



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

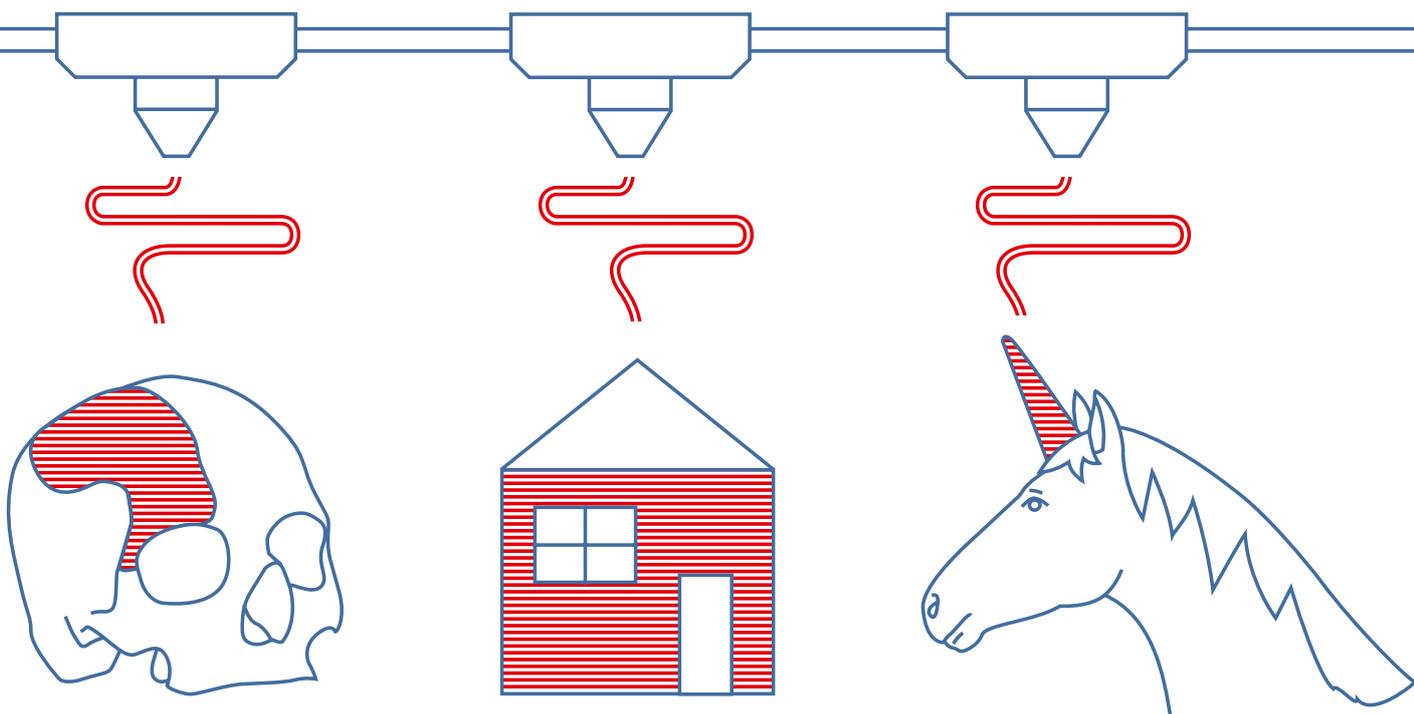


2020

Kurzfassung der Stellungnahme

Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften



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.

Zitervorschlag

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).

Stand

Februar 2020

Zusammenfassung

Mithilfe additiver Fertigungstechnologien lassen sich Objekte in nahezu jeder gewünschten dreidimensionalen Form erzeugen. Verarbeitet werden bei einem solchen Herstellungsvorgang unterschiedlichste Materialien. Das Spektrum reicht dabei von Kunststoffen über Metalle und organische Gewebe bis hin zur Keramik. Die Herstellung eines Objekts erfolgt durch wiederholten Auftrag des eingesetzten Materials nach einer zuvor definierten computergestützten Objektbeschreibung.

Die Additive Fertigung bietet damit eine vergleichsweise einfache Möglichkeit, Objekte mit einer filigranen Innenstruktur oder komplexer Formgebung zu erzeugen. Zudem erlauben es additive Technologien, ohne großen Aufwand und daher schnell und kosteneffizient individualisierte, kundenspezifische Produkte anzufertigen.

