkstoff	Siehe „Komposit“.
Virtual Reality	Visualisierung einer computergenerierten, nicht real existierenden Umgebung/Welt.
Voxel	(Abkürzung für „Volume Vox Element“) Volumenorientierte und örtlich-variable Beschreibung von digitalen Bauteilmodellen. Ziel ist es, den inneren Aufbau eines additiv hergestellten Objekts modellieren zu können, um dann diese Objektbereiche gezielt additiv zu fertigen.

7 Literatur

- acatech, Leopoldina & Akademienunion. (2016). *Additive Fertigung*. Berlin: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.
- Anderson, C. (2014). *Makers: The New Industrial Revolution*. Random House USA.
- Arndt, A., Hackbusch, H. & Anderl, R. (2015, August 12). *An algorithm-based method for process-specific three-dimensional nesting for additive manufacturing processes*. Gehalten auf der 26th Solid Freeform Fabrication Symposium 2015, Austin, Texas. Abgerufen von <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/75091/>
- ASTM International. (o. J.). Additive Manufacturing Technology Standards. Abgerufen 18. September 2019, von <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html>
- Atasoy, H. (2013). The Effects of Broadband Internet Expansion on Labor Market Outcomes. *ILR Review*, 66(2), 315–345. <https://doi.org/10.1177/001979391306600202>
- Atasoy, H., Banker, R. D. & Pavlou, P. A. (2016). On the Longitudinal Effects of IT Use on Firm-Level Employment. *Information Systems Research*, 27(1), 6–26. <https://doi.org/10.1287/isre.2015.0618>
- Barnett, M. (2014). The next big fight: 3D printing and intellectual property. Abgerufen 25. September 2018, von Technology Law Source website: <https://www.technologylawsource.com/2014/01/articles/intellectual-property-1/the-next-big-fight-3d-printing-and-intellectual-property/>
- Bauer, D., Borchers, K., Burkert, T., Ciric, D., Cooper, F., Ensthaler, J., ... Verein Deutscher Ingenieure. (2016). *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*. VDI – Verein Deutscher Ingenieure.
- Bayreuther, C. G. (2004). *Mehrskalenmodelle in der Festkörpermechanik und Kopplung von Mehrgittermethoden mit Homogenisierungsverfahren* (Dissertation). Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bendsøe, M. P. & Sigmund, O. (2004). *Topology Optimization. Theory, Methods, and Applications*. Abgerufen von <http://www.springerlink.com/content/978-3-662-05086-6>
- Beranek, J. (2013). *Die „Neue Österreichische Tunnelbauweise“: Untersuchung von Spritzbeton aus faserbewehrtem und mattenbewehrtem Spritzbeton und deren Anwendungsmöglichkeiten*. Saarbrücken: AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG.
- Berg, A. (2017). 3D-Druck im Hausgebrauch. Abgerufen 25. September 2019, von Bitkom Pressekonferenz 3D-Druck website: <https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-PIs/2017/03-Maerz/Bitkom-Pressekonferenz-3D-Druck-Verbraucher-01-03-2017.pdf>
- Beuth Verlag GmbH. (2017). *DIN EN ISO/ASTM 52921:2017-01, Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung – Koordinatensysteme und Prüfmethodologien (ISO/ASTM 52921:2013); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52921:2016*. <https://doi.org/10.31030/2580022>
- BG ETEM. (2018). 3D-Druck/Additive Fertigungsverfahren. Abgerufen 18. September 2019, von <https://www.bgetem.de/arbeitsicherheit-gesundheitsschutz/brancheninformationen1/druck-und-papierverarbeitung/3d-druck-additive-fertigungsverfahren>
- Bhat, Z. F., Kumar, S. & Bhat, H. F. (2017). In vitro meat: A future animal-free harvest. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 782–789. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.924899>
- Birtchnell, T. & Urry, J. (2016). *A new industrial future? 3D printing and the reconfiguring of production, distribution, and consumption* (1 edition). London New York: Routledge.
- Blaeser, A., Million, N., Campos, D. F. D., Gamrad, L., Köpf, M., Rehbock, C., ... Fischer, H. (2016). Laser-based in situ embedding of metal nanoparticles into bioextruded alginate hydrogel tubes enhances human endothelial cell adhesion. *Nano Research*, 9(11), 3407–3427. <https://doi.org/10.1007/s12274-016-1218-3>
- Bonte, A., Lohmeier, F. & Oehm, L. (2014). Experiment Makerspace in der SLUB. *BIS – Das Magazin der Bibliotheken in Sachsen*, 7(2), 74–76.
- Boucher, P. (2018). 3D bio-printing for medical and enhancement purposes [In-Depth Analysis]. Abgerufen 25. September 2019, von European Parliamentary Research Service website: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2018/614571/EPRS_IDA\(2018\)614571\(ANN1\)_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2018/614571/EPRS_IDA(2018)614571(ANN1)_EN.pdf)
- Bourhis, F. L., Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y. & Mognol, P. (2013). Sustainable manufacturing: Evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9–12), 1927–1939. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5151-2>
- Bowyer, A. (2004). Wealth Without Money/de - RepRap. Abgerufen 25. September 2019, von RepRap website: https://www.reprap.org/wiki/Wealth_Without_Money/de
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. & Verl, A. (Hrsg.). (2013). *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern*. Berlin: Springer Vieweg.
- Bundesanzeiger. (2018). Verordnung über die Berufsausbildung in den industriellen Metallberufen in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2018 (BGBl. I S. 975). Abgerufen 25. September 2019, von https://www.gesetze-im-internet.de/indmetausbv_2007/BJNR159900007.html

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018). Mit gedruckter Kost rundum gut versorgt [Kooperationsprojekte]. Abgerufen 28. Februar 2019, von ZIM-Erfolgsbeispiel website: https://www.zim.de/ZIM/Redaktion/DE/Publikationen/Erfolgsbeispiele/Kooperationsprojekte/167-mit-gedruckter-kost-rundum-gut-versorgt.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesregierung. (2019). Verbreitung von Waffen aus dem 3D-Drucker. Abgerufen 17. Oktober 2019, von Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Uwe Schulz, Joana Cotar, Uwe Kamann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD website: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/042/1904255.pdf>
- Cai, C. S., Wu, W., Chen, S. & Voyiadjis, G. (2003). Applications of smart materials in structural engineering [Final Report]. Abgerufen 25. September 2018, von LTRC website: https://www.ltrc.lsu.edu/pdf/report_375.pdf
- Cavalcanti, G. (2013). Is it a Hackerspace, Makerspace, TechShop, or FabLab? Abgerufen 25. September 2019, von Make: DIY projects and ideas for makers website: <https://makezine.com/2013/05/22/the-difference-between-hackerspaces-makerspaces-techshops-and-fablabs/>
- Caviezel, C., Grünwald, R., Ehrenberg-Silies, S., Kind, S., Jetzke, T. & Bovenschulte, M. (2017). Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). Abgerufen 25. September 2019, von Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag website: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab175.pdf>
- Chang, Y.-H., Wang, K., Wu, C., Chen, Y., Zhang, C. & Wang, B. (2015). A facile method for integrating direct-write devices into three-dimensional printed parts. *Smart Materials and Structures*, 24(6), 65008.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Dadbakhsh, S., Mertens, R., Hao, L., Van Humbeeck, J. & Kruth, J. (2019). Selective Laser Melting to Manufacture “In Situ” Metal Matrix Composites: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 21(3), 1801244. <https://doi.org/10.1002/adem.201801244>
- Dehoff, R. R., Kirka, M. M., Sames, W. J., Bilheux, H., Tremsin, A. S., Lowe, L. E. & Babu, S. S. (2015). Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 31(8), 931–938. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000734>
- Denlinger, E. R., Irwin, J. & Michaleris, P. (2014). Thermomechanical modeling of additive manufacturing large parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 061007. <https://doi.org/10.1115/1.4028669>
- Deutsche MittelstandsNachrichten. (2014). 3D-Druck für den Mittelstand: „Wie weit können Sie denken?“ Abgerufen 22. Oktober 2019, von <http://www.deutschemittelstands-nachrichten.de/2014/07/63823/>
- Deymier, P. A., Runge, K. & Muralidharan, K. (Hrsg.). (2016). *Multiscale paradigms in integrated computational materials science and engineering: Materials theory, modeling, and simulation for predictive design*. Cham Heidelberg New York: Springer.
- Dickel, S., Ferdinand, J.-P. & Petschow, U. (2014). Shared machine shops as real-life laboratories. *Journal of Peer Production*, 5, 1–20.
- Dickel, S. & Schrape, J.-F. (2015). Dezentralisierung, Demokratisierung, Emanzipation. Zur Architektur des digitalen Technikutopismus. *Leviathan*, 43(3), 442–463. <https://doi.org/10.5771/0340-0425-2015-3-442>
- Dubai Future Foundation. (2016). 3D Printed Office. Abgerufen 12. März 2018, von Office of the Future website: <http://www.officeofthefuture.ae/>
- Dudziak, S., Gieseke, M., Haferkamp, H., Barcikowski, S. & Kracht, D. (2010). Functionality of laser-sintered shape memory micro-actuators. *Physics Procedia*, 5, 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.088>
- Dumstorff, G., Paul, S. & Lang, W. (2014). Integration without disruption: The basic challenge of sensor integration. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2102–2111. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2294626>
- Eckardt, S. (2010). *Adaptive heterogene Mehrskalennmodelle zur nichtlinearen Simulation von Beton* (Dissertation). Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- e-NABLE. (o. J.). Abgerufen 27. Juni 2019, von Google Impact Challenge|Behinderungen website: <https://www.google.org/intl/de/impactchallenge/disabilities/grantees/enable.html>
- Engeli, R., Etter, T., Hövel, S. & Wegener, K. (2016). Processability of different IN738LC powder batches by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.046>
- Enrique, P. D., Mahmoodkhani, Y., Marzbanrad, E., Toyserkani, E. & Zhou, N. Y. (2018). In situ formation of metal matrix composites using binder jet additive manufacturing (3D printing). *Materials Letters*, 232, 179–182. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.117>
- Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E. & Wicker, R. B. (2014). 3D Printing multifunctionality: Structures with electronics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5–8), 963–978. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5717-7>
- Factum Foundation. (2016). IDA Palmyra arch copy. Abgerufen 25. September 2019, von Factum Foundation in Digital Technology in Conservation website: <http://www.factumfoundation.org/pag/236/>
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 14–33. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>
- Fastermann, P. (2013). *Die Macher der dritten industriellen Revolution: Das Maker Movement*. Norderstedt: Books on Demand.
- Feldmann, M., Kühne, R., Citarelli, S., Reisgen, U., Sharma, R. & Oster, L. (2019). 3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing. *Stahlbau*, 88(3), 203–213. <https://doi.org/10.1002/stab.201800029>
- Fish, J. (Hrsg.). (2010). *Multiscale methods: Bridging the scales in science and engineering*. Oxford: Oxford University Press.
- Fitzpatrick, S. (2017). „Organs-on-chips“ technology_ FDA testing groundbreaking science. Abgerufen 25. September 2019, von U.S. Food & Drug Administration, FDA Voice website: <https://blogs.fda.gov/fdavoices/index.php/2017/04/organs-on-chips-technology-fda->