Aufgrund solcher Vorteile hat sich die Additive Fertigung bereits in vielen verschiedenen Anwendungsfeldern wie dem Werkzeugbau, der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrt fest etabliert. Gleichwohl steht die neue Technologie erst am Anfang ihrer Möglichkeiten. Zahlreiche Verfahren, Prozesse und Materialien für weitere Anwendungsfelder befinden sich gegenwärtig noch in der Entwicklung, dürften die Kultur der industriellen Produktion zukünftig aber tiefgreifend und nachhaltig verändern.

Eine technologisch und wirtschaftlich erfolgreiche Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren stellt besondere Anforderungen an Grundlagen- und Anwendungsforschung, denen möglichst frühzeitig und strategisch zu begegnen ist. Neue Herausforderungen für Entwicklung und Forschung ergeben sich außerdem aus der Perspektive zukünftiger Anwendungsfelder. Und auch mit Blick auf mögliche gesellschaftliche Auswirkungen einer Ausweitung der Additiven Fertigung in Produktion und Anwendung braucht es bereits im Vorfeld entsprechende Weichenstellungen, um ihre Potenziale ausschöpfen, Sicherheit gewährleisten und die Akzeptanz der Technologie fördern zu können.

Die Additive Fertigung kann für Gesellschaft, Industrie und Handwerk völlig neue Produktionsmöglichkeiten eröffnen, kann Produkte mit neuen, verbesserten Eigenschaften hervorbringen, günstigere und nachhaltigere Produktionswege bahnen oder individuell zugeschnittene Gebrauchsgegenstände erzeugen. Um dieses Potenzial zukünftig nutzen zu können, bedarf es verschiedener geeigneter Maßnahmen. Aus diesem Grund sprechen die Akademien Empfehlungen aus, die dazu dienen sollen, die Entwicklung auf den drei Ebenen

- i) Forschung und Technologie-Entwicklung entlang der gesamten Prozesskette,
- ii) Forschung und Entwicklung zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete und
- iii) Integration der Technologie in die Gesellschaft

weiter zu befördern.

(i) Empfehlungen für Forschung und Technologie-Entwicklung entlang der gesamten Prozesskette

Der Prozess der Additiven Fertigung umfasst die folgenden vier aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte:

- i) **Aufbau der digitalen Objektbeschreibung.** Zunächst wird ein digitales Modell erstellt, das allen Anforderungen an das Endprodukt entspricht (z. B. Materialeigenschaften, Gewicht, Stabilität, Oberflächenbeschaffenheit). Anschließend wird das digitale Modell in ein Austauschdatenformat übertragen.
- ii) **Planung und computergestützte Simulation des additiven Fertigungsprozesses.** Lage und Orientierung des zu fertigenden Objekts innerhalb des Arbeitsraums werden definiert. Außerdem wird die Fertigungsstrategie festgelegt (Energieeintrag, Art des Materialauftrags, Stützstrukturen etc.).
- iii) **Additive Objektherstellung und Nachbereitung.** Die Herstellung des Objekts erfolgt nach der im digitalen Modell festgehaltenen Planung. Je nach Material kommen dabei unterschiedliche Fertigungsverfahren zum Einsatz (z. B. Pulverbett-Schmelzen, Strangablege-Verfahren oder Binder-Druck). Im Anschluss an den Herstellungsvorgang erfolgt die Nachbearbeitung (z. B. Entfernung der Stützstrukturen, Nachbearbeitung oder Beschichtung der Oberflächen).
- iv) **Prüfung der Objektqualität.** Aufgrund der individualisierten Fertigung ist die Nachvollziehbarkeit und Kontrolle der additiven Produktion von großer Bedeutung, ebenso wie die Dokumentation der erreichten Objektqualität. Die Qualität eines additiv gefertigten Produkts hängt dabei stark vom Verlauf des Herstellungsvorgangs ab. Die Qualitätskontrolle umfasst beispielsweise die Einhaltung der geometrischen Genauigkeit, die Sicherstellung der Funktionalität und die Gewährleistung der Oberflächengüte.

Um additive Fertigungsverfahren für eine breitere Anwendung zu qualifizieren, muss die hier dargestellte Prozesskette weiter optimiert werden. Aus diesem Grund empfehlen die Akademien, Forschung und Entwicklung additiver Technologien sowie ihre Überführung in die industrielle Anwendung insbesondere in den folgenden Bereichen voranzutreiben.

1. Empfehlungen zur Entwicklung von Simulationsmethoden und Software

Simulationsmethoden und Softwarelösungen werden zum Aufbau der digitalen Objektbeschreibung und zur Planung des Fertigungsprozesses sowie zur Prüfung der Objektqualität benötigt. Die Handhabung der aktuell zu diesem Zweck zur Verfügung stehenden Software erfordert allerdings in der Regel ein hohes Maß an Grundlagenwissen und interdisziplinärer Expertise sowie leistungsfähige Hardware. Um die verschiedenen Technologien der Additiven Fertigung für neue Komplexitätsstufen innerhalb der industriellen und kommerziellen Anwendung zu erschließen, ist es notwendig, Softwarelösungen zur Erstellung präziser digitaler Modelle weiterzuentwickeln und einem breiten Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen.

Es wird daher empfohlen, bei der Erforschung und Entwicklung von Software die folgenden Schwerpunkte zu setzen:

(a) Erhöhung der Praxisorientierung in der Softwareentwicklung

Damit die Additive Fertigung in größerem Maße als bisher zur Anwendung kommen kann, ist es erforderlich, die Planung additiver Produktionsvorgänge effizienter und die Handhabung der Verfahren intuitiver zu gestalten. Große Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der **Entwicklung von End-to-End-Lösungen** zuzumessen, die eine durchgängig digitale und konsistente Prozesskette etablieren. Solche Lösungen sollten sämtliche Anforderungen der Additiven Fertigung (von Strukturoptimierung und Produktmodellierung über Datenaufbereitung und formatierung für 3D-Druck-Maschinen und Materialentwicklung bis hin zu Reparatur und Entsorgung im Sinne eines Lifecycle-Managements) berücksichtigen. Um das simulierte Materialverhalten, den Prozessverlauf und die Prozessstabilität validieren zu können, sollten darüber hinaus **Methoden zur Prozessbeobachtung** implementiert werden, die eine Rückkopplung mit den simulativen Vorhersagen ermöglichen. Dabei ist möglichst das gesamte sogenannte Daten-Tripel aus digitalen 3D-Modellen, Werkstoffrezepturen und Prozessparametern innerhalb der Software zusammenzuführen.

Um die **Fertigungsvorbereitung und Nachbearbeitung besser zu verzahnen**, sollte die technologische Entwicklung von Volumenmodellierungsverfahren, die den Zuwachs an Geometrie durch das Extramaterial berücksichtigen und sich in die Simulationssoftware integrieren lassen, künftig intensiviert werden. Die Simulationssoftware sollte ihrerseits darauf ausgerichtet sein, die gesamte Prozesskette der Additiven Fertigung abzubilden. Zudem sind die Möglichkeiten zur entfernten Objekterzeugung, die einen der wesentlichen Vorteile der Additiven Fertigung darstellen, zukünftig auszuweiten. Hierfür braucht es Steuerungsprozesse, die im Hinblick auf die **Realisierung der dezentralen Anwendbarkeit und Steuerung** additiver Technologien im Sinne eines „Computational Steering“ optimiert werden. Gemeint ist damit ein Steuerungsprinzip, das es erlaubt, noch während des Fertigungsprozesses interaktiv in vorgegebene algorithmische Abläufe einzugreifen, um bereits gültige Eingaben („Input“) gezielt zu modifizieren. Wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der genannten Maßnahmen und die flächendeckende Nutzbarkeit additiver Technologien ist schließlich eine **Beschleunigung der Rechenprozesse**, wobei Software und Hardware entsprechend der Bedarfe der Additiven Fertigung aufeinander abgestimmt werden müssen.

(b) Erweiterung der Modellierungsoptionen

Um das Spektrum der Möglichkeiten zur digitalen Modellierung von Objekten für komplexere Verfahren (z. B. Multimaterialanwendungen) zu erweitern, sollte künftig die Entwicklung von sogenannten **voxelorientierten Modellierungen** vorangetrieben werden. Mithilfe solcher Modellierungen lässt sich der innere Aufbau eines Objekts – selbst bei komplexen dreidimensionalen Gebilden mit Aussparungen und Überhängen oder bei filigranen Strukturen mit Leerstellen – realitätsnah und effizient beschreiben.