- testing-groundbreaking-science/
 Fless, F. (2015). IS-Bildersturm: Für Palmyras Ruinen gibt es nur eine Chance. Abgerufen 25. September 2019, von Die Welt website: <https://www.welt.de/geschichte/article147213778/Fuer-Palmyras-Ruinen-gibt-es-nur-eine-Chance.html>
- Ford, S. & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Francois, M. M., Sun, A., King, W. E., Henson, N. J., Tourret, D., Bronkhorst, C. A., ... Walton, O. (2017). Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.001>
- Gao, G. & Cui, X. (2016). Three-dimensional bioprinting in tissue engineering and regenerative medicine. *Biotechnology Letters*, 38(2), 203–211. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-1975-1>
- Garcia, C. R., Correa, J., Espalin, D., Barton, J. H., Rumpf, R. C., Wicker, R. & Gonzalez, V. (2012). 3D printing of anisotropic metamaterials. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 34, 75–82. <https://doi.org/10.2528/PIERL12070311>
- GCD. (2019, Oktober 15). About – GCD. Abgerufen 15. Oktober 2019, von About the center for geometry and computational design website: http://gcd.tuwien.ac.at/?page_id=36
- Ge, Q., Qi, H. J. & Dunn, M. L. (2013). Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letters*, 103(13), 131901. <https://doi.org/10.1063/1.4819837>
- Gebhardt, A., Dobischat, R. & Hans-Böckler-Stiftung (Hrsg.). (2015). *3D-Drucken in Deutschland: Entwicklungsstand, Potenziale, Herausforderungen, Auswirkungen und Perspektiven*. Aachen: Shaker.
- Gebhardt, A., Hötter, J.-S. & Fateri, M. (2013). *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion* (Vierte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage). München: Hanser.
- Gershenfeld, N. (2012). How to make almost anything. *Foreign Affairs*, 91(6), 43–57.
- Ghazanfari, A., Li, W., Leu, M. C., Zhuang, Y. & Huang, J. (2016). Advanced ceramic components with embedded sapphire optical fiber sensors for high temperature applications. *Materials and Design*, 112, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.074>
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing* (Second Edition). New York u.a.: Springer.
- Göke, B., Behrens, P., Fritsching, U., Kelbassa, I., Poprawe, R., Esen, C. & Ostendorf, A. (2016). Materials for photonics. *Laser and Photonics*, (1), 6–10.
- Gräbner, D., Dödtmann, S., Dumstorff, G. & Lucklum, F. (2018). 3-D-printed smart screw: functionalization during additive fabrication. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7(1), 143–151. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-143-2018>.
- Grunwald, A. (2008). *Technik und Politikberatung: Philosophische Perspektiven*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K. & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 57(3), 133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- Guilloux, M., Prost, C., Catanéo, C., Leray, G., Chevallier, S., Le Bail, A. & Lethuaut, L. (2013). Impact of salt granulometry and method of incorporation of salt on the salty and texture perception of model pizza dough: Salty and texture perception of dough. *Journal of Texture Studies*, 44(5), 397–408. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12029>
- Hackel, M., Bertram, B., Blötz, U., Reymers, M., Tutschner, H. & Wasiljew, E. (2015). *Diffusion neuer Technologien. Veränderungen von Arbeitsaufgaben und Qualifikationsforderungen im produzierenden Gewerbe (DifTech)*. Abgerufen von Bundesinstitut für Berufsbildung website: https://www2.bibb.de/bibbtools/tools/dapro/data/documents/pdf/eb_41301.pdf
- Hacker, J., Fritsch, J. & Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Hrsg.). (2015). *Freiheit und Verantwortung der Wissenschaften: rechtfertigen die Erfolgchancen von Forschung ihre potentiellen Risiken?; Dokumentation des Symposiums der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Deutschen Ethikrates am 3. Nov. 2014 in Halle (Saale)*. Halle: Dt. Akad. der Naturforscher Leopoldina, Nationale Akad. der Wiss.
- Hackerspaces. (o. J.). Abgerufen 30. September 2019, von <https://wiki.hackerspaces.org/>
- Hanselmann, M. (2017). *Makerspaces in öffentlichen Bibliotheken*. Abgerufen von https://www.htwchur.ch/fileadmin/htw_chur/angewandte_zukunftstechnologien/SII/churer_schriften/CSI88-Makerspaces_in_oeffentlichen_Bibliotheken.pdf
- Harrison, N. J., Todd, I. & Mumtaz, K. (2015). Reduction of micro-cracking in nickel superalloys processed by selective laser melting: A fundamental alloy design approach. *Acta Materialia*, 94, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.04.035>
- Heinz-Piest-Institut für Handwerkstechnik. (2011). *Unterweisungsplan für einen Lehrgang der überbetrieblichen beruflichen Bildung zur Anpassung an die technische Entwicklung im Zahntechnikerhandwerk*. Abgerufen von <https://www.hpi-hannover.de/dateien/unterweisungsplaene/ZAHN4-11.pdf>
- Herrmann, M. & Sobek, W. (2015). Gradientenbeton – Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. *Beton- und Stahlbetonbau*, 110(10), 672–686. <https://doi.org/10.1002/best.201500035>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Hippel, E. v. (2006). *Democratizing innovation* (First MIT Press Paperback Edition). Cambridge: MIT Press.
- Hirsch-Kreinsen, H. (2014). Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“. WSI Mitteilungen, (06/2014), 421–429.