Darüber hinaus wird empfohlen, **Grundlagen für die Entwicklung neuer materialbezogener Berechnungsalgorithmen zu schaffen**. Dabei geht es konkret darum, die physikalisch-chemischen bzw. physikalisch-biologischen Vorgänge während der additiven Herstellung quantitativ zu beschreiben und die physikalischen Vorgänge der Materialverbindung – etwa beim Schmelzen und Sintern – sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch besser nachzuvollziehen. Erforderlich sind solche Maßnahmen, um die physikalischen Parameterwerte der Fertigungsmaschinen adaptiv und situationsbezogen einstellen zu können.

2. Empfehlungen zur Normung und Prüfung

Bei additiven Fertigungsverfahren sind die Phasen der Materialherstellung und der Formgebung prinzipiell nicht voneinander zu trennen. Deshalb hängt die Qualität eines additiv gefertigten Produkts stets in hohem Maße vom Verlauf des Herstellungsvorgangs ab. Falsch gewählte Produktionsparameter können so beispielsweise zu einer unzureichenden Dichte und Oberflächenqualität des entsprechenden Bauteils oder zu hohen mechanischen Eigenspannungen führen, was mangelhafte Festigkeit verursachen kann. Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf Fragen der Sicherheit, Qualitätssicherung und Produkthaftung ist daher zu beachten, dass auf jeder der vier Ebenen des oben erläuterten Fertigungsprozesses eine Qualitätskontrolle stattfindet. In der Additiven Fertigung ist Qualitätssicherung somit systemisch, also als integrative Komponente der gesamten Fertigungskette zu denken.

Eine solche systemisch angelegte Qualitätssicherung erfordert allerdings Standards und Normen. Um adäquate Normen und Qualitätssicherungsprozesse in der Additiven Fertigung etablieren zu können, sind Anpassungsmaßnahmen in verschiedenen Bereichen notwendig:

(a) Anpassung der Normen und Bemessungskonzepte

Die in der Produktion allgemein **geltenden Normen und Richtlinien sind an die Erfordernisse der Additiven Fertigung** in all ihren Anwendungsbereichen anzupassen, ggf. auch neu zu strukturieren oder sogar neu zu fassen. Aufgrund der Komplexität der Fertigungsbedingungen und der möglichen Individualität der Produkte ist zudem die Gestaltung andersartiger oder zusätzlicher Nachweisformate zur Erfüllung der Normen erforderlich. Es wird in diesem Zusammenhang ausdrücklich empfohlen, die **aus dem Design- und Bemessungsprozess resultierenden Anforderungen an Bauteileigenschaften direkt in die Fertigungsparameter einfließen zu lassen**. Auf diese Weise lassen sich die Qualitätsansprüche gegenüber einem spezifischen Bauteil nach dessen konkreter Belastung in der Anwendungsrealität formulieren. Darüber hinaus bedarf es zudem **auf die Additive Fertigung angepasste Bemessungskonzepte**, die die Regeln für die Dimensionierung von Bauteilen vorgeben.

(b) Anpassung der Bewertungsansätze und Methoden

Sowohl die Entwicklung als auch der Einsatz von Methoden, die durch **Co-Simulationen und Co-Optimierungen in Simulationsmodellen** ein effizientes „Systems Engineering“ ermöglichen und so die ganzheitliche Betrachtung von Produktlebenszyklen erlauben, sind künftig voranzutreiben. Die hierfür erforderlichen Informations- und Kommunikations- bzw. Softwaresysteme verlangen die Definition geeigneter Schnittstellen für den Datenaustausch, deren Formate zunächst in Richtlinien, später in Normen festzuschreiben sind. Auch in diesem Zusammenhang gilt es, **Forschung zur Softwareentwicklung zu stärken und zu vernetzen**.

(c) Forschung und Entwicklung zur Materialsicherheit

Gegenwärtig wird in der Additiven Fertigung intensiv an der Entwicklung von Materialien mit optimiertem Eigenschaftsprofil geforscht. Bisher ist das Werkstoffverhalten unter zyklischer Beanspruchung (Betriebsfestigkeit) allerdings noch nicht ausreichend untersucht, sodass eine sichere und zuverlässige Bauteilfunktion und -integrität im Rahmen additiver Fertigungsprozesse nicht immer zu gewährleisten ist. Daher bedarf es im Bereich der **Materialsicherheit verstärkter Forschungsbemühungen**.

3. Empfehlungen zur Entwicklung neuer Materialien

Die große Vielfalt additiver Fertigungsprozesse, die bereits heute zur Verfügung steht, erfordert eine ebenso große Vielfalt verwendbarer Materialien, da jeder Fertigungsprozess für unterschiedliche Materialklassen entwickelt wurde. Die Forschung zur Optimierung von Werkstoffen und Verfahren steht allerdings erst am Anfang. Daher wird der überwiegende Teil additiv hergestellter Bauteile bislang noch mit einer verhältnismäßig kleinen Anzahl etablierter Materialien produziert. Neue Materialien zu entwickeln, sie gemeinsam mit den korrespondierenden Prozessen zu zertifizieren und im Markt zu etablieren, ist üblicherweise mit hohem Zeitaufwand verbunden. Um die Entwicklung von geeigneten Materialien voranzutreiben, wird empfohlen, die **Forschung zur effizienten Herstellung und Verarbeitung neuer Werkstoffe und Multimaterialien zu intensivieren**. Zudem braucht es geeignete Softwareanwendungen zur Simulation der Materialeigenschaften während des Herstellungsvorgangs, die bislang ebenfalls nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Essenziell ist in diesem Zusammenhang, bei Anwenderinnen und Anwendern das **Bewusstsein für die gegenseitige Beeinflussung von Material und Prozess zu stärken**. Eine verbesserte Kommunikation zwischen Anlagen- und Materialherstellern könnte außerdem dazu beitragen, den Fertigungsprozess realitätsnah in die modellbasierte Prognose der Material- und Struktureigenschaften einzubeziehen. Erforderlich ist schließlich, **Standards für die Vor- und Nachbereitung** auch mit Blick auf die verwendeten Materialien und deren Handhabung zu schaffen.

4. Empfehlungen zur Entwicklung multifunktionaler Bauteile

Mithilfe additiver Fertigungstechnologien ist es möglich, Produkte mit neuen Funktionalitäten auszustatten. Ermöglicht werden solche Funktionalitäten durch die Integration funktionaler Werkstoffe und Komponenten in Oberfläche oder Volumen eines Bauteils. Die einfachste Form einer derartigen Funktionalisierung stellen passive Lösungen dar, die dem Bauteil funktionale Eigenschaften mittels einer bestimmten Materialkombination und/oder mithilfe einer entsprechenden inneren Strukturierung verleihen. Eine weitergehende Funktionalisierung lässt sich zudem mithilfe elektronischer Komponenten (z. B. Sensoren, Aktoren, Energiespeicher, Signal- und Datenverarbeitung, Kommunikation etc.) sowie durch deren Kombination zu bauteilintegrierten elektronischen Systemen erreichen. Als weitere Variante multifunktionaler Bauteile sind die Produkte des sogenannten 4D-Drucks zu sehen, bei denen die endgültige Bauteilgeometrie durch einen nachfolgenden, beispielsweise thermisch initiierten Formänderungsvorgang bestimmt wird.

Um die funktionalen Möglichkeiten für additiv gefertigte Bauteile zu erhöhen und damit deren Einsatzmöglichkeiten zu erweitern, wird empfohlen, die **technologische Entwicklung von Werkstoffen zur Sensorintegration in Metalle voranzutreiben**, die **Integrationsdichte gedruckter Elektronik zu optimieren** und die **Entwicklung prozessfähiger Funktionsmaterialien mit optimierten Verarbeitungs- und Nutzungseigenschaften zu intensivieren**. Dieser Prozess sollte regulatorisch zudem unterstützt werden, indem die **Translationsprozesse zur Beschleunigung der Integration von Sensorik in der Additiven Fertigung und deren wirtschaftlicher Einsatz gefördert werden**.

(ii) Empfehlungen für Forschung und Entwicklung zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete der Additiven Fertigung

Die Additive Fertigung wird nach ihrem Einzug in die industrielle Produktion in zahlreiche weitere Anwendungsbereiche vordringen und die dort etablierten Prozesse grundlegend verändern. Im Folgenden wird anhand fünf verschiedener Anwendungsfelder exemplarisch aufgezeigt, welche Nutzenpotenziale sich mithilfe der Additiven Fertigung gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren realisieren lassen. Damit verbunden ist die Formulierung von Empfehlungen zur gezielten Weiterentwicklung der entsprechenden Anwendungsfelder.