- Hochschule Rhein-Waal. (2017). 3D-Kompetenzzentrum Niederrhein Fab Academy startet in Deutschland. Abgerufen 30. September 2018, von Pressemitteilungen website: <https://www.hochschule-rhein-waal.de/de/aktuelles/pressemitteilungen/3d-kompetenzzentrum-niederrhein>
- Hocquette, J.-F. (2016). Is in vitro meat the solution for the future? *Meat Science*, 120, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.036>
- Hodge, N. E., Ferencz, R. M. & Solberg, J. M. (2014). Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting. *Computational Mechanics*, 54(1), 33–51. <https://doi.org/10.1007/s00466-014-1024-2>
- Holdich, R. G. (2002). *Fundamentals of particle technology*. Shepshed: Midland Information Technology and Publishing.
- Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., ... Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: The case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1559–1570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109>
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A. & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Hund, A. (2007). *Hierarchische Mehrskalmodellierung des Versagens von Werkstoffen mit Mikrostruktur* (Dissertation). Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Hupfeld, T., Laumer, T., Stichel, T., Schuffenhauer, T., Heberle, J., Schmidt, M., ... Gökce, B. (2018). A new approach to coat PA12 powders with laser-generated nanoparticles for selective laser sintering. *Procedia CIRP*, 74, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.103>
- Ibrahimbegovic, A. (Hrsg.). (2016). *Computational methods for solids and fluids 2016: Multiscale analysis, probability aspects and model reduction*. o.O.: Springer International Publishing.
- IFA. (o. J.). 3D-Drucker. Abgerufen 18. September 2019, von <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/arbeiten-4.0/neue-technologien-stoffe/3d-drucker/index.jsp>
- Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt. (o. J.). Beton aus dem 3D-Drucker. Abgerufen 30. September 2019, von Technische Universität München website: <https://www.bgu.tum.de/forschung/highlights/beton-aus-dem-3d-drucker/>
- ISO/TC 261 – Additive manufacturing. (o. J.). Abgerufen 30. September 2019, von ISO International Organization for Standardization website: <https://www.iso.org/committee/629086.html>
- Jäggle, E., Sheng, Z., Kürnsteiner, P., Ocylok, S., Weisheit, A. & Raabe, D. (2016). Comparison of Maraging Steel Micro- and Nanostructure Produced Conventionally and by Laser Additive Manufacturing. *Materials*, 10(12), 8. <https://doi.org/10.3390/ma10010008>
- Jalabi, R. (2016). Replica of Syrian arch destroyed by Isis unveiled in New York City. Abgerufen 30. September 2019, von The Guardian website: <http://www.theguardian.com/us-news/2016/sep/20/palmyra-arch-syria-new-york>
- Jonušauskas, L., Lau, M., Gruber, P., Gökce, B., Barcikowski, S., Malinauskas, M. & Ovsianikov, A. (2016). Plasmon assisted 3D microstructuring of gold nanoparticle-doped polymers. *Nanotechnology*, 27(15), 154001. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/15/154001>
- Karl, S. & Trinkl, E. (2014). Studie zur Relevanz archäologischer Reproduktionen für Universitäten, Museen, Denkmalschutz und Forschungsvorhaben. Abgerufen 22. Oktober 2019, von Universität Graz – We work for tomorrow website: <https://archaeologie.uni-graz.at/de/forschen/projekte/abgeschlossene-projekte/original-kopie-replik/>
- Keating, S. J., Leland, J. C., Cai, L. & Oxman, N. (2017). Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*, 2(5), eaam8986. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8986>
- Kellens, K., Mertens, R., Paraskevas, D., Dewulf, W. & Duflou, J. R. (2017). Environmental impact of additive manufacturing processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing? *Procedia CIRP*, 61, 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153>
- Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A. & King, W. E. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, 108, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014>
- Khajavi, S. H., Partanen, J. & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65(1), 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>
- Khambekar, J. & Pittenger, B. H. (2013). Understanding and preventing metal-dust hazards. *International Journal of Powder Metallurgy*, 49(4), 39–47.
- Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., ... Yeong, W. Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 103–122. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Kim, Y., Yuk, H., Zhao, R., Chester, S. A. & Zhao, X. (2018). Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature*, 558(7709), 274–279. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0185-0>
- Knöll, H., Ocylok, S., Weisheit, A., Springer, H., Jäggle, E. & Raabe, D. (2017). Combinatorial alloy design by laser additive manufacturing. *Steel Research International*, 88(8), 1600416. <https://doi.org/10.1002/srin.201600416>
- Kohl, J., Kaufhold, J. & Burkhardt, H. (2018). *Additive Fertigung mit holzbasierten Materialien. Materialien – Prozesse – Anwendungsfelder [Kurzstudie]*. Abgerufen 30. September 2019, von Institut für Holztechnologie Dresden website: https://www.ihd-dresden.de/fileadmin/user_upload/pdf/IHD/wissensportal/Broschueren/3D-Druck/Kurzstudie_3D.pdf