1. Empfehlungen zur weiteren Etablierung der Additiven Fertigung in der Medizin

Es ist 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“, also des 3D-Drucks von körpereigenen Zellen zur Herstellung von Gewebeersatz. Um dieses enorme Potenzial additiver Fertigungstechnologien für die medizinische Anwendung und Forschung möglichst rasch zu entfalten, sollten die Bereiche Forschung und Translation, Rechtssicherheit und Kommunikation künftig besonders gestärkt werden. Zu diesem Zweck wird empfohlen, die **Grundlagenforschung zu stärken**. Ziel der Forschung ist es dabei, die komplexen organischen Zusammenhänge, die einer Erzeugung von funktionalen Geweben und Organteilen zugrunde liegen, so weit zu entschlüsseln, dass neue technologische Ansätze im Bereich des „Bioprinting“ entwickelt werden können. In der Anwendung **ist der Einsatz additiv gefertigter Medizinprodukte klinisch und rechtlich sicher zu gestalten**. Dies kann beispielsweise mittels gesetzlich geregelter Zertifizierungsmaßnahmen erfolgen. Außerdem ist zu gewährleisten, dass den Entwicklerinnen und Entwicklern von neuartigen medizinischen Produkten und Verfahren eine **Erzeugersicherheit gewährleistet** wird, beispielsweise durch Regelungen des Patentschutzes. Um die Akzeptanz und das Vertrauen von Patientinnen und Patienten gegenüber additiven Technologien in der Medizin langfristig zu stärken, **sind die realistischen Nutzungspotenziale der Additiven Fertigung und ihre Zeithorizonte transparent zu kommunizieren**.

2. Empfehlungen zur Additiven Fertigung im Bauwesen

Im Bereich der Architektur sind additive Fertigungstechnologien zur Anfertigung von Entwurfsmodellen für die Bauplanung bereits etabliert. Im Bereich der großen Skalen, insbesondere im Hoch- oder Brückenbau, sind gegenwärtig zudem intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten festzustellen, die sich zunehmend in Pilotprojekten manifestieren. Das große Potenzial

der Additiven Fertigung zielt in diesem Zusammenhang einerseits auf eine deutliche Steigerung der Produktivität im Bauwesen durch Verringerung von Handarbeit. Andererseits verspricht die nachhaltige Herstellung individualisierter Produkte mit integrierter Funktionalisierung eine umweltverträglichere kosteneffizientere und sicherere Bauweise. Um die Vorteile der Additiven Fertigung im Bauwesen zukünftig besser nutzen zu können, wird es allerdings 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 wirtschaftlich, im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren zudem konkurrenzfähig sind. Aus diesem Grund gilt es, die **Forschung im Baubetrieb und in der Bauverfahrenstechnik** zur Entwicklung und Bereitstellung großformatiger Maschinen und in der Robotik zu forcieren. Auf der anderen Seite sollte auch die **Baustoffforschung mit Fokus auf die Additive Fertigung intensiviert werden**, um die Entwicklung neuartiger, speziell auf die Additive Fertigung im Bauwesen abgestimmter Werkstoffe voranzutreiben. Zudem ist es erforderlich, **die digitale Transformation zu beschleunigen**, indem die Entwicklung bedarfsgerechter, dem Fortschritt der Additiven Fertigung angepasster Berechnungs- und Simulationsmethoden sowie entsprechend gekoppelter CAD-Basismodelle vorangetrieben wird. Außerdem ist auch die für das Bauwesen notwendige Logistik auf weitere Forschung angewiesen, um **günstige Standortbedingungen zu schaffen**. Schließlich sollte bereits frühzeitig geprüft werden, inwiefern die Regulierung der Baustoffe an die Bedingungen der Additiven Fertigung anzupassen ist, um **die Einhaltung bestehender Standards zu gewährleisten und neue zu entwickeln**.

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

Gegenwärtig spielt der 3D-Druck als Produktionstechnik im privaten Bereich noch keine nennenswerte Rolle. Eine stärkere Relevanz der entsprechenden Technologien ist zukünftig 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. 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. Somit eignen sich Desktop-3D-Drucker als Instrument der MINT-Förderung und Technikkommunikation. Damit die Potenziale der additiven Fertigungstechnologien auch im privaten Bereich stärker zur Geltung gebracht werden können, müssen ihre **Vorteile zur nachhaltigen und preiswerten Produktion von Einzelstücken stärker genutzt werden**. Zudem sollten **additive Technologien eingesetzt werden, um Technikakzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen**. Die Förderung von Orten und Institutionen (z. B. „Makerspaces“), die das technologische Equipment und Know-how für die Anwendung additiver Technologien zur Verfügung stellen und außerdem Vernetzungsmöglichkeiten bieten, dürfte in diesem Zusammenhang ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung sein.

4. Empfehlungen zur weiteren Nutzung der Additiven Fertigung im Bereich der Kulturgutpflege

Das große Nutzungspotenzial der Additiven Fertigung für verschiedene Bereiche des Kulturgutschutzes, etwa für die nachhaltige Kulturgutdokumentation, die Arbeit in kulturbewahrenden Einrichtungen (z. B. Museen) oder die Grundlagenforschung, zeigt sich bereits heute. Um dieses Potenzial zukünftig voll ausschöpfen zu können, sind allerdings verschiedene Heraus-

forderungen zu bewältigen. Das betrifft zunächst eine Intensivierung der Forschung in zwei Bereichen, konkret die **Weiterentwicklung von Hilfsmitteln zur Erfassung und Modellierung von Objekten** sowie die **Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien zum Einsatz originalgetreuer Materialien**. Essenziell hierfür ist es, sowohl den **interdisziplinären wissenschaftlichen Austausch und die Vernetzung** zwischen verschiedenen Fachbereichen der Kulturwissenschaften (z. B. Museologie bzw. Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft) auszubauen als auch den Dialog mit Expertinnen und Experten der Additiven Fertigung aus anderen Bereichen zu führen. Auch **internationale Partnerschaften sollten verstärkt gefördert** werden, um der gegenwärtig festzustellenden asymmetrischen Verfügbarkeit von 3D-Technologien in der Welt und der in dieser Hinsicht unzureichenden Kulturgutpflege auf internationaler Ebene entgegenzuwirken. Um eine langfristige Auswertbarkeit und Vergleichbarkeit der digitalen Modelle zu gewährleisten, ist es notwendig, **Verfahren zur Standardisierung digitaler Modelle international zu etablieren**. Da die Additive Fertigung mit Blick auf mögliche Fälschungsversuche im Anwendungsfeld der Archäologie auch Missbrauchsrisiken birgt, sollten zur **Absicherung der Unterscheidbarkeit von Original und Kopie** bei der Technologieentwicklung zudem möglichst frühzeitig entsprechende Überlegungen miteinbezogen werden.

5. Empfehlungen zur weiteren Etablierung additiver Verfahren in der Lebensmittelproduktion

Die additive Erzeugung von Nahrungsmitteln kann zur individualisierten Zusammenstellung von Nahrungsinhaltsstoffen verwendet werden und bietet damit Anwendungsmöglichkeiten für Menschen mit Lebensmittelunverträglichkeiten oder im Pflegebereich. Inwieweit der Mehrwert, den eine solche Herstellung bietet, einen großflächigen Einsatz zur Folge haben wird, ist gegenwärtig noch nicht abzusehen. Daher bedarf es der **Etablierung von Herstellungsnormen und Hygienestandards in der Additiven Fertigung** und weiterer Forschung zur Gewährleistung der **ernährungsphysiologischen Ausgewogenheit** additiv erzeugter Lebensmittel, um auf diese Weise entsprechende Potenziale ausloten, aber auch um mögliche Risiken identifizieren zu können.

(iii) Empfehlungen zur Ausgestaltung der Wechselwirkungen zwischen der Additiven Fertigung und der Gesellschaft

1. Empfehlungen zur Aufrechterhaltung von Akzeptanz und Akzeptabilität additiver Fertigungstechnologien

Durch die zunehmende Einführung additiver Fertigungsmethoden werden voraussichtlich viele verschiedene gesellschaftliche Bereiche berührt. Um die tendenziell bislang 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 soziale Kriterien wie das der Akzeptanz. Zu diesem Zweck ist künftig eine starke, interdisziplinär ausgerichtete **Begleitforschung zu etablieren**, die mithilfe von Szenarioanalysen eine Abschätzung langfristiger Technologiefolgen ermöglicht und dabei hilft. Die **Ergebnisse der Begleitforschung sollten in die Regulierung additiver Technologien einbezogen werden**.