- Körner, C., Helmer, H., Bauereiß, A. & Singer, R. F. (2014). Tailoring the grain structure of IN718 during selective electron beam melting. *MATEC Web of Conferences*, 14, 08001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141408001>
- Kranz, J., Herzog, D. & Emmelmann, C. (2015). Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S14001. <https://doi.org/10.2351/1.4885235>
- Kreiger, M. & Pearce, J. M. (2013). Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 1(12), 1511–1519. <https://doi.org/10.1021/sc400093k>
- Kruisová, A., Seiner, H., Sedlák, P., Landa, M., Román-Manso, B., Miranzo, P. & Belmonte, M. (2014). Acoustic metamaterial behavior of three-dimensional periodic architectures assembled by robocasting. *Applied Physics Letters*, 105(21), 211904. <https://doi.org/10.1063/1.4902810>
- Kürnsteiner, P., Wilms, M. B., Weisheit, A., Barriobero-Vila, P., Jäggle, E. A. & Raabe, D. (2017). Massive nanoprecipitation in an Fe-19Ni-xAl maraging steel triggered by the intrinsic heat treatment during laser metal deposition. *Acta Materialia*, 129, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.069>
- Lachmayer, R., Lippert, R. B. & Fahlbusch, T. (Hrsg.). (2016). *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Lang, W., Jakobs, F., Tolstosheeva, E., Sturm, H., Ibragimov, A., Kesel, A., ... Dicke, U. (2011). From embedded sensors to sensorial materials – The road to function scale integration. *Sensors and Actuators A: Physical*, 171(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.03.061>
- Lau, M., Niemann, R. G., Bartsch, M., O'Neill, W. & Barcikowski, S. (2014). Near-field-enhanced, off-resonant laser sintering of semiconductor particles for additive manufacturing of dispersed Au-ZnO-micro/nano hybrid structures. *Applied Physics A*, 114(4), 1023–1030. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8270-1>
- Lausch, H., Töppel, T., Petters, R., Gronde, B., Herrmann, M. & Funke, K. (2016). Multi-material approach to integrate ceramic boxed temperature-sensitive components in laser beam melted structures for bio and other applications. 3. Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, DDMC 2016. Proceedings. Gehalten auf der Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC), Stuttgart.
- Le, V. T., Paris, H. & Mandil, G. (2017). Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of Cleaner Production*, 164, 508–523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.204>
- Lehmhus, D., Wuest, T., Wellsandt, S., Bosse, S., Kaihara, T., Thoben, K.-D. & Busse, M. (2015). Cloud-based automated design and additive manufacturing: A usage data-enabled paradigm shift. *Sensors*, 15(12), 32079–32122. <https://doi.org/10.3390/s151229905>
- Leigh, S. J. (2016, 10-03.11). Polymer composites for 3D printing of functional sensors and transducers. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808629>
- Levedag, S., Klingauf, U., Hornung, M., Klenner, J., Messerschmid, E. & Radespiel, R. (2018). *Zukunftsfähigkeit der Luftfahrtforschung in Deutschland: Chancen und Risiken der aktuellen Entwicklung*. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. – Nationale Akademie der Wissenschaften.
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M. & Mühlaupt, R. (2017). Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Liu, Y. & Zhang, X. (2011). Metamaterials: A new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*, 40(5), 2494. <https://doi.org/10.1039/c0cs00184h>
- Lopes, A. J., MacDonald, E. & Wicker, R. B. (2012). Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 18(2), 129–143. <https://doi.org/10.1108/13552541211212113>
- Lopez, R. H. & Beck, A. T. (2012). Reliability-based design optimization strategies based on FORM: A review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(4), 506–514. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000400012>
- Lupton, D. (2017). „Both fascinating and disturbing“: Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism. In T. Schneider, K. Eli, C. Dolan & S. Ulijaszek (Hrsg.), *Digital Food Activism*. London: Routledge.
- Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D. & Wicker, R. B. (2014). 3D Printing for the rapid prototyping of structural electronics. *IEEE Access*, 2, 234–242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2311810>
- Marschall, H. (2016). Weiterbildungsangebote für Additive Manufacturing. In H. Marschall (Hrsg.), *Personal für die additive Fertigung* (S. 19–23). https://doi.org/10.1007/978-3-658-13307-8_6
- Marschall, H. & Steinberger, V. (2015). Einstieg in die dritte Dimension – 3D-Druck verändert die Weltwirtschaft und die Arbeitswelt. *Computer und Arbeit*, 24.(3), 4–10.
- Martin, J. H., Yahata, B. D., Hundley, J. M., Mayer, J. A., Schaedler, T. A. & Pollock, T. M. (2017). 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature*, 549, 365.
- Mattiuzzo, C. (2016). 3D-Druck: Chancen und Risiken [KAN-Brief]. Abgerufen 30. September 2019, von Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) website: <https://www.kan.de/publikationen/kanbrief/neue-technologien/3d-druck-chancen-und-risiken/>
- May, G., Stahl, B. & Taisch, M. (2016). Energy management in manufacturing: Toward eco-factories of the future – A focus group study. *Applied Energy*, 164, 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.044>
- ME Gesamtmetall. (2017). Bewährte Ausbildungsberufe an die Digitalisierung anpassen. Abgerufen 30. September 2019, von Pressemitteilungen website: <https://www.gesamtmetall.de/aktuell/pressemitteilungen/bewaehrte-ausbildungsberufe-die-digitalisierung-anpassen>
- ME Gesamtmetall, IG Metall, VDMA & ZVEI. (2017). *Agiles Verfahren Handlungsempfehlungen der Sozialpartner*. Abgerufen 30. September 2019, von Ausbildung und Qualifizierung für Industrie 4.0 – Den Wandel erfolgreich gestalten – website: https://www.gesamtmetall.de/sites/default/files/downloads/basispapier_agiles_verfahren_ersand_17-03-28.pdf

- Messe Erfurt GmbH. (2017). Petition an das Bundesministerium für Bildung und Forschung „Erfurter Erklärung“. Abgerufen 30. September 2019, von http://www.rapidtech-fabcon.de/fileadmin/fabcon2/2017/Dokumente/Erfurter_Bildungserkl%c3%a4rung_R%c3%becksendedokument.pdf
- Mitchell, S. J., Pandolfi, A. & Ortiz, M. (2014). Meta-concrete: Designed aggregates to enhance dynamic performance. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 65, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.01.003>
- Molitch-Hou, M. (2013). University of Southern California & the realization of 3D printed houses. Abgerufen 30. September 2019, von 3DPrintingIndustry – The authority on 3D Printing website: <https://3dprintingindustry.com/news/university-south-california-realization-3d-printed-houses-17632/>
- Momeni, F., Hassani.N, S. M. M., Liu, X. & Ni, J. (2017). A review of 4D printing. *Materials and Design*, 122, 42–79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>
- Monaghan, T., Capel, A. J., Christie, S. D., Harris, R. A. & Friel, R. J. (2015). Solid-state additive manufacturing for metallized optical fiber integration. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.05.032>
- Mou, C., Saffari, P., Li, D., Zhou, K., Zhang, L., Soar, R. & Bennion, I. (2009). Smart structure sensors based on embedded fibre Bragg grating arrays in aluminium alloy matrix by ultrasonic consolidation. *Measurement Science and Technology*, 20(3), 034013.
- Mukherjee, T., Zhang, W. & DebRoy, T. (2017). An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Computational Materials Science*, 126, 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.10.003>
- Murphy, S. V. & Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 32(8), 773–785. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>
- MX3D. (o. J.). Smart Bridge. Abgerufen 1. Oktober 2019, von Smart Bridge website: <http://mx3d.com/smart-bridge/>
- Neely, E. L. (2016). The risks of revolution: Ethical dilemmas in 3D printing from a US perspective. *Science and Engineering Ethics*, 22(5), 1285–1297. <https://doi.org/10.1007/s11948-015-9707-4>
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- Ocylok, S., Weisheit, A. & Kelbassa, I. (2010). Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection. *Physics Procedia*, 5, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.157>
- Paz, J. F. I., Wilbig, J., Aumund-Kopp, C. & Petzoldt, F. (2014). RFID transponder integration in metal surgical instruments produced by additive manufacturing. *Powder Metallurgy*, 57(5), 365–372. <https://doi.org/10.1179/1743290114Y.0000000112>
- Perez, K. B. & Williams, C. B. (2014). Design considerations for hybridizing additive manufacturing and direct write technologies. *V004T06A005*. <https://doi.org/10.1115/DETC2014-35408>
- Petch, M. (2017, November 22). Trends in additive manufacturing for end-use production with autodesk. Abgerufen 1. Oktober 2019, von 3D Printing Industry website: <https://3dprintingindustry.com/news/trends-additive-manufacturing-end-use-production-autodesk-124979/>
- Petersen, W. & Wehmeyer, C. (2003). Aufgedeckt: IT-Arbeitsprozesse und Ausbildung in der Betriebspraxis [Eine bundesweite Studie im Auftrag des Bundesinstituts für Berufsbildung BiBB]. Abgerufen 1. Oktober 2019, von biat – Berufsbildungsinstitut Arbeit und Technik website: <https://docplayer.org/3828907-Aufgedeckt-it-arbeitsprozesse-und-ausbildung-in-der-betriebspraxis.html>
- Petschow, U., Ferdinand, J.-P., Dickel, S., Flämig, H. & Steinfeldt, M. (Hrsg.). (2014). Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit: Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0 (Neue Ausgabe). Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin.
- Pfeiffer, S., Lee, H., Zirnic, C. & Suphan, A. (2016). Industrie 4.0 - Qualifizierung 2025. Abgerufen 1. Oktober 2019, von https://www.vdma.org/documents/105628/19302314/Deutsche%20Kurzfassung_Management%20Summary_Industrie%204.0_Qualifizierung%202025_1501584166060.pdf/34506f27-9ed3-4458-af29-900502fd76ff
- Pohlemann, K. (2017). 3D Innovation Center an der Andreas-Gordon-Schule Erfurt. Gehalten in Erfurt.
- PROFIT Projekt. (2017). Abgerufen 1. Oktober 2019, von PROFIT website: <http://www.profit.de/projekt>
- Priarone, P. C. & Ingarao, G. (2017). Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*, 144, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.165>
- Richard, H. A., Schramm, B. & Zipsner, T. (Hrsg.). (2017). Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Richter, S. & Wischmann, S. (2016). Additive Fertigungsmethoden – Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung. Berlin: Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0 iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.
- Ritter, A. (2007). Smart Materials in Architektur, Innenarchitektur und Design. Basel: Birkhäuser.
- Roca, D., Yago, D., Cante, J., Lloberas-Valls, O. & Oliver, J. (2019). Computational design of locally resonant acoustic metamaterials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 161–182. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.10.037>
- Rübenach, I. M. & Käfer, S. (2017). Die Risiken in der additiven Fertigung. Abgerufen 1. Oktober 2019, von MM Maschinenmarkt Das Industrieportal website: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/die-risiken-in-der-additiven-fertigung-a-567250/>

- Schmauder, M., Höhn, K., Inga-Lisa Hilgers, Meyer, B. & Schreiber, S. (2018). 3-D-Druck: Praxisgrundlagen zu Produktsicherheit und Rechtsrahmen. <https://doi.org/10.21934/baua:bericht20181106>
- Schöllhammer, O., Volkwein, M., Kuch, B. & Hespings, S. (2017). Digitalisierung im Mittelstand – Entscheidungsgrundlagen und Handlungsempfehlungen. Abgerufen 1. Oktober 2019, von Fraunhofer IPA, Südwestmetall website: [https://www.suedwestmetall.de/SWM/medien.nsf/gfx/675B915E7CFE4873C125811400423276/\\$file/17-04-25-Studie_Suedwestmetall_Fraunhofer_IPA_2017_web_offen.pdf](https://www.suedwestmetall.de/SWM/medien.nsf/gfx/675B915E7CFE4873C125811400423276/$file/17-04-25-Studie_Suedwestmetall_Fraunhofer_IPA_2017_web_offen.pdf)
- Schöneberg, J., De Lorenzi, F., Theek, B., Blaeser, A., Rommel, D., Kuehne, A. J. C., Kiefling F., Fischer, H. (2018). Engineering biofunctional in vitro vessel models using a multilayer bioprinting technique. *Scientific Reports*, 8(1), 10430. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28715-0>
- Schumacher, A. (2013). Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen (Zweite, aktualisierte und erweiterte Auflage). Berlin: Springer Vieweg.
- Schwarz, H., Conein, S., Tutschner, H., Isenmann, M. & Schmickler, A. (2016). Voruntersuchung IT-Berufe [Abschlussbericht]. Abgerufen 17. Oktober 2019, von Bundesinstitut für Berufsbildung website: https://www.bibb.de/tools/dapro/data/documents/pdf/eb_42497.pdf
- Seemann, M. (2014). Das neue Spiel: Strategien für die Welt nach dem digitalen Kontrollverlust (Deutsche Erstausgabe). Freiburg: Orange-Press.
- Sissons, A. & Thompson, S. (2012). Three dimensional policy. London: Big Innovation Centre.
- SmarTech Analysis. (2018). 2019 additive manufacturing market outlook and summary of opportunities. Abgerufen von <https://www.smartechanalysis.com/reports/2019-additive-manufacturing-market-outlook/>
- Stahl, H. (2013). 3D printing – risks and opportunities. Abgerufen 1. Oktober 2019, von Öko-Institut e.V. website: <https://www.oeko.de/oekodoc/1888/2013-532-en.pdf>
- Stangenberg, F. (Hrsg.). (2009). Lifetime-oriented structural design concepts. Berlin: Springer.
- Statistisches Bundesamt (2018). Industrie 4.0: Roboter in 16 % der Unternehmen im Verarbeitenden Gewerbe. Abgerufen 12. Dezember 2019, von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/12/PD18_470_52911.html
- Stettes, O. (2018). Keine Angst vor Robotern. Beschäftigungseffekte der Digitalisierung – eine Aktualisierung früherer IW-Befunde [IW-Report]. Abgerufen 17. Oktober 2019, von Institut der deutschen Wirtschaft website: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2018/IW-Report_Beschaeftigungseffekte_Digitalisierung.pdf
- Tammam-Williams, S. & Todd, I. (2017). Design for additive manufacturing with site-specific properties in metals and alloys. *Scripta Materialia*, 135, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.030>
- Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y. & Wang, J. (2015). Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting. *JOM – The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 67(3), 555–563. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1300-4>
- TechShop. (o. J.). Abgerufen 1. Oktober 2019, von Wikipedia website: <https://en.wikipedia.org/wiki/TechShop>
- Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D. & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation. ACADIA 14: Design Agency. Gehalten auf der 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Los Angeles.
- Tocchetti, S. (2012, Juni). DIYbiologists as „Makers“ of personal biologies: How MAKE Magazine and Maker Faires contribute in constituting biology as a personal technology. Abgerufen 1. Oktober 2019, von Journal of Peer Production website: <http://peerproduction.net/issues/issue-2/peer-reviewed-papers/diybiologists-as-makers/>
- Töppel, T., Lausch, H., Brand, M., Hensel, E., Arnold, M. & Rotsch, C. (2018). Structural integration of sensors/actuators by laser beam melting for tailored smart components. *JOM – The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 70(3), 321–327. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2725-8>
- Trask, R. S., Williams, H. R. & Bond, I. P. (2007). Self-healing polymer composites: Mimicking nature to enhance performance. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2(1), P1–P9.
- TU Braunschweig. (2019). Entwicklung einer robotergestützten Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile. Abgerufen 2. Oktober 2019, von Generative Fertigung website: <https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/nth>
- TU Eindhoven. (2017). World's first 3D printed reinforced concrete bridge opened. Abgerufen 13. März 2018, von World's first 3D printed reinforced concrete bridge opened website: <https://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/news/17-10-2017-worlds-first-3d-printed-reinforced-concrete-bridge-opened/>
- Universität Duisburg Essen. (o. J.). SPP 2122 Materials for additive manufacturing. Abgerufen 2. Oktober 2019, von MATframe website: <https://www.uni-due.de/matframe/>
- UnternehmerTUM. (o. J.). Makerspace. Abgerufen 30. September 2019, von Unternehmertum website: <https://www.unternehmertum.de/makerspace.xhtml?lang=de>
- Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B. & Yang, S. (2013). Multiple material additive manufacturing – Part 1: A review. *Virtual and Physical Prototyping*, 8(1), 19–50. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.778175>
- VDI. (i. E.). VDI 3405 Blatt 6.2 Additive Fertigungsverfahren; Anwendersicherheit beim Betrieb der Fertigungsanlagen; Laser-Sintern von Polymerpulvern. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI. (1998). Voraussetzungen und Anwendungsschwerpunkte von Zuverlässigkeitsanalysen (Richtlinie Nr. VDI 4008). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI. (2014). Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen (Richtlinie Nr. VDI 3405). Berlin: Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI. (2015). VDI 3405 Blatt 3 Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.
- VDI. (2018a). Additive Fertigungsverfahren – Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen – Materialqualifizierung (Richtlinie Nr. 3405 Blatt 1.1). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.

- VDI. (2018b). VDI 3405 Blatt 6.1 Additive Fertigungsverfahren – Anwendersicherheit beim Betrieb der Fertigungsanlagen – Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern. Düsseldorf.
- Visconti, R. P., Kasyanov, V., Gentile, C., Zhang, J., Markwald, R. R. & Mironov, V. (2010). Towards organ printing: Engineering an intra-organ branched vascular tree. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 10(3), 409–420. <https://doi.org/10.1517/14712590903563352>
- Vittur, E. (1996). Einführung der CAD-Technik im Bauwesen und der Wandel der Anforderungen an die Berufsschule. Kassel: Universität Kassel.
- Walz, J.-D. (2014). Kostengünstige Prothesenherstellung durch FDM-Druck. Abgerufen 2. Oktober 2019, von Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA website: https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2014-09-10_kostenguenstige-prothesenherstellung-durch-fdm-druck.html
- Wang, Z., Baker, I., Cai, Z., Chen, S., Poplawsky, J. D. & Guo, W. (2016). The effect of interstitial carbon on the mechanical properties and dislocation substructure evolution in Fe_{40.4}Ni_{11.3}Mn_{34.8}Al_{7.5}Cr₆ high entropy alloys. *Acta Materialia*, 120, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.072>
- Wietek, B. (2010). *Stahlfaserbeton: Grundlagen und Praxisanwendung; Mit 26 Tabellen (Zweite, überarbeitete Auflage)*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner.
- Xia, L. (2016). *Multiscale structural topology optimization*. London: ISTE Press.
- Yang, F., Zhang, M. & Bhandari, B. (2017). Recent development in 3D food printing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(14), 3145–3153. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1094732>
- Yang, L., Cormier, D., West, H., Harrysson, O. & Knowlson, K. (2012). Non-stochastic Ti–6Al–4V foam structures with negative Poisson's ratio. *Materials Science and Engineering: A*, 558, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.053>
- Zaepernick, N. (2014). Es gibt nicht den einen 3D-Druck. Abgerufen 2. Oktober 2019, von <http://www.elektroniknet.de/markt-technik/elektronikfertigung/es-gibt-nicht-den-einen-3d-druck-113163.html>
- Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N., Israeli, D., Rothschild, D., Weinberger, A., ... Segal, E. (2015). Personalized nutrition by prediction of glycemic responses. *Cell*, 163(5), 1079–1094. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.11.001>
- ZEIT ONLINE, AP, ces. (2018). Schusswaffen: US-Firma verkauft Baupläne für Waffen aus 3D-Drucker. Abgerufen 28. Februar 2019, von ZEIT ONLINE website: <https://www.zeit.de/politik/ausland/2018-08/schusswaffen-usa-3d-drucker-bauplaene-verkauf>
- Zika, G., Schneemann, C., Grossmann, A., Kalinowski, M., Maier, T., Mönning, A., ... Wolter, M. I. (2019). BMAS-Prognose „Digitalisierte Arbeitswelt“ [Forschungsbericht]. Abgerufen 18. Oktober 2019, von <http://www.iab.de/185/section.aspx/Publikation/k190529301>
- Zuniga, J. M., Peck, J., Srivastava, R., Katsavelis, D. & Carson, A. (2016). An open source 3D-printed transitional hand prosthesis for children: *Journal of Prosthetics and Orthotics*, 28(3), 103–108. <https://doi.org/10.1097/JPO.000000000000097>

8 Mitglieder der Arbeitsgruppe „Additive Fertigung“

Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl	Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden / Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik
Jun.-Prof. Dr. Sascha Dickel	Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Soziologie
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler	Technische Universität Berlin, Lehrstuhl für Wirtschafts-, Unternehmens- und Technikrecht
Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer	Universitätsklinikum RWTH Aachen, Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung (ZWBf)
Prof. Dr. Peter Gumbsch	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg / Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialien Computational Materials Science (IAM/CMS)
Prof. Dr.-Ing. Dr. e.h. Dietrich Hartmann	Ruhr-Universität Bochum, Institut für Ingenieurinformatik im Bauwesen
Prof. Dr. Markus Hilgert	Kulturstiftung der Länder
Prof. Dr. Dr. Rafaela Hillerbrand	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Prof. Dr. Reto M. Hilty	Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerbsrecht, München / Universität Zürich & Ludwig-Maximilians-Universität München
Dr. Eric Jäggle	Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf / Universität der Bundeswehr München
Dr.-Ing. Dirk Lehmus	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen
Prof. Dr. Sabine Maasen	Technische Universität München, Munich Center for Technology in Society (MCTS)
Prof. Dr. Ernst Mayr	Technische Universität München, Lehrstuhl für Effiziente Algorithmen, Institut für Informatik
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Peukert	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Feststoff- und Grenzflächenverfahrenstechnik
Prof. Dr.-Ing. Dierk Raabe (Sprecher)	Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf / RWTH Aachen
Prof. Dr. Frédéric Thiesse	Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Center for Digital Fabrication (CEDIFA)
Prof. Dr. Brigitte Vollmar	Universität Rostock, Institut für Experimentelle Chirurgie

Gast

Prof. Dr. Sigmar Wittig, ML, acatech	Karlsruher Institut für Technologie
--------------------------------------	-------------------------------------

Redaktion

Dr. Elke Witt	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Dr. Christian Anton	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

9 Gutachterinnen und Gutachter

Wir danken den Gutachterinnen und Gutachtern für ihre Korrekturen und Hinweise. Diese haben zur Verbesserung der Stellungnahme beigetragen.

Prof. Dr. Stephan Barcikowski	Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet für Technische Chemie I und Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE)
Prof. Dr.-Ing. Karl Beucke	Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar
Prof. Dr.-Ing. Carolin Körner	Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, FAU Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Volker Schöppner	Universität Paderborn, Fachgebiet für Kunststofftechnik
Prof. Dr. Ingo Schulz-Schaeffer	Institut für Soziologie, TU Berlin
Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz	Lehrstuhl für Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik, Universität Rostock
Prof. Dr. Günther Meschke	Lehrstuhl für Statik und Dynamik, RU Bochum

10 Dank

Wir danken den Expertinnen und Experten, die an verschiedenen Kapiteln der Stellungnahme entscheidend mitgewirkt haben:

In Kapitel 3.4:

- Claus Aumund-Kopp,
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen

- Dr.-Ing. Gerrit Dumstorff,
Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS), Universität Bremen

- Dr. Volker Zöllmer,
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen

In Kapitel 4.3:

- David Seibt

In Kapitel 5.2:

- Herbert Marschall,
Institut für Berufs- und Weiterbildung (IBW), Universität Duisburg-Essen

Ausgewählte Publikationen der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

2019

Fortpflanzungsmedizin in Deutschland – für eine zeitgemäße Gesetzgebung

ISBN: 978-3-8047-3423-4

Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik

ISBN: 978-3-8047-3917-8

2018

Privatheit in Zeiten der Digitalisierung

ISBN: 978-3-8047-3642-9

Artenrückgang in der Agrarlandschaft

ISBN: 978-3-8047-3932-1

Künstliche Photosynthese

ISBN: 978-3-8047-3644-3

2017

Verbraucherpolitik für die Energiewende

ISBN: 978-3-8047-3666-5

Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung

ISBN: 978-3-8047-3664-1

Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung

ISBN: 978-3-8047-3668-9

Social Media und digitale Wissenschaftskommunikation: Analyse und Empfehlungen zum Umgang mit Chancen und Risiken in der Demokratie

ISBN: 978-3-8047-3631-3

Promotion im Umbruch

ISBN: 978-3-8047-3633-7

2016

Additive Fertigung

ISBN: 978-3-8047-3676-4

Wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung bevölkerungsweiter Längsschnittstudien

ISBN: 978-3-8047-3552-1

2015

Mit Energieszenarien gut beraten

ISBN: 978-3-8047-3507-1

Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050

ISBN: 978-3-8047-3503-3

Chancen und Grenzen des *genome editing*

ISBN: 978-3-8047-3493-7

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

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.

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

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

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

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 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.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft dient der Wissenschaft in allen ihren Zweigen durch die finanzielle Unterstützung von Forschungsaufgaben und durch die Förderung der Zusammenarbeit unter den Forscherinnen und Forschern.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-4064-8