2. Empfehlungen zur Anpassung der Arbeitswelt an die Anforderungen der Additiven Fertigung

Weitreichende Veränderungen im Zuge der künftigen Erschließung neuer Anwendungsfelder für die Additive Fertigung sind insbesondere für die Arbeitswelt zu erwarten. Neue Technologien beeinflussen die Arbeitswelt in mehrfacher Hinsicht. Sie erfordern entsprechende Kompetenzen und Qualifizierungsmaßnahmen, beeinflussen Berufsprofile, wirken sich auf Arbeitsbedingungen und -organisation aus und können den Arbeitsmarkt verändern. Um solchen Veränderungen frühzeitig begegnen zu können, wird empfohlen, die **Additive Fertigung und ihre Auswirkungen stärker in die berufliche Aus- und Weiterbildung zu integrieren**. Das betrifft gleichermaßen die wissenschaftliche Aus- und Weiterbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren wie die Berufsausbildung von Facharbeiterinnen und -arbeitern. Darüber hinaus sollte die **Additive Fertigung in Ausbildungsformaten des fertigenden Handwerks integriert werden**, um auf diese Weise auch dessen Innovationsfähigkeit zu stärken. 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. Daher sind die **bestehenden Angebote besser zugänglich zu machen**. Zudem sollte die **Vernetzung von beruflichen Schulen und Unternehmen intensiviert** und aktiv gefördert werden, um auf diese Weise den Erwerb von Wissen zur Additiven Fertigung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung zu erleichtern. Um die entsprechenden Bildungs- und Ausbildungsmaßnahmen besser an die dynamischen Entwicklungen am Arbeitsmarkt anpassen zu können, sollten **additive Fertigungsverfahren schließlich auch in der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung stärker berücksichtigt werden**.

3. Handlungsempfehlungen zum nachhaltigen Einsatz additiver Fertigungstechnologien

Auch die Frage der Nachhaltigkeit spielt eine wesentliche Rolle für den gesellschaftlichen Nutzen und die Akzeptanz der Additiven Fertigung. Additive Technologien haben 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 wahrscheinlich, dass sich auch künftig 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 Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Vielmehr müssen sämtliche vor- und nachgelagerten Prozess- und Transportschritte analysiert und mit konventionellen Prozessketten verglichen werden. Um in diesem Zusammenhang zu einer besseren Einschätzung zu gelangen, wird empfohlen, die **Daten zu Energie- und Materialverbrauch additiver Verfahren zu erfassen**. Um die Vorteile der additiven Produktionsverfahren im Sinne der Nachhaltigkeit künftig zudem besser nutzen zu können, sollte **Ressourcenschonung als Faktor in der Planung des Fertigungsprozesses berücksichtigt** werden. Schließlich sind die **bestehenden Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen auf additive Fertigungsverfahren auszuweiten**, wobei geschlossene Materialkreisläufe für alle im Zusammenhang mit der Additiven Fertigung genutzten Gefahrstoffe zum Standard werden sollten.

Mitwirkende der Arbeitsgruppe

Sprecher der Arbeitsgruppe: Prof. Dr.-Ing. Dierk Raabe (Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf); **Mitwirkende der Arbeitsgruppe:** Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl (Technische Universität Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer (Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden), Jun. Prof. Dr. Sascha Dickel (Johannes-Gutenberg-Universität Mainz), Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler (Technische Universität Berlin), Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer (Universitätsklinikum RWTH Aachen), Prof. Dr. Peter Gumbsch (Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg), Prof. Dr.-Ing. Dr. e.h. Dietrich Hartmann (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr. Markus Hilgert (Kulturstiftung der Länder), Prof. Dr. Dr. Rafaela Hillerbrand (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse), Prof. Dr. Reto M. Hilty (Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerbsrecht, München), Dr. Eric Jäggle (Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf), Dr. Ing. Dirk Lehmus (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen), Prof. Dr. Sabine Maassen (Technische Universität München), Prof. Dr. Ernst Mayr (Technische Universität München), Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Peukert (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr. Frédéric Thiesse (Julius-Maximilians-Universität Würzburg), Prof. Dr. Brigitte Vollmar (Universität Rostock); **Gast:** Prof. Dr. Sigmar Wittig (Karlsruher Institut für Technologie); **Wissenschaftliche Referentinnen und Referenten:** Dr. Elke Witt (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina), Dr. Christian Anton (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina)

Kontakt:

Dr. Elke Witt, Dr. Christian Anton
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft
Tel: +49(0)345 472 39 867
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org

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.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der Wissenschaften
Jägerberg 1 | 06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-867
Fax: (0345) 472 39-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2 | 55131 Mainz
Tel.: (06131) 218528-10
Fax: (06131) 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin