A close-up photograph of a 3D printer's nozzle printing a purple, textured hand model. The printer's metal frame and various mechanical parts are visible in the background, which is slightly out of focus. The hand model is positioned on a white platform.

Die Zukunft im Blick:
3D-Druck

Trendbericht zur
Abschätzung der
Umweltwirkungen

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 1.1: Grundsatzfragen, Nachhaltigkeits-
strategien und -szenarien, Ressourcenschonung
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Autoren:

Keppner, Benno; Kahlenborn, Walter; Richter, Stephan;
Jetzke, Tobias; Lessmann, Antje; Bovenschulte, Marc

Redaktion:

Fachgebiet I 1.1: Grundsatzfragen, Nachhaltigkeits-
strategien und -szenarien, Ressourcenschonung
Sylvia Veenhoff

Gestaltung:

stoffers/steinicke

Druck:

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Siehe Bilderverzeichnis (Kapitel 7)

Stand: Mai 2018 (der Trendbericht wurde inhaltlich bis Juli 2017 fertiggestellt)

ISSN 2363-832X (Internet)

ISSN 2363-8311 (Print)

Die Zukunft im Blick:

3D-Druck

**Trendbericht zur Abschätzung
der Umweltwirkungen**

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
1 Einführung	6
1.1 Hintergrund	6
1.2 Abgrenzung und Zielsetzung	7
1.3 Verwendete Methodik	8
1.4 Struktur	10
2 Trendbeschreibung	11
2.1 Entwicklung des 3D-Drucks	11
2.2 Prozesskette, Verfahren und Materialien im 3D-Druck	12
2.3 Markt 3D-Druck	16
2.4 Zentrale Akteure und Anwendungsfelder	18
3 Abschätzung der Be- und Entlastungen des 3D-Drucks	21
3.1 Direkte Umweltauswirkungen	21
3.2 Indirekte (Umwelt)auswirkungen	36
3.3 Identifizierung innovativer Charakteristiken	39
4 Fazit, Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen	45
4.1 Fazit: Abschätzung der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks	45
4.2 Handlungsempfehlungen für die Umweltpolitik und Forschungsbedarf	49
5 Anhang: Assessment Verfahren	52
6 Quellenverzeichnis	54
7 Bilderverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Suchanfragen für die Begriffe „additive manufacturing“, „3D printing“ und „3D-Druck“ bei Google	6
Abbildung 2:	Methodik zur Trendbeschreibung und -analyse	9
Abbildung 3:	Global verkaufte Desktop AM Systeme (< 5.000 \$) versus Industrielle AM Systeme	16
Abbildung 4:	Geschätzte gesamte Wachstumsraten für ausgewählte Branchen (2014–2020)	17
Abbildung 5:	Berufsprofile von 3D-Druckanwendern (N=700) in Unternehmen	18
Abbildung 6:	Branchenbezogene Nutzung des 3D-Drucks aktuell oder in den kommenden 3 Jahren	19
Abbildung 7:	Anwendungsbezogene Nutzung des 3D-Drucks aktuell oder in den kommenden 3 Jahren	19
Abbildung 8:	Zahl der Patentanmeldungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu 3D-Druck	20
Abbildung 9:	Facetten des 3D-Drucks	21
Abbildung 10:	Impact Assessment, Direkte Umweltauswirkungen, 3D-Druckverfahren	22
Abbildung 11:	Direkte Umweltauswirkungen, Abbau, Aufbereitung, Herstellung	27
Abbildung 12:	Direkte Umweltauswirkungen, Materialeigenschaften	28
Abbildung 13:	Direkte Umweltauswirkungen, Nutzung und Leistungsbereitstellung	30

1.1 Hintergrund

3-D-Druck wird nicht nur die Machtverhältnisse in der industriellen Fertigung neu definieren, sondern die Wirtschaftswelt als Ganzes erschüttern (Michler 2014)

Sei es ein 3D-gedrucktes bionisches Ohr... 3D-gedruckte Kuchendekoration... oder ein 3D-gedrucktes Traumhaus – der 3D-Druck revolutioniert jeden Lebensbereich (übersetzt nach Banerjee 2016)

Wir stehen kurz vor einem Umbruch – der 3D-Druck wird revolutionieren, wie wir über Produktionsverfahren denken (übersetzt nach Ruth 2016)

In der aktuellen Diskussion werden große Erwartungen in den 3D-Druck gesetzt. So wird die Technologie als möglicher Auslöser einer neuen industriellen Revolution gesehen (Berman 2012; Gershenfeld 2012), die ebenso weitreichende Veränderungen mit sich bringen könnte wie die Erfindung der Dampfmaschine, der Atomenergie, des Mikrochips oder des Internets (Campbell et al. 2011). Begründet wird dies mit den Charakteristiken des 3D-Drucks: eine völlig neue Designfreiheit und die Möglichkeit, Produkte schnell, einfach und individuell angepasst herzustellen. Innovationen könnten so ermöglicht und Ideen schneller realisiert werden.

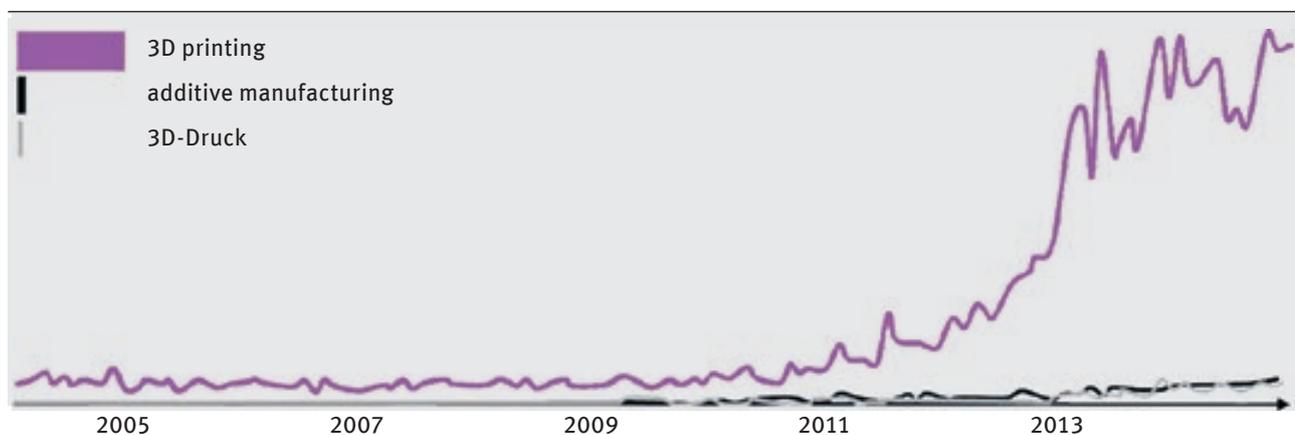
Mithilfe des 3D-Drucks können sehr komplexe Geometrien und innere Strukturen hergestellt werden, die mit den klassischen, subtraktiven (wie Drehen, Fräsen) und formativen (wie Gießen, Schmieden) Fertigungsverfahren

nicht oder nur unter Einsatz von Füge-technik (durch Kleben, Schweißen, Schrauben et cetera) möglich sind (Harhoff und Schnitzer 2015; stratasys Direct Manufacturing 2015). Neben den verfahrenstechnischen Vorteilen macht insbesondere die große Diversität an nutzbaren Materialien (Kunststoffe, Metalle, Keramiken, Beton, Gewebezellen et cetera) und deren Bandbreite an mechanischen, physikalischen, chemischen und gegebenenfalls physiologischen Eigenschaften den 3D-Druck interessant. Aus technischer Sicht ist der 3D-Druck damit in den unterschiedlichsten Bereichen einsetzbar.

Große Hoffnungen verbinden sich auch aus Umweltsicht mit dem 3D-Druck. So wird erwartet, dass dieses Verfahren zukünftig zu einer ökologisch nachhaltigeren Produktion beiträgt – beispielsweise durch Materialeinsparungen, Abfallvermeidung und neue Recyclingideen (Petrovic et al. 2011; Reeves et al. 2007). Beim 3D-Druck werden die Produkte Schicht für Schicht aufgebaut, wobei im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren kaum Abfall durch abgefrästes Material entsteht.² Durch neue Konstruktionsmöglichkeiten können z. B. im Fahrzeugbereich innovative Leichtbaustrukturen umgesetzt werden, so dass Autos und Flugzeuge weniger Treibstoff verbrauchen (Petschow 2014). Bei Kunststoffen gibt es Überlegungen, Abfälle (beispielsweise Siedlungsabfälle oder Gewerbeabfälle) als neues Druckmaterial zu recyceln. Außerdem können 3D-Druckgeräte flexibler aufgestellt werden, was eine weitere Globalisierung der Produktionsorte zur Folge haben könnte (vergleiche

Abbildung 1:

Suchanfragen für die Begriffe „additive manufacturing“, „3D printing“ und „3D-Druck“ bei Google¹



Quelle: eigene Darstellung (nach Google 2010)

¹Die Grafik stellt „keine absoluten Suchvolumenzahlen dar, da die Daten normalisiert sind und auf einer Skala von 0 bis 100 angezeigt werden“ (Google 2010).

²Abfall kann aber beispielsweise durch Stützstrukturen entstehen.

beispielsweise Gao et al. 2015). Jedermann kann durch den Kauf einer 3D-Druckvorlage Waren dort herstellen, wo sie unmittelbar gebraucht werden. Dadurch kann der Warentransport reduziert und als Folge davon der Ausstoß von CO₂-Emissionen gesenkt werden. Auch potentielle Auswirkungen für die Raumentwicklung (ländliche Räume) sind denkbar, wenn zunehmend vor Ort flexibel produziert wird.

Ob sich diese Erwartungen und Hoffnungen erfüllen, ist noch offen. Bisher werden in der Diskussion oft positive Effekte hervorgehoben, ohne den Trend 3D-Druck systematisch zu analysieren (Campbell et al. 2011; Berman 2012).³ Es fehlt eine zusammenfassende Darstellung direkter Umweltauswirkungen, die zurzeit nur partiell diskutiert werden. Indirekte Effekte werden bisher vor allem im Hinblick auf die gesellschaftliche oder wirtschaftliche Signifikanz aufgegriffen und noch wenig auf ihre Umweltrelevanz hin reflektiert. Das Innovationspotenzial dieser Zukunftstechnologie wird bisher mit einem Fokus auf technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Möglichkeiten hin diskutiert, ohne die möglichen Umweltwirkungen umfassend mitzudenken. Der vorliegende Trendbericht trägt zum Schließen dieser Lücken bei.

1.2 Abgrenzung und Zielsetzung

Insgesamt betrachtet sind die zukünftigen Umweltauswirkungen des 3D-Drucks von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig, angefangen von der Art des 3D-Druckers sowie des eingesetzten Druckmaterials über die Art der Nutzung für verschiedenste industrielle und private Anwendungen bis hin zur Bereitstellung von Leistungen, die für die Nutzung des 3D-Drucks nötig sind – wie beispielsweise den Transport der Druckmaterialien. Der Trendbericht nimmt diese unterschiedlichen Elemente des 3D-Drucks in den Blick und analysiert, inwieweit hierdurch Be- oder Entlastungen für die Umwelt auftreten könnten. In einem Unterkapitel des Trendberichts (Kapitel 3.3) wird außerdem auch auf die innovativen Charakteristiken des 3D-Drucks eingegangen und analysiert, welche zukünftigen Implikationen für die Umwelt (Belastungen und Entlastungen) diese mit sich bringen könnten. Mit innovativen Charakteristiken werden diejenigen neuen Elemente eines Trends bezeichnet, die in sich das „Potential großer strategischer Überraschung“ tragen, beispielsweise weil sie einen



gänzlichen neuen Lebensstil implizieren (Liebl und Schwarz 2010).

Dieser Trendbericht leistet damit einen Beitrag zur Früherkennung der zukünftigen positiven wie negativen Umweltauswirkungen des 3D-Drucks. Auch bereits beobachtbare Wirkungen werden miteinbezogen. Der Bericht zieht ein differenziertes Fazit hinsichtlich der umweltpolitischen Bedeutung der Technologie und baut auf dem wissenschaftlichen Stand auf. Der Bericht ersetzt keine Ökobilanzierung, Szenario-Analyse oder quantitative Modellierung aller mit dem 3D-Druck in der Zukunft verbundenen Phänomene, gleichwohl kann er hierfür wichtige Beiträge leisten.

Ziel und Aufgabe des Berichts ist es, die Felder zu identifizieren, die von der Umweltpolitik künftig stärker in den Blick zu nehmen sind. Ferner soll er diejenigen Bereiche offenlegen, in denen größere Unklarheiten in der Entwicklung des 3D-Drucks und den damit verknüpften umweltpolitischen Implikationen bestehen und weitere Forschung notwendig ist. Der Bericht ist als eine erste Bestandsaufnahme hinsichtlich der bereits beobachtbaren und zukünftigen Umweltauswirkungen des 3D-Drucks zu verstehen. Er ist ein Ergebnis der strategischen Vorausschau für die Umweltpolitik.

Identifiziert und dargestellt werden in diesem Trendbericht nur die voraussichtlich relevanten Umweltauswirkungen. Andere Effekte des 3D-Drucks beispielsweise auf die Wirtschaft oder Gesellschaft werden nur untersucht, sofern diese auf die Umwelt rückwirken. Geringfügige Auswirkungen auf die Umwelt, wie beispielsweise der Stromverbrauch bei der Produktion von CAD-Software, werden nicht weiter behandelt.

³ Genau genommen ist der 3D-Druck kein Trend, sondern die verstärkte Nutzung des 3D-Drucks (in bestimmten Bereichen) ist ein Trend. Aus Vereinfachungsgründen wird im Bericht aber vom Trend 3D-Druck gesprochen.

Der vorliegende Bericht nimmt sowohl direkte als auch indirekte Umweltwirkungen in den Blick: Als direkte Umweltauswirkungen werden diejenigen Umweltbe- und -entlastungen verstanden, die sich unmittelbar (zeitlich und räumlich) aus den Druckverfahren, Materialien und dem Verhalten beteiligter Akteure ergeben (beispielsweise Feinstaubbelastungen durch den Druck). Indirekte Umweltauswirkungen entstehen erst über weitere Zwischenschritte (räumlich und zeitlich), beispielsweise wenn durch den 3D-Druck Lebensstiländerungen angestoßen werden.

1.3 Verwendete Methodik

Die angewandte Methodik dient dem oben genannten Ziel, mögliche künftige Problemfelder für die Umweltpolitik frühzeitig zu identifizieren und herauszuarbeiten.⁴ Gleichzeitig trägt sie dem grundsätzlichen methodischen Problem Rechnung, dass es keine gesicherte Möglichkeit gibt, in die Zukunft zu blicken. Die ausgewählten verschiedenen Herangehensweisen und die damit verbundenen unterschiedlichen Perspektiven ermöglichen aber, die Bandbreite möglicher Entwicklungen zu erfassen und abzubilden. Die Methodik hat nicht zum Ziel, Wahrscheinlichkeiten vorherzusagen oder genaue Zukunftsprognosen zu liefern, sondern mögliche Probleme frühzeitig zu identifizieren.



Grundlage der Einschätzung von Umweltbe- und -entlastungen des 3D-Drucks, sind drei verschiedene methodische Ansätze:

1. Trendbeschreibung;
2. kriteriengeleitete Erfassung der direkten und indirekten Umweltwirkungen (Assessment);
3. Erfassung weiterer künftig möglicher Umweltauswirkungen (IIC-Verfahren).

Die im Folgenden beschriebenen ersten beiden Ansätze bauen teils auf anderen methodischen Vorarbeiten auf (beispielsweise Horizon-Scanning-Prozessen und dem Assessment im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung). Der dritte Ansatz, das IIC-Verfahren (siehe unten 3), wurde für das Vorhaben eigens entwickelt. Für diesen Trendbericht wurden diese drei Ansätze zum ersten Mal integriert und gemeinsam angewendet, um möglichst viele Facetten der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks zu erfassen. Die drei Methoden unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielsetzung:

1) Die erste Methode dient der Erfassung des Untersuchungsgegenstandes, um sämtliche umweltrelevante Entwicklungen des 3-Drucks erst einmal in Form von Trendhypothesen zu identifizieren, zu beschreiben und zu analysieren. Im Rahmen einer Literaturanalyse wurden mit einer qualitativen Inhaltsanalyse-Software 987 Textstellen aus 46 Quellen zum Thema 3D-Druck erfasst, klassifiziert und ausgewertet.⁵ Relevante Textstellen wurden mit Codes versehen. Die Codes geben interne und externe Faktoren des 3D-Drucks wider und sind in einem morphologischen Kasten angeordnet. Verwendet wurde ein vom Institut für Innovation und Technik (iit) entwickeltes Codeschema für Horizon Scanning-Prozesse, das 311 Codes umfasst, von denen 122 im Rahmen der Analyse des Trends 3D-Druck vergeben wurden. Mithilfe der Methode können spezifische Trendhypothesen identifiziert und analysiert werden, das heißt Annahmen über mögliche Entwicklungen und Ausprägungen der Einflussfaktoren auf den 3D-Druck.

⁴Details zur Gesamtmethodik sind in einem speziellen Methodenpapier zur Trendbeschreibung und Trendanalyse wiedergegeben, das Teil des Gesamtvorhabens ist. Auf der Basis des Methodenpapiers werden künftig weitere Trendberichte erscheinen. Ein weiterer Trendbericht (zum Thema Konsum 4.0) wird als weiterer Teil des aktuellen Gesamtvorhabens erstellt.
⁵Als Software wurde Atlas.ti verwendet.

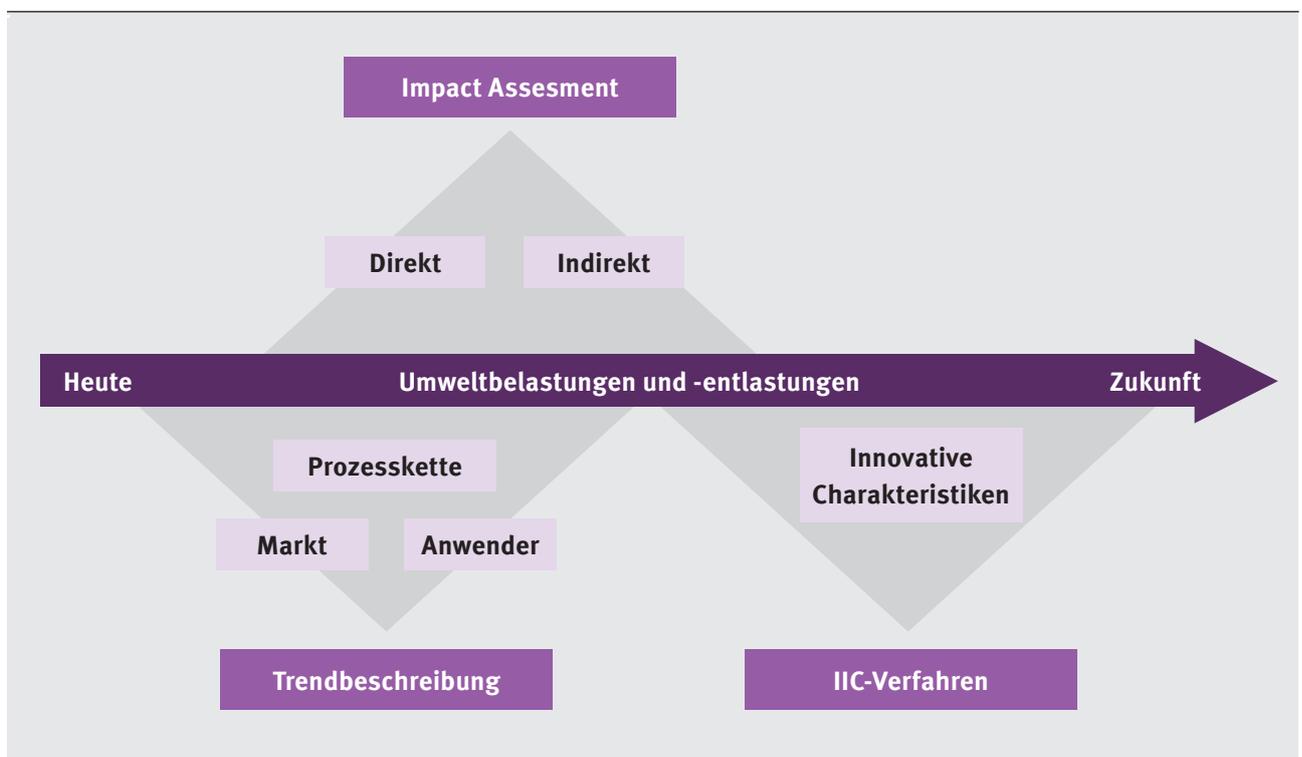
2) Mithilfe der zweiten Methode – dem „Assessment der Umweltauswirkungen“ – können mögliche direkte und indirekte Be- und Entlastungen in zentralen Bereichen des 3D-Drucks ermittelt werden. Das analytische Instrument des Assessment-Verfahrens ist die Wirkungskette. Die Wirkungskette bildet die grundlegende Heuristik zur Analyse der Umweltauswirkung des 3D-Drucks. In einer systematischen Weise werden verschiedene Kategorien des Trends hinsichtlich seiner Umweltwirkung analytisch gefasst. Grundlage hierfür sind direkte und indirekte Wirkkategorien.

Für die Einschätzung der direkten Be- und Entlastungsprofile wurde die vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM) verwendet, die fünf generelle Belastungsarten und 15 spezifische Belastungskategorien definiert. Zu diesen zählen: chemische, physikalische, biologische Belastungen, Ressourceninanspruchnahme und Störfälle / Unfälle (siehe für eine genauere Darstellung Anhang, Tabelle 4). Für die unterschiedlichen Verfahren, Materialien und Verhaltensweisen wurde jeweils analysiert, ob potentiell Wirkungen in den 15 Kategorien zu erwarten sind.

Als Grundlage für die Ermittlung indirekter Umweltauswirkungen diente ein neu formuliertes Assessment-Raster. Die Prüfkategorien hierfür greifen auf verschiedene Quellen zurück: das Millenium Ecosystem Assessment (2005), der Global Environmental Outlook 5 von UNEP (UNEP 2012), zentrale Kategorien der Umweltsoziologie und Sozialpsychologie (Huber 2011; Kollmuss und Agyeman 2002; Oskamp und Schultz 2005) und Kategorien der Politikwissenschaft zum politischen System und seinen zentralen Bereichen (Hague und Harrop 2010). Zu den untersuchten Dimensionen zählen Demographie, Gesellschaft und Kultur, Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Technologie sowie Raum (siehe Anhang, Tabelle 5 für eine Übersicht der Dimensionen und zugeordneten Kategorien). Für die mit dem 3D-Druck verbundenen Verfahren, Materialien und das Akteursverhalten wurde jeweils eingeschätzt, ob es in diesen Bereichen zu Veränderungen kommt, die wiederum relevant oder nicht relevant für Umweltbe- und -entlastungen erscheinen. In die Bewertung flossen dabei die Ergebnisse der Trendbeschreibung (siehe oben), die intern im Team sowie in einem Expertenworkshop⁶ erarbeiteten Einschätzungen sowie Forschungsliteratur mit ein.

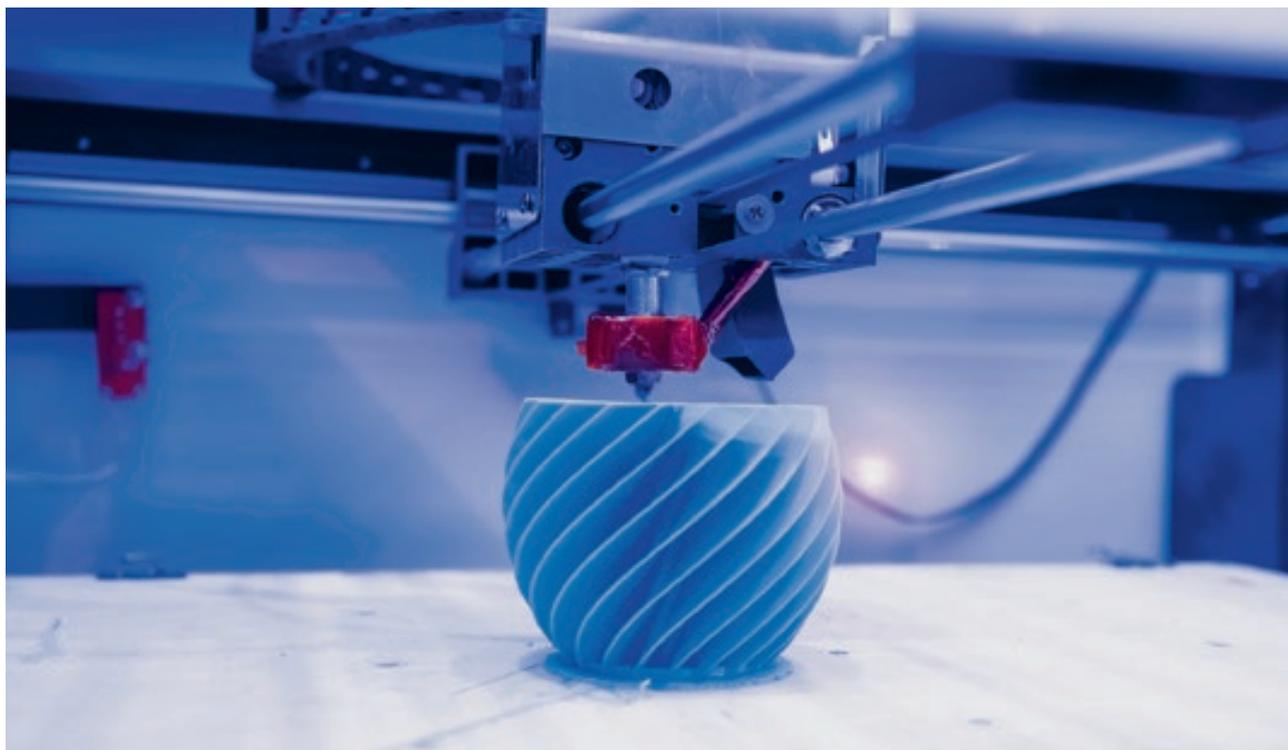
Abbildung 2:

Methodik zur Trendbeschreibung und -analyse



Quelle: eigene Darstellung

⁶Der Expertenworkshop fand im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Berlin am 29. September 2016 statt.



3) Mithilfe des IIC-Verfahrens (Identifizierung Innovativer Charakteristiken) wurde ermittelt, welche innovativen Eigenschaften den 3D-Druck auszeichnen und welche umweltpolitischen Herausforderungen sich durch diese innovativen Eigenschaften ergeben. Das IIC-Verfahren unterscheidet sich vom Assessment-Verfahren dadurch, dass es wesentlich offener gestaltet ist. Im IIC-Verfahren werden nicht spezifische Wirkkategorien betrachtet (wie die VERUM Belastungskategorien), sondern ausgehend von den innovativen Charakteristiken wird reflektiert, welche Herausforderungen auftreten könnten. Von bereits beobachtbaren Eigenschaften des 3D-Drucks wird wesentlich stärker abstrahiert. Der Blick ist noch weiter in eine unbekannte Zukunft gerichtet.

In der Abbildung 2 auf der Vorseite werden das Zusammenspiel der drei Verfahren und die drei unterschiedlichen Blickwinkel verdeutlicht.

1.4 Struktur

Der Trendbericht gliedert sich in drei Teile: In **Kapitel 2** wird der Trend 3D-Druck umfassend beschrieben, wobei die Prozesskette, die Verfahren und Materialien, die Geschichte und derzeitige Marktentwicklung sowie die Anwendungsgebiete und Akteure dargestellt werden. In **Kapitel 3** werden die Ergebnisse der drei verschiedenen Methoden zur Identifizierung der umweltrelevanten Entwicklungen und Auswirkungen des 3D-Drucks dargestellt. In **Kapitel 4** schließlich wird spezifischer Forschungs- und Handlungsbedarf identifiziert und ein Fazit bezüglich der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks und der umweltpolitischen Implikationen gezogen.

Zur besseren Darstellung der sich aus dem 3D-Druck ergebenden Umweltbe- und -entlastungen werden die Ergebnisse der ersten und zweiten Methode (Teile der Trendbeschreibung – die Trendhypothesen – und die kriteriengeleitete Erfassung der Umweltwirkungen [Assessment]) in Kapitel 3 gemeinsam erläutert. Grund hierfür ist auch die Zielsetzung der einzelnen Ansätze: Die beiden ersten Verfahren zielen tendenziell eher in eine (nähere) Zukunft, die noch klarer erkennbar ist. Sie versuchen aus dem derzeit bekannten über Abschätzungen und qualitative Prognosen ins Morgen zu blicken. Im Unterschied dazu löst sich das dritte Verfahren stärker vom Hier und Jetzt und erschließt damit noch Felder, die den anderen beiden Perspektiven nicht zugänglich sind.

2.1 Entwicklung des 3D-Drucks

Die Aufmerksamkeit, die dem 3D-Druck derzeit zuteil wird, lässt oftmals vergessen, dass es bereits eine dreißigjährige Entwicklungsgeschichte additiver Verfahren gibt. Additive Verfahren wurden zuerst in der Automobilindustrie ab Mitte der 1980er Jahre eingesetzt, um möglichst effizient Prototypen herzustellen („rapid prototyping“). Innovationen in der Computer- und Lasertechnologie sowie die Kommerzialisierung von CAD (Computer Aided Design)-Software bildeten die Grundlage für die Entwicklung der ersten 3D-Druckverfahren.

1986 gilt als „Geburtsjahr“ des 3D-Drucks: In diesem Jahr ließ sich der US-amerikanische Ingenieur Charles Hull das Stereolithographie (SLA)-Verfahren patentieren und gründete die „3D Systems Corporation“, bis heute eines der wichtigsten 3D-Druck-Unternehmen. Ab 1988 gab es den ersten 3D-Drucker (SLA-1) auf dem Markt zu kaufen. In den 1990er Jahren wurden weitere Verfahren wie die Laser-Sintern-Methode (SLS), Fused Deposition Modelling (FDM), Ballistic Particle Manufacturing (BPM), Laminated Object Manufacturing (LOM) und Solid Ground Curing (SGC) patentiert. Außerdem wurden neue Unternehmen, die den 3D-Druck etablieren wollten, gegründet. Bis heute sehr erfolgreich sind die EOS GmbH (Deutschland) und die Firma Stratasys Inc. (USA), die unter anderem industriell genutzte Drucksysteme produzieren.

Technische Weiterentwicklungen erlaubten ab Anfang 2000 eine Produktion in verbesserter Qualität, so dass nicht nur Prototypen, sondern auch spezielle Werkzeuge und Gussformen (casts) und Kleinserien oder individualisierte Objekte hergestellt werden konnten. In der neuen Terminologie wurde von „Rapid Tooling“ (RT), „Rapid Casting“ oder „Rapid Manufacturing“ (RM) gesprochen (3dprintingindustry 2017). Heute werden die verschiedenen Anwendungen des 3D-Drucks in der Wissenschaft und Industrie unter „Additive Manufacturing“ (AM) zusammengefasst. Im deutschen Sprachraum wird auch von Additiver Fertigung gesprochen.

Für Privatanwender waren ab 2007 die ersten 3D-Drucker für unter \$10.000 zu kaufen. Ein Verkaufserfolg wurden jedoch erst Geräte, die die Hälfte dessen kosteten, wie

der B9Creator (siehe Bild), der 2012 auf den Markt kam (alle Bildquellen werden in Kapitel 7, Bilderverzeichnis, aufgeführt). Der britische Ingenieur Adrian Bowyer brachte 2005 mit der Erfindung des RepRap (replicating rapid prototyper), eine neue Bewegung (das „maker movement“) in Gang – der Rep-Rap ist ein 3D-Drucker, der die meisten seiner Teile selbst reproduzieren kann und mit einer frei verfügbaren Software betrieben wird. Einen Mehrwert für den Nutzer hat der Rep-Rap unter anderem durch seinen Open Source Charakter: die dem RepRap zugrundeliegenden Designs sind frei im Internet verfügbar. In Deutschland gibt es bereits in vielen Städten FabLabs, unter anderem in Berlin, München und Erlangen (für eine ausführliche Übersicht siehe: 3D-Druck Magazin 2017). Zukünftig werden 3D-Drucker auch durch Kinder eingesetzt werden. So plant Mattel die Einführung des ThingMaker 3D-Druckers zum Herbst 2017 (3D-Druck Magazin 2016). Hohe Wachstumsraten im 3D-Druck-Technologiemarkt und technologische Fortschritte, vor allem im Bereich des Bioprintings⁷, der Entwicklung neuer Materialien und der Erhöhung der Genauigkeit und Druckgeschwindigkeit lassen den 3D-Druck heute zu einer der einflussreichsten technischen Innovationen werden, die auch weitreichende gesellschaftliche Veränderungen mit sich bringen könnte.



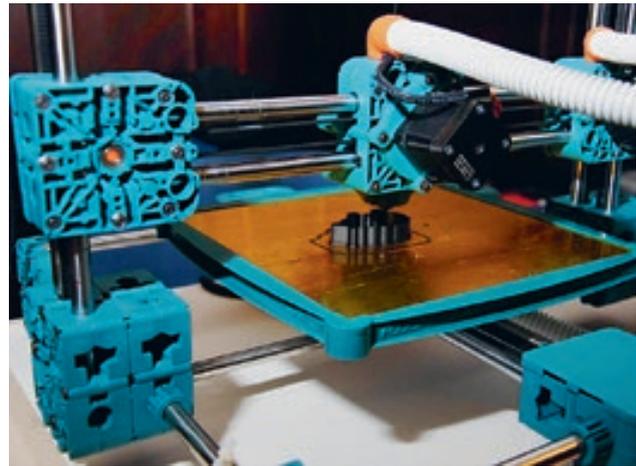
⁷ Unter Bioprinting werden 3D-Druckverfahren verstanden, auf deren Basis einzelne Zellen oder Gewebe verdruckt werden können. Hierfür werden insbesondere die Techniken des Tissue Engineering eingesetzt. Die Technologie befindet sich in der Grundlagenforschung.

2.2 Prozesskette, Verfahren und Materialien im 3D-Druck

Unter dem Begriff 3D-Druck kann eine Vielzahl von Verfahren zusammengefasst werden, die eines gemeinsam haben: Mit ihrer Hilfe kann ein dreidimensionales, virtuelles Modell, das zuvor mithilfe eines Computer-Aided Design (CAD)-Systems entworfen wurde, direkt hergestellt werden. Die Beschaffenheit des 3D-Drucks und seines Umfelds wird im Folgenden anhand seiner typischen Prozesskette, der gängigen Verfahren und verwendeten Materialien beschrieben.

Die 3D-Druckverfahren unterscheiden sich aufgrund ihrer technischen Prozesse und den einsetzbaren Materialien stark. In der Prozesskette können grundsätzlich acht Phasen identifiziert werden, die im Rahmen der meisten 3D-Druckverfahren durchlaufen werden (Gibson et al. 2015):

1. Mit Hilfe eines CAD-Systems wird ein virtuelles, dreidimensionales Modell von einem Objekt konstruiert. Das dreidimensionale Modell kann auch durch einen 3D-Scan realisiert werden.
2. Die CAD-Daten werden in ein STL-Format (Surface Tessellation Language) umgewandelt, das der Beschreibung geometrischer Informationen von dreidimensionalen Datenmodellen dient. Es handelt sich um die meistgenutzte Schnittstelle für am Markt erhältliche 3D-Drucker.
3. Die STL-Daten werden in einen 3D-Drucker transferiert.
4. Der 3D-Drucker wird eingerichtet, und die Druckparameter werden festgelegt. Dies passiert manuell durch den Nutzer oder halbautomatisch (Material und Parameterset). Hierzu gehören unter anderem die Druckposition im Drucker, die Atmosphäre und die Temperatur des Druckraums, die Eigenschaften der Energiequelle, die Materialeigenschaften, die Schichtdicke und die Druckzeit.
5. Die Herstellung des Objekts durch den 3D-Drucker erfolgt in der Regel automatisiert.
6. Nach der Fertigstellung kann das Objekt dem 3D-Drucker im Regelfall direkt entnommen werden.



7. Das gedruckte Objekt muss abhängig vom Druckverfahren verschiedene Nachbearbeitungsschritte durchlaufen, unter anderem wird überschüssiges Druckmaterial entfernt (z. B. Pulverreste) oder das Objekt wird mit Bindemitteln infiltriert, um die Festigkeit zu erhöhen.
8. Die additiv erzeugten Objekte können nun genutzt werden. Je nach Anwendung werden die Objekte gegebenenfalls weiter behandelt, z. B. grundiert oder lackiert.

Die meistgenutzten Verfahren in der additiven Fertigung sind die pulverbasierten Verfahren (insbesondere die PBF-Verfahren) und das Extrusionsverfahren (EB-Verfahren) (Marquardt 2014). Vermehrt kommen auch Photopolymerisationsverfahren (PP-Verfahren) zum Einsatz. Bei den pulverbasierten Prozessen wird eine dünne Schicht Pulver (Kunststoff, Metall, Keramik et cetera) auf eine Arbeitsfläche aufgetragen und mittels Laser eine definierte Kontur geschmolzen, die sich nach dem Erstarren verfestigt. Daraufhin wird eine neue Schicht Pulver aufgetragen, und der Prozess wiederholt sich (PBF-Verfahren) bis das Objekt fertig gestellt ist. Anstelle des Aufschmelzens mittels Laser können auch duroplastische Kunststoffe (z. B. Harze) genutzt werden, um das Pulver (z. B. Stärke) geometrisch definiert zu binden (das sogenannte Binder Jetting-Verfahren). Im Extrusionsverfahren hingegen werden thermoplastische Kunststoffe über eine beheizte Düse verformbar gemacht und geometrisch definiert abgelegt. Beim Photopolymerisationsverfahren werden flüssige Photopolymere punkt- oder schichtweise mithilfe von UV-Licht auf einer Bauplattform vernetzt.

Die Verfahren des 3D-Drucks und die grundlegenden Materialien werden im Folgenden ausführlich auf Grundlage von Gibson et al. (2015) beschrieben.⁸ Die Tabelle 1 (siehe Seite 15) gibt einen umfassenden Überblick über die gängigen Verfahren, die nutzbaren Materialien, die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie die aktuellen Anschaffungskosten der Druckgeräte.

Powder bed fusion processes (PBF)

Bei PBF-Verfahren werden durch eine oder mehrere thermische Quellen – dies sind in der Regel Laser- oder Elektronenstrahlquellen – dünne Pulverschichten, die in einem definierten Bauraum abgelegt werden, gesintert beziehungsweise verschmolzen. Die Bauteile müssen nach dem 3D-Druck von anhaftendem Pulver befreit werden. Vereinfacht können drei PBF-Verfahren getrennt voneinander betrachtet werden: Polymer Laser Sintering (PLS), Metal Laser Sintering (MLS) und Electron Beam Melting (EBM) (Gibson et al. 2015: 107).

PLS-Systeme arbeiten typischerweise mit Polymeren (z. B. Polyamid), deren Schmelztemperatur bei ca. 200° C liegt. Für den 3D-Druck wird der Bauraum in der Regel mit einem Schutzgas (Stickstoff) gefüllt. Zudem wird das Pulverbett während des Prozesses leicht unter der Schmelztemperatur der Polymere gehalten.

MLS-Systeme sind in der Industrie unter verschiedenen Synonymen bekannt, unter anderem als Selective Laser Powder Re-Melting (SLPR), Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing und Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (Gibson et al. 2015). MLS-Systeme unterscheiden sich von PLS-Systemen insbesondere durch den genutzten Lasertyp und dadurch, dass das Bauteil bei MLS-Systemen mit der Bauplattform fest verbunden ist, um Deformationen des Bauteils entgegenzuwirken. Als Schutzgas wird in der Regel Stickstoff oder Argon genutzt.

EBM-Systeme unterscheiden sich von MLS-Systemen durch die Nutzung eines Elektronenstrahls anstelle eines Lasers. Zudem wird für EBM-Systeme kein Schutzgas benötigt, weil sie unter Vakuum arbeiten. Die Energiekosten für EBM-Systeme sind gegenüber neuen MLS-Systemen geringer. Da das Pulverbett durch die Elektronenstrahlquelle schnell vorgeheizt werden kann, sind keine zusätzlichen Heizsysteme nötig.

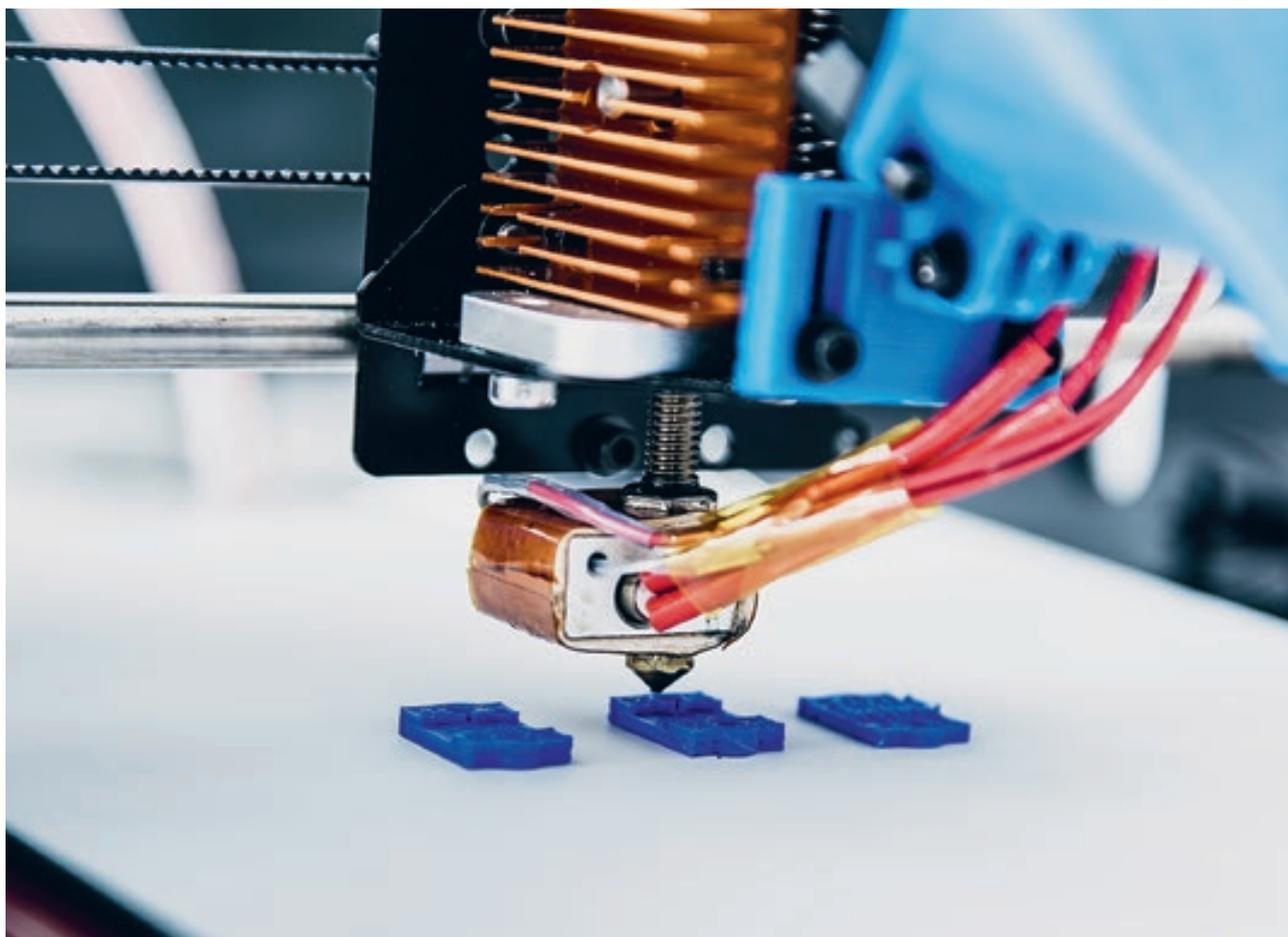
Extrusion based processes (EB)

Bei EB-Verfahren wird zwischen physikalischen und chemischen Verfahren unterschieden. Im Rahmen von chemischen EB-Verfahren wird ein flüssiges Medium über eine Düse abgelegt, welches durch eine chemische Reaktion in den festen Aggregatzustand wechselt. Bei physikalischen EB-Verfahren werden thermoplastische Kunststoffe (z. B. Polylactat) als Filament⁹ über eine beheizte Düse bei ca. 200° C geschmolzen, extrudiert und auf eine in der Regel beheizte Bauplattform (30 – 60° C) abgelegt. Eine chemische Nachbereitung der Bauteile beziehungsweise das Entfernen von Pulverresten ist nicht notwendig. Dieses Verfahren wird oft auch als Fused Deposition Modelling (FDM) bezeichnet.

Photopolymerization processes (PP) oder Stereolithografie (SLA)

Bei PP-Verfahren werden flüssige Photopolymere durch UV-Strahlung punkt- oder schichtweise auf einer Bauplattform vernetzt, sodass sich das Polymer verfestigt. Während des Prozesses ist die Bauplattform in das Photopolymer eingetaucht. Als UV-Quelle dienen meist Laser. Vereinfacht können drei PP-Verfahren voneinander unterschieden werden: Vector scan (point wise approach), Mask projection (layer wise approach) und Two-photon approach (high resolution point-by-point approach) (Gibson et al. 2015). Unterschiede ergeben sich vor allem in der Auflösung / Geschwindigkeit, diese sind für die Frage der Umweltauswirkungen aber nicht weiter relevant.

⁸Für die Bezeichnung der Verfahren werden die englischen Fachtermini benutzt, da diese sowohl in der englisch- als auch in der deutschsprachigen Fachliteratur zur Anwendung kommen.
⁹Als Filament wird beim physikalischen EB-Verfahren das strangförmige/fadenförmige Ausgangsmaterial (feedstock) bezeichnet, welches der Druckdüse des 3D-Druckers gleichmäßig zugeführt und erhitzt wird, um es verformbar zu machen und auf einer Plattform abzulegen. Typischerweise bestehen Filamente für den 3D-Druck aus Kunststoffen wie ABS oder PLA.



Material Jetting (MJ)

Bei MJ-Verfahren wird ein flüssiges Photopolymer über einen Druckkopf tropfenweise auf einer Bauplattform abgelegt und durch UV-Licht polymerisiert. Für die tropfenweise Ablage haben sich insbesondere die folgenden Technologien etabliert: Continuous Stream (CS), DOD-Methode und PolyJet.

Binder Jetting (BJ)

Bei BJ-Prozessen wird ein Bindemittel auf ein Pulver aufgetragen, so dass diese Schicht für Schicht infiltriert und zu einem dreidimensionalen Objekt verbunden wird. Das Verfahren ist auch unter dem Synonym 3D Printing (3DP) bekannt.¹⁰ Die Objekte werden nach dem Druck gegebenenfalls zusätzlich mit weiteren Bindemitteln infiltriert oder thermisch behandelt (gesintert), um eine höhere Festigkeit zu erzeugen. Bei den anderen Druckverfahren wird diese nachträgliche Infiltrierung beziehungsweise thermische Behandlung nicht angewendet.

Sheet Lamination Process (SL)

Bei SL-Prozessen werden dünne, zweidimensionale Flächen aus einem Werkstoff ausgeschnitten und Layer für Layer zusammengefügt, sodass ein dreidimensionales Objekt entsteht. Folgende Fügetechniken werden genutzt: Kleben, thermisches Binden, Klemmen und Ultraschall-Schmelzen. Das SL-Verfahren ist auch unter dem Synonym Laminated Object Manufacturing (LOM) bekannt und stellt eine Besonderheit unter den additiven Verfahren dar.

Directed Energy Deposition Processes (DED)

Bei DED-Verfahren werden mit Hilfe eines Lasers oder einer Elektronenstrahlquelle simultan das Substrat sowie das Material, das auf dem Substrat abgelegt werden soll und dem Druckpunkt kontinuierlich zugeführt wird, aufgeschmolzen. Im Gegensatz zu PBF-Verfahren wird das Material während der Ablage aufgeschmolzen.

¹⁰Nicht zu verwechseln mit der englischen Übersetzung des Terminus „3D-Druck“, der ebenfalls „3D printing“ lautet.

Tabelle 1:

Materialien, Vor- und Nachteile sowie Anschaffungskosten von 3D-Druckverfahren

Häufig eingesetzte Materialien sind fett gedruckt.

Verfahren	Materialien	Vorteile	Nachteile	Anschaffungskosten
Powder Bed Fusion Processes (PBF)	PLS: Thermoplasten und Elastomere; Polyamid oder Nylon (PA); Polystyrol-basierte Materialien (PS); Polyetheretherketon (PEEK); Biologisch abbaubare Materialien wie Polycaprolacton (PCL), Polylactide (PLA), Poly-L-Lactid (PLLA); Verbundmaterialien wie PCL + keramische Partikel (z. B. Hydroxyapatit HA) MLS: Edelstahl und Werkzeugstahl; Titan und Legierungen; Nickellegierungen; Aluminiumlegierungen; Kobalt-Chrome-Legierungen; Silber und Gold; Keramiken EBM: Leitende Metalle	Präzision Verarbeitungsqualität Große Materialauswahl	Hohe Anschaffungskosten Oberflächenqualität Geschwindigkeit Beschränkte Objektgröße Benötigt eine besondere Infrastruktur (Schutzgas, Starkstrom, Materialzuführung)	> 100.000 €
Extrusion Based Processes (EB)	Thermoplasten; Polylactide (PLA); Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und ABS-Blends; Polyamid oder Nylon (PA), Polycarbonate (PC) und PC-Blends; Acry-Styrol-Acrylnitril (ASA); Polyphenylsulfone (PPSF / PPSU); Verbundmaterialien wie PLA mit Naturfasern- oder Holzanteil	Geringe Anschaffungskosten Einsatz vieler Kunststoffe möglich Für Bürogebrauch geeignet	Geschwindigkeit Präzision Annehmbare Verarbeitungsqualität Objekte können sich nach dem Druck aufwölben (Wrapping Effekt)	< 10.000 €
Photopolymerization Processes (PP) oder Stereolithografie (SLA)	Photopolymere (z. B. Acryl-, Epoxid- oder Vinylesterharze)	Bau großer Objekte möglich Präzision Verarbeitungsqualität	Geschwindigkeit Hohe Anschaffungskosten im Einzelfall	> 50.000 € (für industrielle Anwender) < 10.000 € (für Laienanwender)
Material Jetting	Photopolymere; Polyesterbasierte Kunststoffe	Präzision Verarbeitungsqualität Für Bürogebrauch geeignet	Geschwindigkeit Beschränkte Materialauswahl Beschränkte Objektgröße	> 30.000 €
Binder Jetting (BJ)	Stärke + wasserbasierte Bindemittel; PMMA + wachsbasiertes Bindemittel; Metalle (Edelstahl, Bronze, Inconel) + Bronze oder Kunststoffe; Sand + Kunststoffe; Keramik + Kunststoffe oder Metalle	Geschwindigkeit Anschaffungskosten Mehrfarbige Objekte möglich	Beschränkte Materialauswahl Präzision Verarbeitungsqualität Festigkeit (Bruchempfindliche Objekte)	> 10.000 €
Sheet Lamination Processes (SL)	Papier; Metalle; Kunststoffe; Keramiken	Mehrfarbige Objekte möglich (Papier)	Oberflächenqualität Verarbeitungsqualität Nachbearbeitung	> 10.000 €
Directed Energy Deposition Processes (DED)	Metalle; Kunststoffe; Keramiken	Reparatur von Bauteilen möglich siehe PBF	siehe PBF	siehe PBF

Quelle: Gibson et al. 2015, Hagl 2015 und Expertengespräche auf der Inside 3D printing conference 2015

2.3 Markt 3D-Druck

Der weltweite Umsatz von 3D-Druck-Produkten – hierzu gehören 3D-Drucker, Material, Zubehör, Software und Dienstleistungen, die zur Herstellung von im 3D-Druck gefertigten Produkten eingesetzt werden – ist zwischen 2003 und 2013 von 529 Millionen auf 3,07 Milliarden US-Dollar gestiegen (Harhoff und Schnitzer 2015). Die Ergebnisse verschiedener Studien (Krämer 2014a; Krämer 2014b; Krämer 2015; Condemarin 2015) erlauben Aussagen zu Entwicklungen auf dem 3D-Druck-Markt. Grundsätzlich unterliegen Marktentwicklungsstudien größerer Unsicherheit aufgrund der verwendeten Methodik (beispielsweise Trendextrapolationen). Alle hier zitierten Studien gehen jedoch von einem Wachstum des 3D-Produkt-Marktes aus und widersprechen sich zumindest nicht.

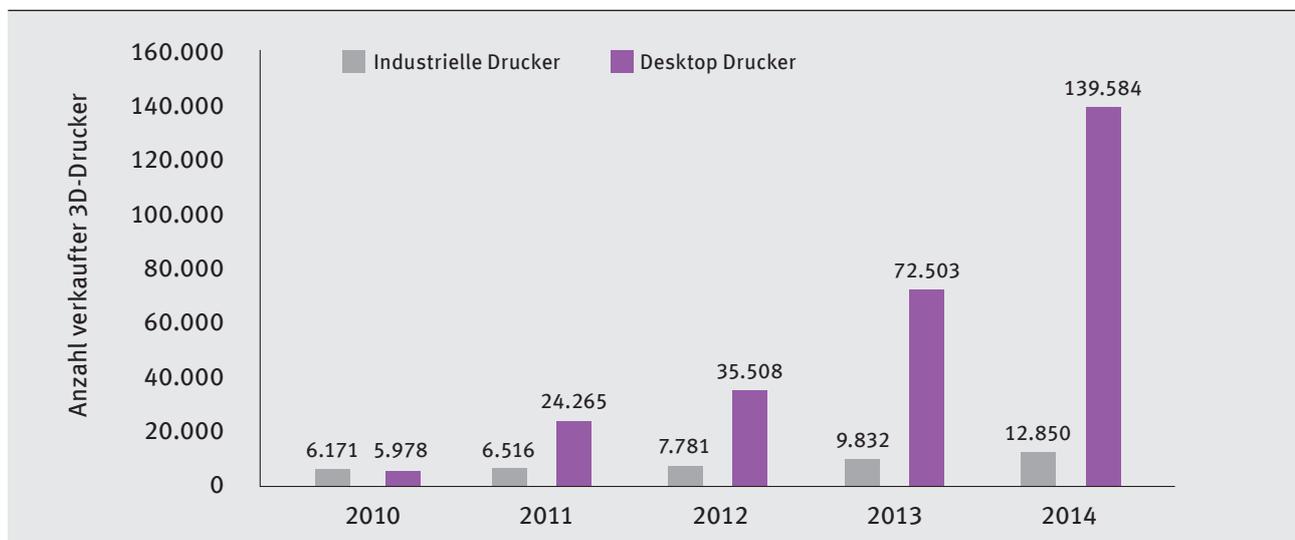
Für das gesamte Marktvolumen (also inklusive Geräte, Material und Dienstleistungen sowie Zubehör) wurde ausgehend vom Jahr 2013 für die folgenden fünf Jahre ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 45,7 Prozent geschätzt, womit im Jahr 2018 ein Wert von ca. 16 Mrd. US-Dollar erreicht werden würde (Krämer 2014b).¹¹ Von den für 2018 geschätzten 16 Mrd. US-Dollar entfallen ca. 5,4 Mrd. US-Dollar auf Geräte und etwa 10,8 Mrd. US-Dollar auf Dienstleistungen und Materialien (Krämer 2014b). Einer anderen Studie zufolge soll bis 2020 das Marktvolumen auf etwa 17,2 Mrd. US-Dollar wachsen (Condemarin 2015).



Abbildung 3 verdeutlicht den bisher beobachtbaren Anstieg der verkauften 3D-Drucker. Für 2016 wurde ein Wachstum der Anzahl der verkauften Geräte weltweit auf rund 500.000 angenommen, was einer Verdoppelung der 2015 verkauften Geräteanzahl entspräche. Bis 2019 sollen dann ca. 5,6 Mio. Geräte weltweit im Einsatz sein (Krämer 2015). Wie Abbildung 3 gleichzeitig zeigt, handelt es bei den derzeit eingesetzten Systemen zum weit überwiegenden Teil um Desktop Systeme. Desktop-Systeme sind als Systeme definiert, die weniger als 5.000 Dollar kosten, und werden vor allem in kleinen Unternehmen (z. B. im Design- und Architekturbereich, sowie bei Dienstleistern), der Forschung und der Bildung eingesetzt. Die industriellen Systeme machen nur einen kleineren Anteil aus.

Abbildung 3:

Global verkaufte Desktop AM Systeme (< 5.000 \$) versus Industrielle AM Systeme



Quelle: Wohlers (2015)

¹¹Die Autoren gehen hier von einem etwas anderen Ausgangswert als die eingangs genannten Zahlen aus: Sie schätzen das gesamte Marktvolumen für 2013 auf 2,5 Milliarden US\$.

Interessant ist bei der Betrachtung von Abbildung 3 auch, dass der Anstieg der Anzahl der industriellen Drucker deutlich geringer ausgeprägt ist als der Anstieg für Desktop Systeme. Von einer wirklich rapiden Zunahme des 3D-Drucks kann man nur im Bereich der Desktop Systeme reden. Die Wachstumsraten im Industriebereich sind hoch, aber nicht gänzlich außergewöhnlich. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Wachstumsraten des 3D-Drucks in einzelnen Branchen recht unterschiedlich ausfallen werden, wie die folgende Abbildung 4 verdeutlicht. So wird geschätzt, dass der Einsatz in der Energiewirtschaft beispielsweise um insgesamt 30 – 35 Prozent im Zeitraum 2014 bis 2020 zunimmt (in der Energiewirtschaft wird der 3D-Druck eingesetzt, um z. B. Bauteile und Leiter herzustellen).

Die bisher genannten Zahlen für den 3D-Druck sollten für die richtige Einordnung im Vergleich zu anderen ähnlichen Märkten gesehen werden. Gemessen etwa am Handel mit Papierdruckern, Kopierern und Multifunktionsgeräten sind die Zahlen für Desktop 3D-Drucker noch eher gering: 2014 wurden dort beispielsweise ca. 105 Millionen Einheiten verkauft, das heißt ca. 750 Mal so viele Einheiten wie im Jahr 2014 verkaufte 3D-Druck Desktopgeräten (Mitani und Lam 2015).

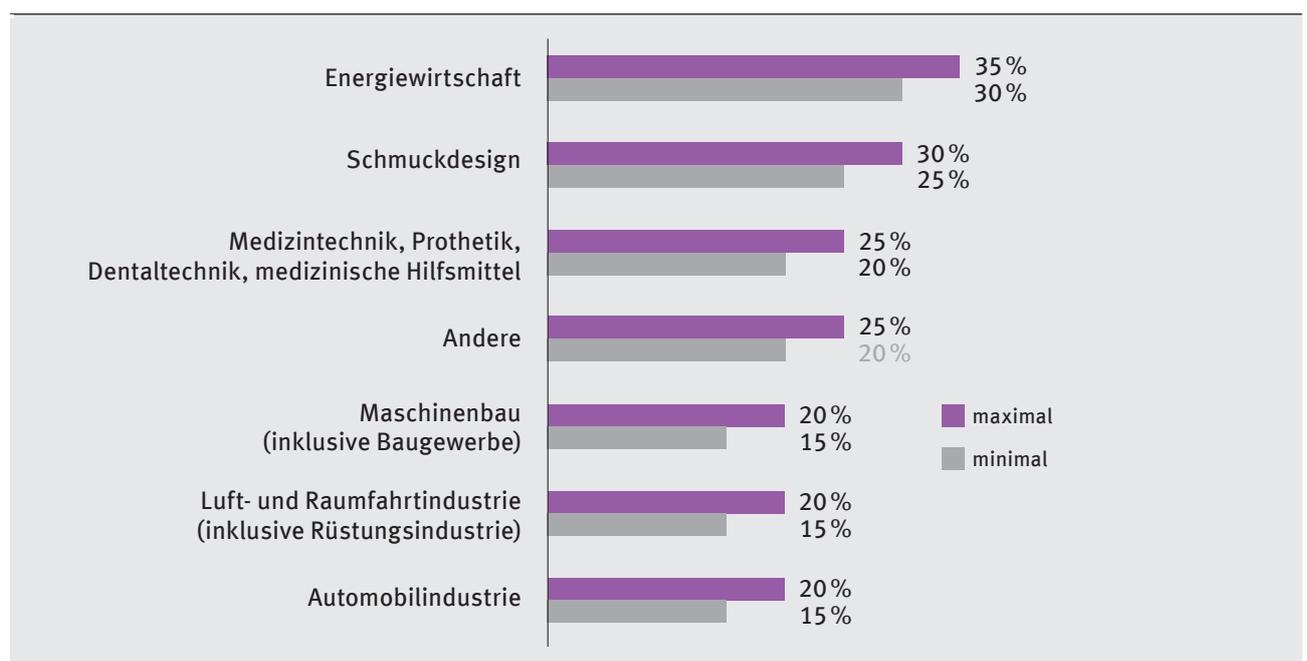
Mit Blick auf die industrielle Anwendung ist der Vergleich zu Industrie-Spritzgießmaschinen am interessantesten, da dieses Produktionsverfahren dem 3D-Druck in Teilen ähnelt (beispielsweise durch die eingesetzten Druckmaterialien – Kunststoffe). Die Zahl der weltweit verkauften Industrie-Spritzgießmaschinen wird für 2016 beispielsweise auf mehr als 100.000 Einheiten geschätzt (Reportlinker 2017), weit mehr also als die Anzahl der industriellen 3D-Drucker. Gleichzeitig kann man nicht feststellen, dass der Spritzguss vom 3D-Druck verdrängt würde. Die Wachstumsraten des Kunststoff-Spritzgusses alleine werden für 2015 bis 2020 auf ca. 5 Prozent geschätzt (Magenta 2016).

Noch deutlicher wird die Position des 3D-Drucks im Rahmen der industriellen Fertigungsverfahren im Vergleich zum weltweiten Markt für den Maschinenbau. 2014 betrug allein der Weltmaschinenhandel ca. 942 Milliarden Euro (VDMA 2016). Dies macht deutlich, dass der 3D-Druck noch einen Nischenmarkt darstellt.

Die skizzierte Situation (ausgehend von einer niedrigen Ausgangsposition mit sehr starkem Wachstum in bestimmten Bereichen) spiegelt sich auch bei den eingesetzten Materialien wider. Prognosen für das

Abbildung 4:

Geschätzte gesamte Wachstumsraten für ausgewählte Branchen (2014 – 2020)



Quelle: Condemarin (2015)

Marktvolumen von thermoplastischem Kunststoff, dem bisher populärsten Druckmaterial, liegen bei einer Milliarde US-Dollar im Jahr 2025, wobei der Preis pro kg sinken wird. Zusammengenommen wird bis 2025 für die sieben zurzeit meist verwendeten Materialien ein Marktvolumen von rund 8 Mrd. US-Dollar geschätzt (Gordon und Harrop 2015). Diese Materialien sind: Photopolymere, Thermoplaste, Thermoplastpulver, Metallpulver, Metalle, Gips, Sand und Bindemittel. In Zukunft werden noch stärker Silikon, Biomaterial, Kohlefaser, Regolith, Keramik, Graphene und elektrisch leitende Metalle hinzukommen. Ferner werden vor allem Verbundwerkstoffe in Zukunft an Bedeutung gewinnen (Gordon und Harrop 2015). Im Vergleich zum Marktvolumen für Kunststoffe, die für das Spritzgießverfahren eingesetzt werden, relativieren sich auch diese Zahlen wiederum. Bis 2022 wird hier von knapp 300 Milliarden US-Dollar ausgegangen (Newswire 2016).

2.4 Zentrale Akteure und Anwendungsfelder

Die Anwendungsbereiche des 3D-Drucks können im Wesentlichen in industrielle, private und experimentelle Anwendungen unterteilt werden. Während der Reifegrad der Technologie für die industrielle Fertigung in vielen Anwendungsbereichen bereits weit fortgeschritten ist, befindet sich die Konsumentenfertigung und das Bioprinting noch in einem frühen technologischen Stadium (Harhoff und Schnitzer 2015).

Industrielle Anwendungen umfassen momentan noch vor allem Kleinserien, Ersatzteile und den Bau von Prototypen, aber auch die Einbindung des 3D-Drucks in die Produktion von Großserien wird bereits diskutiert. Da die Prozessketten von Großserien jedoch eine hohe Komplexität aufweisen und auf herkömmliche Produktionsverfahren hin optimiert sind, ist eine Integration des 3D-Drucks in solche Prozessketten wahrscheinlich mit hohen Investitionskosten verbunden. Zudem würde eine solche Integration die Umgestaltung etablierter und erprobter Prozessketten erfordern.

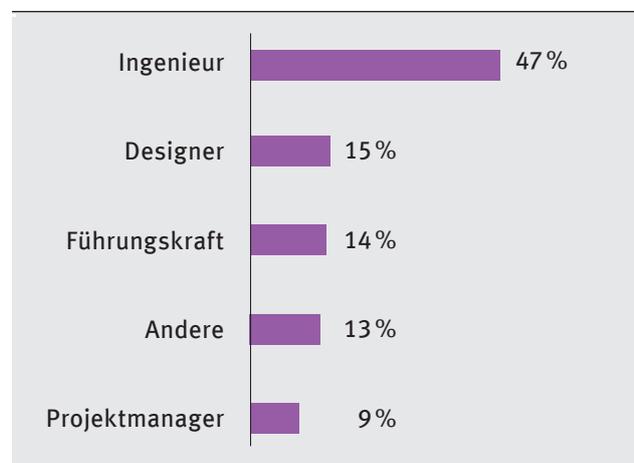
Produkte, die im 3D-Druckverfahren hergestellt werden, lassen sich in ihrer Mehrheit den folgenden Branchen zuordnen (nach Marquardt 2014):

- ▶ Automobilindustrie
- ▶ Architektur, Möbelindustrie, Design und Kunst
- ▶ Elektrotechnik- und Elektronikindustrie
- ▶ Film- und Unterhaltungsindustrie
- ▶ Luft- und Raumfahrtindustrie
- ▶ Medizintechnik, Prothetik, Dentaltechnik, medizinische Hilfsmittel
- ▶ Nahrungsmittelindustrie
- ▶ Rüstungsindustrie
- ▶ Sportgeräteindustrie
- ▶ Spielwaren- und Game-Industrie
- ▶ Textil- und Bekleidungsindustrie

Im Rahmen einer Online-Befragung der SMS Research Advisors, an der sich 700 Anwender aus dem Bereich des 3D-Drucks in Nordamerika beteiligten (stratasys Direct Manufacturing 2015), wurden die zentralen Berufsprofile, Branchen und Anwendungsfelder für die Wirtschaft dargestellt. Der Großteil der Umfrageteilnehmer waren Ingenieure, wobei 60 Prozent aller Teilnehmer in Unternehmen mit einem jährlichen Umsatz von weniger als 50 Mio. US-Dollar beschäftigt waren (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5:

Berufsprofile von 3D-Druckanwendern (N=700) in Unternehmen

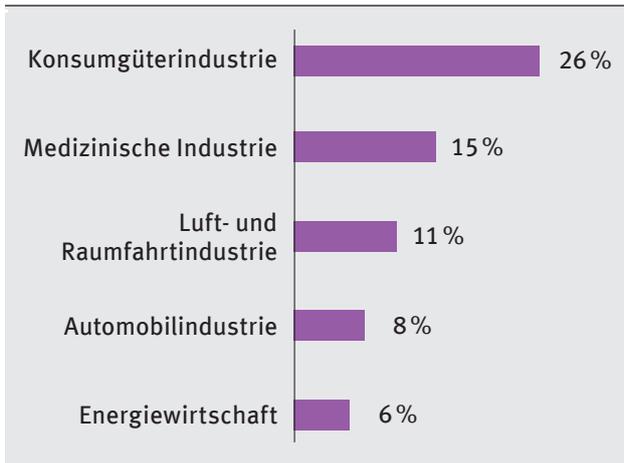


Quelle: angepasst nach stratasys Direct Manufacturing 2015

Als zentrale Branchen wurden die Konsumgüterindustrie, die medizintechnische Industrie, die Luft- und Raumfahrtindustrie, die Automobilindustrie und die Energiewirtschaft benannt (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6:

Branchenbezogene Nutzung des 3D-Drucks aktuell oder in den kommenden 3 Jahren

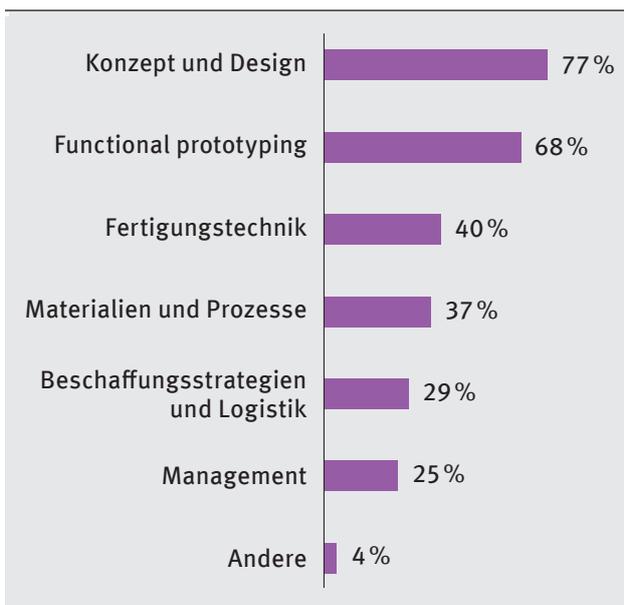


Quelle: angepasst nach stratays Direct Manufacturing 2015

Die wichtigsten Anwendungsfelder waren Konzeption und Design, Functional prototyping, Fertigungstechnik, Materialien und Prozesse, Beschaffungsstrategien und Logistik (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7:

Anwendungsbezogene Nutzung des 3D-Drucks aktuell oder in den kommenden 3 Jahren



Quelle: angepasst nach stratays Direct Manufacturing 2015

Der 3D-Druck wird es zukünftig erlauben, auf individuelle Konsum- und Produktbedürfnisse besser einzugehen, wie z. B. im Bereich der Medizintechnik. Hier wird ein großes Potenzial, z. B. für passgenaue Implantate und Prothesen gesehen. Einige Produkte, wie etwa Hörgeräte und Zahnersatz, werden bereits heute größtenteils im 3D-Druck hergestellt (Harhoff und Schnitzer 2015). Solche personalisierten Produkte, bei denen auf die individuelle Passfähigkeit und den Komfort besonders eingegangen werden kann, können eine Antwort auf die eingeschränkte Einsatzfähigkeit standardisierter Massenprodukte darstellen.

Zudem werden 3D-Drucker zunehmend für private Nutzer erschwinglich. Insbesondere Drucker, die auf Basis von Fused Deposition Modelling (FDM) arbeiten, werden bereits für unter € 1.000 angeboten. Dies versetzt die privaten Nutzer in die Lage, Produkte selber zu entwerfen, herzustellen und gegebenenfalls zu vertreiben.



Bisher nutzen insbesondere Privatpersonen den 3D-Druck, die dem sogenannten „Maker Movement“ zugeordnet werden können. Das Maker Movement ist eine Subkultur, die dem Selbermachen (Do-It-Yourself) verbunden ist. In dieser Gruppe agieren vor allem frühzeitige Technologieanwender, die digitale Werkzeuge und Software nutzen, um Produkte zu entwerfen oder Prototypen herzustellen. Sie arbeiten vorwiegend in (Online-)Communities zusammen und teilen ihre Ergebnisse und Entwürfe im Sinne einer Open Source-Kultur (Harhoff und Schnitzer 2015). Die Größe des deutschen und internationalen „Maker Movements“ lässt sich aktuell nicht beziffern, doch angesichts der Tatsache, dass selbst in Städten, die nicht als Metropolen gelten dürften, inzwischen sogenannte „FabLabs“ (Fabrikationslabore) und ähnliche Einrichtungen zum gemeinsamen Selbermachen mittels 3D-Druck und ähnlicher Geräte existieren, ist gegenwärtig von einer zwar immer noch nischenhaften, aber wachsenden Bewegung auszugehen.

Die Politik spielt als Akteur im Bereich 3D-Druck vor allem als Fördermittelgeber eine Rolle.¹² In Deutschland findet die Förderung des 3D-Drucks insbesondere im Kontext spezifischer Anwendungsbereiche statt. Der 3D-Druck wird im Rahmen der institutionellen Förderung sowie der Projektförderung des Bundes unterstützt, in erster Linie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Die Ziele der beiden aktuellen Fördermaßnahmen des BMBF, nämlich (i) „Additiv-Generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter“ (Laufzeit: 2013 – 2020; Gesamtbudget: € 45 Mio.) und (ii) „Additive Fertigung-Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialien“ (ProMat_3D) (Bekanntmachung aus dem Jahr 2015), sind:

- ▶ die Entwicklung des 3D-Drucks zu einer Schlüsseltechnologie,
- ▶ der Aufbau nachhaltiger Netzwerkstrukturen,
- ▶ die messbare Steigerung der Exportnachfrage,
- ▶ die Positionierung Deutschlands als Leitanbieter und
- ▶ das Vorantreiben der Produktions- und Materialforschung.

Die Zusammenhänge zwischen Forschungs- und Innovationspolitik sowie deren Wirkungen sind oftmals nur zeitlich verzögert wahrnehmbar. Um die langfristigen Implikationen aktueller Fördermaßnahmen darzustellen, wurden drei wichtige Datenbanken (UBA, DFG sowie die Förderkataloge des BMBF, BMUB, BMWi, BMEL und BMVI) zum Thema 3D-Druck ausgewertet. Unter den 30 geförderten Projekten (abgeschlossen oder noch laufend) im Bereich 3D-Druck sind die Ingenieurwissenschaften besonders stark vertreten. Es zeigt sich jedoch, dass auch die Sozial-, Umwelt- und Wirtschaftswissenschaften eine wichtige Rolle spielen. Die Themen Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sind zwar weit weniger stark vertreten als beispielsweise Materialien und Werkstoffe, werden jedoch im Bereich der Ingenieurwissenschaften bereits bearbeitet (Richter und Wischmann 2016).

Um die Forschungsaktivitäten zum 3D-Druck einzuschätzen, wurden die wissenschaftliche Forschung an Hochschulen und die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten außeruniversitärer wissenschaftlicher Einrichtungen und Unternehmen betrachtet. Um zu einer Einschätzung zu gelangen, wurden die Anzahl der Publikationen zu 3D-Druck in Fachmagazinen und der angemeldeten PCT-Patentfamilien ausgewählt. Weltweit hat sich die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel mit einem Schwerpunkt im Bereich 3D-Druck wie auch die Anzahl der jährlich angemeldeten PCT-Patentfamilien von 2000 bis 2012 mehr als verdreifacht (siehe Abbildung 8).

Zum 3D-Druck publizierten zwischen 2000 und 2014 vor allem Wissenschaftler/innen aus den USA, China und Deutschland (Harhoff und Schnitzer 2015). Drei technische Hochschulen in Deutschland zählen zu den Top 30 der bedeutendsten Forschungseinrichtungen im Bereich 3D-Druck: die Technische Universität München, die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen und die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Harhoff und Schnitzer 2015). Auf Grundlage der analysierten Forschungsprojekte und angesichts der aktuellen förderpolitischen Zielsetzungen in Deutschland kann davon ausgegangen werden, dass der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem 3D-Druck stark ingenieurwissenschaftlich geprägt ist.

Abbildung 8:

Zahl der Patentanmeldungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu 3D-Druck



Quelle: Harhoff und Schnitzer 2015

¹²Die 3D-Druckförderung in Deutschland geschieht auch über EU-Mittel (beispielhaft genannt sei hier das EU-geförderte Projekt „Performance“, an dem auch deutsche Unternehmen und Universitäten beteiligt waren). Eine Auswertung aller europäischen Projekte mit 3D-Bezug konnte im Rahmen dieses Trendberichts nicht geleistet werden.

3

Abschätzung der Be- und Entlastungen des 3D-Drucks

„Schon ihrer Natur nach sind 3D-Drucker eine nachhaltige Technologie, bezahlbare Produkte können mithilfe von 3D-Systemen Drucker folglich effizient hergestellt werden – Schicht um Schicht, während nur die notwendigen Materialien für jedes Teil genutzt werden, mit geringstem Materialverlust und energieeffizientem Prozess.“ (übersetzt nach 3D Systems 2015)

Eine weitverbreitete Auffassung ist, dass der 3D-Druck Ressourcen schont, Energie spart und Produktion und Konsum nachhaltiger gestaltet (siehe beispielsweise Campbell et al. 2011; Chen et al. 2015; Mani et al. 2014). Diese Sichtweise wird im Folgenden einer kritischen und systematischen Überprüfung unterzogen. Untersucht werden die direkten und indirekten Effekte auf die Umwelt sowie Umweltimplikationen aus dem Innovationspotenzial des 3D-Drucks. Dargestellt werden nur die relevanten Ergebnisse der drei Methoden (siehe Kapitel 1 für eine genauere Beschreibung der Methodik). Insgesamt entsteht so ein umfassendes Bild der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks.

3.1 Direkte Umweltauswirkungen

Produktionsverfahren wirken direkt auf die Umwelt ein. Energie wird aufgewendet, Werkstoffe und damit Rohstoffe werden eingesetzt und Schadstoffe freigesetzt. Gleiches gilt für den 3D-Druck: Umweltbelastungen entstehen, wie in Kapitel 2 dargestellt, unter anderem durch die Art des Druckverfahrens, die eingesetzten Materialien sowie die Art der Nutzung des 3D-Drucks. Alle drei Bereiche werden nachfolgend eingehender untersucht.

3.1.1 Druckverfahren

„Man muss 3D-Drucker genau betrachten, einen Schritt zurücktreten und begreifen, dass sie kleine Fabriken in einer Box sind“ (übersetzt nach University of California, Riverside 2015)

Die verschiedenen 3D-Druckverfahren wirken sich nur auf bestimmte Umwelt-Wirkkategorien in nennenswertem Maße aus. Wie das Assessment-Verfahren ergab,

Abbildung 9:

Facetten des 3D-Drucks



**Direkte
Umweltauswirkung**



**Indirekte
Umweltauswirkung**



**Umweltauswirkung des
Innovationspotenzials**

Quelle: siehe Bilderverzeichnis, Kapitel 7

sind die betroffenen Bereiche: Treibhausgasemissionen durch den Energiebedarf der Verfahren; Schadstoffe in Innenräumen durch Feinstaub, flüchtige organische Verbindungen (VOC – volatile organic compounds), Nanopartikel, Lösemittel; Unfälle durch Nutzung von Laien; Entlastungen bei der Ressourceninanspruchnahme durch rohstoffeffiziente Verfahren und Entlastungen des Abwasseraufkommens durch Wegfallen der Schneidflüssigkeit (siehe auch Abbildung 10 unten). Andere, ebenfalls untersuchte Bereiche sind durch den 3D-Druck betroffen, jedoch nicht signifikant: Physikalische Belastungen wie Lärm und Strahlung sowie biologische Belastungen wie Krankheitserreger und Invasoren, die in Bezug auf „herkömmliche“ Fertigungsverfahren zum Teil erheblich sind, ergeben sich für den 3D-Druck nicht in signifikantem Ausmaß.

Energiebedarf

„Der Energieverbrauch dominiert die Umweltwirkung der 3D-Drucker“ (übersetzt nach Faludi 2013)

Belastungen für die Umwelt ergeben sich durch den hohen Energiebedarf aller 3D-Druckgeräte. Der Energiebedarf variiert zwischen den einzelnen Druckverfahren (Olson 2013; Baumers et al. 2011). Die direkte Umweltauswirkung des 3D-Drucks wird aber in allen Verfahren vom Energieverbrauch dominiert (Faludi et al. 2015a; Faludi et al. 2015b). Wird der Energiebedarf aus fossilen Brennstoffen gedeckt, entstehen Treibhausgase, die das Klima belasten.

Verschiedene Faktoren wirken auf den Energieverbrauch ein. Dazu zählt erstens die Zeit, die ein Drucker braucht, ein 3D-Druckobjekt herzustellen (Mognol et al. 2006). Zweitens spielen die Häufigkeit des Drucks beziehungsweise die Nutzungsintervalle eine wichtige Rolle. Ein Drucker, der nur selten benutzt wird, oder der zwischen den Druckaufträgen lange Leerlaufzeiten hat, weist infolge des jeweils neuen Aufheizens einen hohen Energieverbrauch auf. So verzehnfacht sich der Energieverbrauch pro Produkt, wenn der Drucker nicht unter maximaler Auslastung produziert (Faludi et al. 2015b). Dieser Unterschied variiert jedoch bei den verschiedenen Verfahren stark. Für das Fused deposition modeling, ein extrusionsbasiertes Verfahren, macht es energetisch nahezu keinen Unterschied, ob nur ein einzelnes Produkt gefertigt wird, oder das Druckgerät voll ausgelastet ist, während das Laser Sintering Verfahren (pulverbasiert) unter Vollauslastung 98 Prozent weniger Energie pro gedrucktem Produkt verbraucht (Baumers et al. 2011). Gründe für diese starke Variation beim Laser Sintering Verfahren sind die hohen Energiebedarfe für Aufwärmen und Cool-Down (Baumers et al. 2011).

3D-Drucker können unter bestimmten Bedingungen weniger Energie verbrauchen als andere substituierte Herstellungsverfahren. Es kann allerdings keine allgemeine Aussage hinsichtlich des Energieaufwandes unterschiedlicher Verfahren getroffen werden, weil die „Nachhaltigkeit“ der unterschiedlichen Verfahren unter anderem von der Produktart/-anzahl abhängt. Der

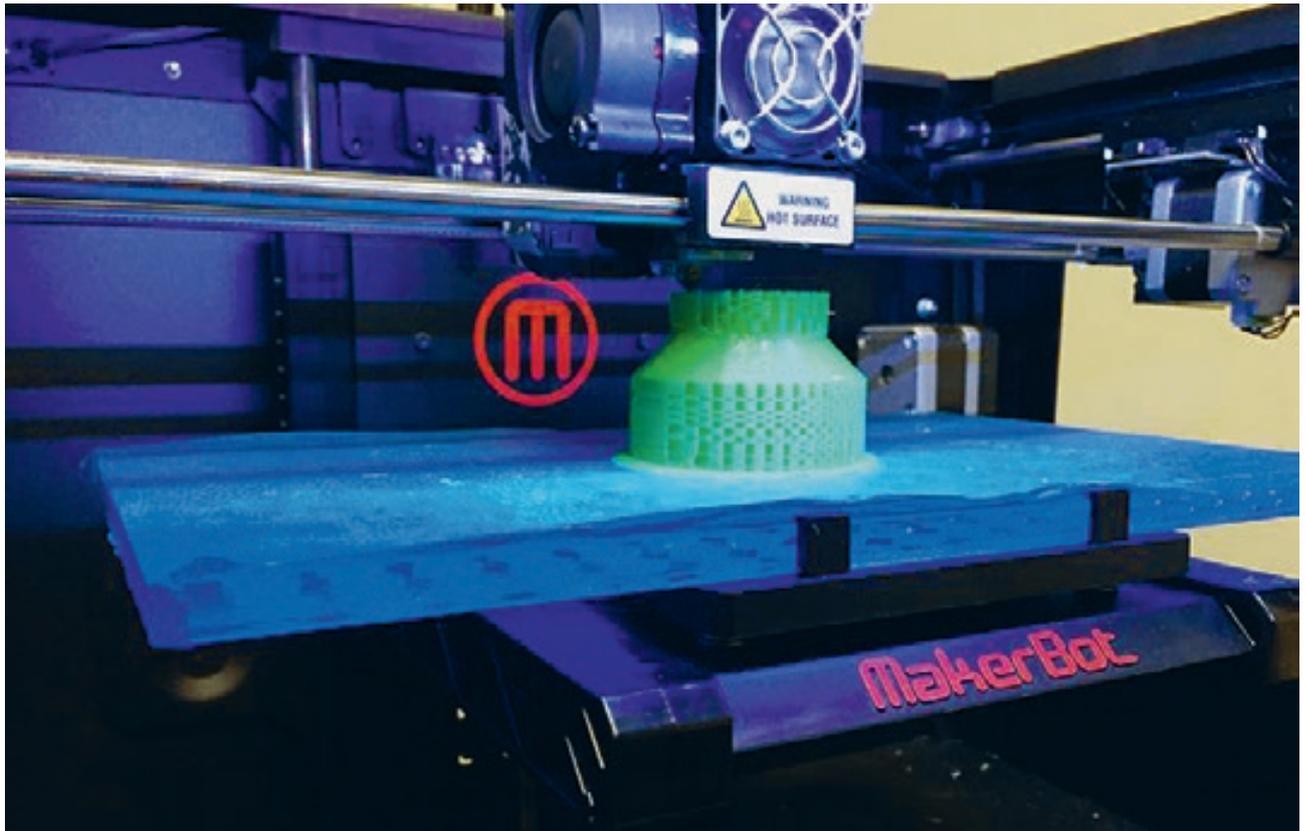
Abbildung 10:

Impact Assessment, Direkte Umweltauswirkungen, 3D-Druckverfahren

Verfahren	Treibhausgase	Verbrauch mineralischer Rohstoffe	Schadstoffe in Innenräumen	Abwasser	Störfälle / Unfälle
Pulverbasiert – PLS	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Pulverbasiert – MLS	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Extrusionsbasiert – Phy.	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Extrusionsbasiert – Che.	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
VAT; Stereolithographie	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Material Jetting	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Nicht relevant	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Binder Jetting	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Sheet Lamination	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Nicht relevant	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)
Directed Energy Depo.	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Nicht relevant	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)

Potentiell relevant (negativ)
 Potentiell relevant (positiv)
 Nicht relevant

Quelle: eigene Darstellung



3D-Druck wird voraussichtlich auch keine anderen Verfahren ablösen (siehe Kapitel 2.4 zum Markt 3D-Druck). Für einzelne gedruckte Objekte sind aber Ökobilanzen im Vergleich zu substituierten Produktionsverfahren durchgeführt worden. So eignet sich Selective Laser Sintering (SLS) für Kleinserien aus Energieverbrauchssicht besser als Spritzgussverfahren (Telenko und Seepersad 2011). Der Grund hierfür ist, dass für das Spritzgussverfahren Werkzeuge hergestellt werden müssen, wofür Energie aufgewendet werden muss. Gleichzeitig hat SLS aber einen grundsätzlich deutlich höheren Energieverbrauch – bei größeren Serien ist dementsprechend das Spritzgussverfahren vorzuziehen. Extrusionsbasierte Verfahren verbrauchen für die Produktion eines Teiles unter maximaler Nutzung weniger Energie als CNC-Fräsen, gleiches gilt auch für Stereolithografie-Verfahren (Faludi et al. 2015a). Zukünftig wird die Möglichkeit, Druckparameter individuell einzustellen, eine wichtige Voraussetzung sein, um das 3D-Druck-Verfahren energieeffizienter zu gestalten (Mognol et al. 2006). Vernetzte 3D-Drucker können eine effektivere Auslastung der Maschinen ermöglichen und die Nutzungsprofile der Drucker verbessern.

Insgesamt betrachtet müssen die Energiebedarfe der 3D-Druckverfahren in Relation zum jetzigen und zukünftig zu erwartenden Marktvolumen gesetzt werden. Wie in Kapitel 2 konstatiert, wächst die Nutzung in der Industrie zwar, aber die Anzahl der Geräte und das Marktvolumen bewegen sich auch in absehbarer Zukunft immer noch im geringfügigen Bereich im Vergleich zu anderen Produktionsverfahren. Entlastungen für verschiedene Anwendungen wie auch die Belastungen werden zukünftig deshalb absehbar nicht zu einem größeren umweltpolitischen Problem oder einer größeren Chance. Gleichwohl sollte der Energieverbrauch umweltpolitisch im Blick behalten werden, weil auch zukünftig dieser Parameter eine wichtige Stellschraube für die Nachhaltigkeit aller Druckverfahren sein wird. Momentan ist der Energieverbrauch vor allem für die Industrie zentral (da die Prozesse hier hochenergetisch sind). Wenn sich Desktop 3D-Drucker im Heimgebrauch weiter etablieren, könnte dies auch für diesen Bereich zu einem Thema werden.

Rohstoffeffizienz

„Kurz gesagt, 3D-Druck ist nicht notwendigerweise weniger verschwenderischer; der Abfall ist nicht notwendigerweise wiederverwertbar; der Abfall ist nicht einmal besonders wichtig im Vergleich zum Stromverbrauch der Drucker“ (übersetzt nach Faludi 2013)

Einer der meist diskutierten Vorteile des 3D-Drucks gegenüber herkömmlichen Herstellungsweisen, insbesondere den subtraktiven Verfahren, ist die Möglichkeit einer praktisch abfallfreien Herstellung von Produkten und Bauteilen. Gerade sehr individuelle Formen, wie beispielsweise Prothesen, können, wenn sie 3D-gedruckt werden, erhebliche Mengen an Material (und Herstellungskosten) einsparen. In der Zahntechnik ist schon eine klare Entwicklung hin zu CAD-geplanten und additiv hergestellten Implantaten erkennbar (van Noort 2012). Gedruckte Solarzellen von einigen hundert Nanometern Dicke haben gegenüber herkömmlichen Fertigungsweisen ebenfalls ein großes Potential, Material einzusparen und sich positiv auf die Ökobilanz auszuwirken (Krebs 2009). Auch bei der Metallverarbeitung kann Rohmaterial eingespart werden, wenn das Bauteil additiv mit dem 3D-Drucker hergestellt wird, da zum einen weniger Abfall anfällt und zum anderen für die Bauteile auch schon im Vorhinein weniger Material verwendet werden muss (Petrovic et al. 2011).

Jedoch muss das Argument der abfallfreien Produktion teilweise relativiert werden, denn auch beim 3D-Druck entstehen Abfälle während der Produktion, unter anderem durch Stützstrukturen, Fehldrucke und die Degradation von Material (Ahn et al. 2013). Stützstrukturen werden nicht für alle Druckverfahren hergestellt, sondern für extrusionsbasierte, pulverbasierte Verfahren und für das Binder Jetting (Almeida und Correia 2016). So wird bei extrusionsbasierten Verfahren die Stützstruktur durch Sekundärmaterial aufgebracht; bei pulverbasierten Verfahren und beim Binder Jetting fungiert das Pulverbett als Stützstruktur. Bei extrusionsbasierten Verfahren muss die Stützstruktur anschließend gewaschen oder weggebrochen werden.

Bisher fehlen außerdem Standardisierungen für Design und best practice-Vorgaben – aus dem CAD-Modell können so Objekte entstehen, die sich bezüglich ihrer Oberfläche und Lagetoleranz unterscheiden (Gao et al. 2015). Grund hierfür sind die unterschiedlichen verwendeten

Druckverfahren, Materialien und die Positionierung des Modells (Gao et al. 2015). Dadurch können mehrere Versuche notwendig werden, bis das Objekt den Anforderungen entspricht, so dass Fehldrucke anfallen. In Zukunft kann auch das Hinzufügen von Elektronik und Schaltkreisen während des Druckprozesses den Prozess verkomplizieren und zusätzliche Fehldrucke auslösen.

Feinstaubbelastungen, Nanopartikel, Flüchtige organische Verbindungen und Lösemittel und Abwasser

„Beim Drucken mit ABS stieß ein einzelner Drucker rund 200 Milliarden Ultrafein-Partikel pro Minute aus.“ (Meier 2013)

Emissionen können beim 3D-Druck durch unterschiedliche Quellen auftreten und während unterschiedlicher Prozess-Schritte (Prof. Dr. Hans-Joachim Schmid 2016 pers. Kommentar)¹³. Emissionen entstehen bei der Vorbereitung des Druckmaterials, beim Druckprozess selbst, bei der Entnahme der Teile, bei der Nachbehandlung sowie während der Nutzungsphase. Die Tabelle 2 (S. 26) listet plausible, zumeist weiter zu erforschende Annahmen über verschiedene Emissionen beim 3D-Druck auf (die Tabelle stellt nicht alle möglichen Emissionen dar). Die bei Privaten und im Desktop-Bereich eingesetzten Drucker sind in der Tabelle entsprechend gekennzeichnet (diese sind Photopolymerization, Stereolithographie und Extrusion based Processes).

Je nach verwendeter Technologie entstehen Stäube, Rauchgase und Dämpfe, die gesundheitsschädlich sind. Beispielsweise treten bei pulverbasierten Verfahren unter anderem die folgenden Emissionen auf: Bei der Vorbereitung des Druckmaterials werden Stäube freigesetzt; diese halten sich in der Luft und sind inhalierbar. Stäube treten auch durch Additive (also Zusatzstoffen in Druckmaterialien) auf, die gesundheitsschädlich sein können; hier können auch Belastungen durch Nano-Partikel entstehen. Stäube entstehen beim Prozess selbst, beispielsweise bei Metallen durch Metallstaub (Feinstaubpotenzial). Industriell eingesetzte Maschinen haben zwar Filter. Es können jedoch Nanopartikel durch die Schmelzprozesse entstehen, die dann bei der Entnahme, Säuberung, Polieren und Oberflächenbehandlung des Bauteils freigesetzt und inhaliert werden können. Die Teile können außerdem Restpartikel und Lösungsmittelrückstände enthalten, die in der Nutzungsphase emittieren.

¹³Die im Nachfolgenden aufgeführten persönlichen Kommentare sind während eines Expertenworkshops im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Berlin entstanden, der am 29. September 2016 stattfand.

Für die Desktop-Nutzung und die industrielle Anwendung des 3D-Drucks sind diese Emissionen bereits teils stärker untersucht worden: so sind negative Wirkungen bei den pulverbasierten und extrusionsbasierten Verfahren (Stephens 2013) sowie bei VAT/Stereolithographie (Short et al. 2015) und Binder Jetting (Afshar-Mohajer et al. 2015) zu erwarten. Hier werden Feinstaub (PM) und flüchtige organische Verbindungen (VOC) freigesetzt. Beispielsweise ist der Ausstoß von Partikeln der Größe $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) beim Binder Jetting um ein zehnfaches höher als der durch die USEPA (US Environmental Protection Agency) festgelegte Grenzwert von $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Beim Druck mit extrusionsbasierten Verfahren und dem Einsatz von PLA und ABS ((Acrylnitril-Butadien-Styrol) Druckmaterialien betrug die Emissionsrate zwischen ca. $2,0 \times 10^{10}$ pro Minute für PLA (Polylactide) gedruckte Objekte und ca. $1,9 \times 10^{11}$ pro Minute für mit ABS gedruckte Objekte (Stephens 2013). Beim Druck mit fünf kommerziell erhältlichen extrusionsbasierten Druckern und neun verschiedenen Druckmaterialien (unter anderem ABS; PLA; Nylon; Sandstein; Holz) ergaben sich ebenfalls hohe Feinstaub und VOC-Belastungen (Azimi et al. 2016): die Emissionen sind höher für ABS als für PLA. Die VOC-Belastungen variieren stärker, wobei die höchsten Belastungen durch Nylon, PCTPE und ABS auftreten (Azimi et al. 2016). Dabei wurde beim Druck mit ABS-Materialien und High Impact Polystyrene Styrol freigesetzt, das Krebs verursachen kann; beim Druck mit Nylon, PCTPE, Sandstein und Holz wurde Caprolactam in größeren Mengen freigesetzt, das ebenfalls gesundheitsschädlich ist (Azimi et al. 2016).

Auch die totale Menge an flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) übersteigt mit maximalen Werten von bis zu $1.725 \mu\text{g}/\text{m}^3$ den empfohlenen Wert des Umweltinstitut der Europäischen Kommission (Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre der Europäischen Kommission) von $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich (Afshar-Mohajer et al. 2015). Die Feinstaubbelastungen der Verfahren Material Jetting, Sheet Lamination und Directed Energy Deposition sind bisher noch nicht ausreichend untersucht. Da aber auch hier Kunststoffe verwendet werden können, ist es wahrscheinlich, dass durch die Polymerisierung Feinstaub und VOC freigesetzt werden.

Entlastungen entstehen in der Industrie dadurch, dass weder Wasser noch Schneidflüssigkeit zum Kühlen und Fräsen eingesetzt werden muss (Huang et al. 2013). In der Schneidflüssigkeit verwendete Chemikalien belasten die Umwelt und setzen Arbeitern Gesundheitsrisiken aus (Alves et al. 2006). So werden in der Flüssigkeit beispielsweise Biozide, Korrosionsschutzmittel und Antischaummittel eingesetzt, die die Abwässer belasten können.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, wächst die Anzahl der Desktop-Drucker stark an. Damit wird insbesondere die Anwendung von 3D-Druck durch Laien ein zukünftiges Problem sein. Private Anwender (einschließlich Kinder), Anwender in Schulen und öffentlichen Einrichtungen, aber auch Architekten oder Designer, werden zukünftig stärkeren Risiken mit Blick auf VOCs und Feinstaub ausgesetzt. Für Anwender im Industriebereich ist durch stärkeren Arbeitsschutz mit weniger starken Risiken zu rechnen, solange sie hinreichend geschult werden und die Prozesse möglichst automatisiert ablaufen.



Tabelle 2:

Plausible Annahmen über verschiedene Emissionen beim 3D-Druck (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Technologie	Befüllen des Druckmaterials	Bauprozess	Entnahme der Teile	Nachbearbeitung	Nutzung bis zur Entsorgung
Binder Jetting	Staubbildung (bei der Befüllung mit Pulvern)	Rauchgase	Staubbildung (bei der Entnahme und dem Ausblasen von Restpulver aus dem Bauteil)	Rauchgas (Sintern); Infiltration; Staubbildung (Polieren); Oberflächenbehandlung	In Abhängigkeit von der Nachbearbeitung (z. B. Infiltration) können Restmonomere möglich sein; Restpartikel
Powder Bed Fusion Processes	Staubbildung (bei der Befüllung mit Pulvern)	Freisetzung von Dämpfen und Stäuben (Pyrolyse)	Staubbildung (bei der Entnahme und dem Ausblasen von Restpulver aus dem Bauteil)	Staubbildung (Polieren); Oberflächenbehandlung	Restpartikel; Lösungsmittelrückstände
Photo-polymerization Processes oder Stereolithographie*	Gasförmige Emissionen (aus hochreaktiven Monomeren, Vernetzern und Aktivatoren)	Gasförmige Emissionen (aus Monomeren) → Aerosol- und Partikelbildung möglich, UV-Strahlung (UV-Aushärtung)	Gasförmige Emissionen (aus Monomeren)	Staubbildung durch Oberflächenbehandlung, Pyrolyse polymeren Materials durch thermische Behandlung	Restmonomere
Extrusion Based Processes*	–	Freisetzung von Dämpfen und Stäuben (aus erhitzten Polymeren)	–	Oberflächenbehandlung (selten), z. B. Ausdünstungen beim Eintauchen in Azeton	–
Directed Energy Deposition Processes	Staubbildung (bei der Befüllung mit Pulvern)	Freisetzung von Dämpfen und Stäuben (Pyrolyse)	–	–	–
Material Jetting	Gasförmige Emissionen (aus hochreaktiven Monomeren, Vernetzern und Aktivatoren)	Gasförmige Emissionen (aus Monomeren) → Aerosol- und Partikelbildung möglich	Gasförmige Emissionen (aus Monomeren)	Entfernung von Stützmaterial (Wachs)	Restmonomere

Verfahren, die mit einem * gekennzeichnet sind, werden auch im Desktopbereich von Laien genutzt.

Quelle: Angepasst, ergänzt und übersetzt nach Seeger und Günster (2016; unveröffentlicht)

3.1.2 Materialien: Abbau, Aufbereitung, Herstellung und Materialeigenschaften

„Gute Materialien auszuwählen kann auch wichtig sein. Bessere Materialien reduzieren nicht nur den Ressourcenverbrauch, sie vermindern auch die Toxizität und den Energieverbrauch“ (übersetzt nach Faludi 2013)

Zukünftige Umweltauswirkungen ergeben sich auch direkt durch die Materialien, die im 3D-Druck zum Einsatz kommen. Das Assessment-Verfahren ergab hier grundsätzlich Auswirkungen mit Blick auf viele der untersuchten Wirkkategorien, abhängig vom verwendeten Material – insbesondere in den Bereichen chemische, physikalische und biologische Belastungen sowie Ressourceninanspruchnahmen.

Die Basis der meisten Kunststoffe ist Erdöl (das Bild rechts stellt Druckfilament dar, das auf Kunststoffen basiert). Bei der Gewinnung und Weiterverarbeitung entstehen Belastungen für die Umwelt durch Treibhausgase. Auch biologisch abbaubare Kunststoffe wie Polycaprolacton (PCL) und Polylactide (PLA) verursachen Treibhausgasemissionen, unter anderem durch den Anbau der Nutzpflanzen und Weiterverarbeitung. Aus Umweltsicht ist bei biologisch abbaubaren Kunststoffen außerdem mit zu bedenken, dass die Abbaubarkeit unter Laborbedingung nicht immer mit der Praxis korrespondiert und durch die Kompostierung kein wirklicher ökologischer Nutzen entsteht (beispielsweise Humusbildung). Außerdem können Umweltauswirkungen durch Mikroplastik-Eintrag entstehen, wenn als Folgewirkung der kommunizierten biologischen Abbaubarkeit Kunststoffe in der Umwelt vermehrt entsorgt werden.



Werden flüssige photoreaktive Kunststoffe thermisch verwertet, entstehen Belastungen für die Außenluft durch Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Je nach zugesetzten Additiven können zusätzlich giftige Gase entstehen, z. B. Cyanwasserstoff oder Schwefelverbindungen. Aktuell kommen zudem vermehrt Verbundwerkstoffe aus PLA und Füllstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Kaffee oder Kokosfasern) auf den Markt. Verbundwerkstoffe können im 3D-Druck unter anderem eingesetzt werden, um steifere und festere Objekte zu drucken.

Wenn Metalle verwendet werden, kommt es zu anderen Be- und Entlastungsmustern. Zur Verarbeitung der Metalle ist fast durchweg hohe Energie nötig. Wenn dieser Energiebedarf mit fossilen Brennstoffen gedeckt wird, werden Treibhausgase ausgestoßen. Der Abbau wie auch die Verarbeitung und Entsorgung von Metallen gehen überwiegend mit hoher Abwasserbelastung sowie

Abbildung 11:

Direkte Umweltauswirkungen, Abbau, Aufbereitung, Herstellung

Materialien	Treibhausgase	Schadstoffe in Außenluft	Abwasser	Diffuse Nähr- und Schadstoffeinträge	Verbrauch mineralischer Rohstoffe	Wasserverbrauch	Naturraumbeanspruchung
Kunststoffe	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Nicht relevant	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Nicht relevant	Potentiell relevant (negativ)
Metalle	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)	Nicht relevant	Potentiell relevant (negativ)
Nachwachsende Rohstoffe	Potentiell relevant (negativ)	Nicht relevant	Nicht relevant	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (positiv)	Potentiell relevant (negativ)	Potentiell relevant (negativ)

Potentiell relevant (negativ)
 Potentiell relevant (positiv)
 Nicht relevant

Quelle: eigene Darstellung

hohen Schadstoffeinträgen einher. Außerdem werden durch Abbaugelände Flächen und Naturräume in Anspruch genommen. Metallressourcen haben eine natürliche Grenze, sodass bei unzureichendem Recycling der Materialien eine Verfügbarkeitsknappheit entsteht.

Werden Metalle und Kunststoffe durch neue Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen ersetzt, entstehen Umweltauswirkungen unter anderem beim Anbau der Nutzpflanzen für die Naturstoffe, z. B. für Stärke und Papier, wenn Dünger und Pestizide verwendet werden. Nähr- und Schadstoffe können in Oberflächen- und Grundwässer eingetragen werden. Generell gilt für alle Kunststoffe, Metalle und Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen, dass die verwendeten Materialien einen hohen Anteil grauer Energie (embodied energy) aufweisen, da für den 3D-Druck hochgradig raffinierte Stoffe benötigt werden (Olson 2013). Außerdem nimmt die Agrarproduktion Wasserressourcen und Naturraum in Anspruch. Besonders eine nicht nachhaltige Holzproduktion zur Papierherstellung, stellt eine große Gefahr für Regionen mit sensiblen Ökosystemen dar. Schließlich ist zu beachten, dass zwar in neuester Zeit mehr Kunststofffilamente aus Naturstoffen auf den Markt kommen, wie Green-TEC Filament, BioFila,

Buzzed und Willowflex, die Anbieter das Material jedoch bisher eher an Privatkunden verkaufen, da das Filament noch relativ neu auf dem Markt ist und teurer als bisher verwendetes Material ist. Insgesamt stellen diese Materialien bisher noch eine Nische dar.

Neben den Umweltbelastungen, die durch Abbau, Aufbereitung und Herstellung von Druckmaterialien entstehen, können Umweltbelastungen auch durch die Eigenschaften der Materialien auftreten. Durch FDM und Stereolithographie hergestellte Objekte können toxisch sein, wie erste Forschungsergebnisse für die zwei weit verbreiteten und kommerziell erhältlichen 3D-Druckverfahren nahelegen.¹⁴ Die Toxizität der durch FDM- und Stereolithografie (SLA) aus Polymer-Filament hergestellten Teilen wurde hierfür mithilfe von Zebrafischen bewertet (einem gängigen Verfahren in der Toxikologie) (Oskui et al. 2016; Macdonald et al. 2016). Untersucht wurden unter anderem die Überlebensrate sowie Entwicklungs-Anomalitäten im Vergleich zu einer Kontrollgruppe. Diese ersten Untersuchungen zeigen, dass die SLA-Teile wesentlich stärker toxisch sind als FDM-Teile: Mehr als die Hälfte der den SLA-Teilen ausgesetzten Fische starb nach drei Tagen, nach sieben Tagen waren alle Zebrafische verendet (im Unterschied

Abbildung 12:

Direkte Umweltauswirkungen, Materialeigenschaften

	Schadstoffe in Innenräumen	Ressourceninanspruchnahme
Toxizität, FDM / SLA gedruckte Objekte		
Recyclingfähigkeit / Polymerisierung		
Simultaner Druck verschiedener Materialien		
Degradation von Pulvern und Photopolymeren		

Potentiell relevant (negativ)
 Nicht relevant

Quelle: eigene Darstellung

¹⁴Die Toxizität der gedruckten Objekte kann auch zusätzlich durch den Prozess selbst bedingt sein.

hierzu waren nach sieben Tagen noch etwas weniger als 60 Prozent der den FDM-Teilen ausgesetzten Zebrafische am Leben). Als Ursache für die Toxizität der SLA-Teile vermuten die Autoren, dass die im Filament enthaltenen Monomere und kurzkettigen Polymere aus dem gedruckten Teil auswaschen (die genaue chemische Zusammensetzung der Materialien ist für die untersuchten Materialien nicht bekannt; allerdings wird im Sicherheitsdatenblatt den Autoren zufolge darauf verwiesen, dass im eingesetzten Druckmaterial Acrylate beziehungsweise Methacrylat-Monomere enthalten sind, die toxisch sein können) (Oskui et al. 2016: 4). Die Toxizität von mit Stereolithografie gedruckten Objekten kann durch nachträgliche Behandlung mit UV-Licht reduziert werden, grundsätzlich verdeutlicht dies aber die Notwendigkeit, 3D-gedruckte Objekte und Abfälle sicher zu nutzen und zu entsorgen.

Ein weiteres Problem ist die Recyclingfähigkeit der Materialien beziehungsweise 3D-gedruckten Objekte. Bei Photopolymerisierungsprozessen (z. B. Stereolithographie) werden in einem chemischen Verfahren Materialien umgewandelt; die Endprodukte sind nicht recyclingfähig (vergleiche OECD 2017: 29f.). Zudem werden die zukünftigen 3D-Drucker den simultanen Druck von verschiedenen Materialien zulassen, die in einem Bauteil vereint werden. Hierdurch wird ein Recycling erschwert beziehungsweise unmöglich, weil eine sortenreine Trennung nicht ohne weiteres machbar ist. Auch die Rückgewinnung von Primärkunststoffen aus 3D-gedruckten Verbundwerkstoffen stellt eine besondere Herausforderung dar, weil die Füllmaterialien (Pulver, Fasern et cetera) nur schwer von der Kunststoffmatrix separiert werden können. Beim Drucken von Metallen und Legierungen können zudem Bauteile hergestellt werden, die im Vergleich zu klassisch hergestellten Bauteilen (z. B. durch Fräsen) andere Werkstoffeigenschaften aufweisen. So können beispielsweise Stähle gedruckt werden, die durch die punktgenaue Bestimmung der Druckparameter neue mechanische Eigenschaften haben; hierdurch können sich unter anderem die Rohstoffinputs in die Kreislaufwirtschaft verändern.

Weiterhin ist insbesondere die Degradation von Pulvern und Photopolymeren ein Problem – so kann mit Polymeren im Pulverbettverfahren 30 Prozent des Materials durch den Druckprozess an Qualität verlieren und nicht wieder verwendet werden (Silva und Rezende 2013). Auch bei der Verwendung von Metallpulvern können die Materialien degradieren. Unreine Pulver können aber für die Druckverfahren nicht verwendet werden (OECD 2017).

Insgesamt betrachtet relativiert sich durch die teils mangelnde Recyclingfähigkeit, die Degradation einiger Materialien und die Verwendung von Stützstrukturen in einigen 3D-Druckverfahren die mögliche zukünftige Entlastung durch Materialeinsparungen. In Zukunft werden Verfahrensverbesserungen gerade bei der Degradation von Material allerdings die Rohstoffeffizienz verbessern.

3.1.3 Anwendungsfelder des 3D-Drucks

„Mittlerweile ist der 3D-Druck so einfach zu handhaben und die Werkstücke so schnell herzustellen, dass die Anwendungsmöglichkeiten enorm vielseitig geworden sind.“ (FIZ Karlsruhe 2016)

Der 3D-Druck wird von der Industrie, Dienstleistern, Handwerkern und Privatpersonen eingesetzt. Gedruckt werden beispielsweise Prototypen, Ersatzteile und Werkzeuge. Diese verschiedenen Nutzungsmuster und Leistungsbereitstellungen wurden mithilfe des Assessment-Verfahrens auf ihre potentielle Umweltauswirkung untersucht. Die relevanten Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt und in der Abbildung 12 verdeutlicht. Entlastungen und Belastungen treten vor allem in den Bereichen Chemische Belastungen und Ressourceninanspruchnahme auf. Nicht relevant sind die Kategorien Physikalische Belastungen (Lärm; Strahlung; Tötung von Tieren), Biologische Belastungen (Krankheitserreger; Invasoren) und Störfälle / Unfälle.

Druck für den Eigengebrauch

„Überproduktion von mehr oder minder wertfreien Gegenständen rechtfertigt die Frage, die uns immer wieder gestellt wird: Wofür braucht man im Haushalt eigentlich einen 3D-Drucker?“ (FAZ 2014)

Zukünftig ist zu erwarten, dass die private Nutzung von 3D-Druckgeräten rasant anwachsen wird – unter anderem aufgrund der zunehmenden Erschwinglichkeit und der gewachsenen gesellschaftlichen Aufmerksamkeit (siehe hierzu auch die Marktentwicklung in Kapitel 2 und die Einleitung). Der 3D-Druck ermöglicht in Zukunft Entlastungen durch Reparaturen zu Hause, da mit dem Drucker schnell und einfach Ersatzteile hergestellt werden können, die im Handel nur selten oder gar nicht angeboten werden (siehe unten, Abschnitt zu Ersatzteildruck). Belastungen werden entstehen, wenn aufgrund mangelnder technischer Kenntnisse fehlerhafte Objekte (sogenannte „crappy objects“) ausgedruckt werden oder Objekte stetig angepasst und verbessert werden und somit unnötiger Abfall produziert wird. Voraussichtlich

werden in den nächsten Jahren mit der Verbreitung des 3D-Drucks auch deutlich mehr nonsense-Objekte gedruckt werden, die keinen Mehrwert für die Nutzer/ Konsumenten haben (wie beispielsweise Einwegsonnenbrillen oder Einweggeschirr). Mit dem Druck für den Eigengebrauch können auch Lebensstil- und Konsumveränderungen einhergehen (siehe Kapitel 3.2).

Druck von Prototypen

„Im produzierendem Gewerbe ist der Anwendung von rapid prototyping keine Grenzen gesetzt. Daraus folgen verbesserte und effizientere Forschung, verbessertes Design und die Entwicklung von neuen Produkten, ohne viele Ressourcen durch Versuch und Irrtum zu verschwenden.“ (übersetzt nach Anubis 3D 2016)

Beim „Rapid Prototyping“, dem ursprünglichen Einsatzgebiet des 3D-Drucks, werden die Stärken der schnellen und flexiblen Fertigung genutzt. In nahezu allen Industriebereichen ist der 3D-Druck bereits ein wichtiges Hilfsmittel effizient Prototypen herzustellen und so den Innovationsprozess zu beschleunigen. Größter Anwender ist derzeit die Automobilindustrie. So konnte Ford beispielsweise die durchschnittliche Entwicklungszeit von Prototypen von drei bis vier Monate auf wenige Wochen

reduzieren (Loy und Tatham 2016). Die Produktion von Prototypen beansprucht (je nach Druckverfahren) wesentlich weniger Ressourcen und Energie als die Produktion durch herkömmliche Verfahren – durch die weitere Ausweitung können in Zukunft noch deutlichere Umweltentlastungen entstehen. Durch Rapid Prototyping ist es außerdem möglich, den Entwicklungsprozess mehrfach zu durchlaufen und gegebenenfalls anzupassen (Loy und Tatham 2016). Weiterhin kann frühes und schnelleres Prototyping dazu führen, dass weniger Fehler im weiteren Entwicklungsprozess auftreten (Gao et al. 2015). Dies kann allerdings auch den negativen Effekt mit sich bringen, dass unnötig getestet und evaluiert wird, da durch Rapid Prototyping das Testen beschleunigt und erleichtert wird (Gao et al. 2015).

Durch weitere Qualitätssteigerungen und eine Senkung der Anschaffungskosten für 3D-Druckgeräte steht dieses Verfahren in Zukunft möglicherweise außerdem noch öfter für Anwendungen in offenen Werkstätten für Privat-anwender (sogenannten „FabLabs“ oder „MakerSpaces“) zur Verfügung und ermöglicht es Einzelpersonen, ihre Ideen zu testen. Auch im Bereich Design und in der Architektur wird der 3D-Druck in Zukunft stärker zum Einsatz kommen. Architekten und Designer können

Abbildung 13:

Direkte Umweltauswirkungen, Nutzung und Leistungsbereitstellung

Nutzung	Treibhaus-gase	Schadstoffe in Innen-räumen	Diffuse Nähr- und Schadstoff-einträge	Verbrauch mineralischer Rohstoffe	Verbrauch biotischer Rohstoffe	Wasser-verbrauch	Mecha-nische Tötung von Tieren	Naturraum-beanspru-chung	Störfälle/ Unfälle
Druck für den Eigengebrauch				■	■				
Druck von Prototypen	■			■/■					
Verwendung von Leichtbau	■			■					
Reparaturen durch Ersatzteildruck	■			■					
Werkzeug-herstellung	■			■					
Recycling	■		■						
Anwendungen in der Bauindustrie		■		■					■
Bioprinting	■		■			■	■	■	

Potentiell relevant (negativ)
 Potentiell relevant (positiv)
 Potentiell relevant (negativ / positiv)
 Nicht relevant

Quelle: eigene Darstellung

Produkte und Objekte so schneller ausprobieren und anpassen. Innovationsprozesse könnten dadurch erheblich beschleunigt werden.

Verwendung von Leichtbau

„3D-Druck bietet der Industrie durch bislang nicht realisierbare Designoptionen ungeahnte Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung.“ (Leichtbau BW GmbH 2016)

Das Entlastungspotenzial ergibt sich aus der Möglichkeit, durch den 3D-Druck besonders komplexe Leichtbaustrukturen zu realisieren (Petschow 2014). Durch das geringere Gewicht der Fahrzeugteile und Flugzeugteile, die im Leichtbau hergestellt werden, wird weniger Antriebskraftstoff verbraucht und somit werden weniger Treibhausgase ausgestoßen (Burkhart und Aurich 2015). Eine Studie zur Abschätzung des Einsparpotenzials von Treibhausgasemissionen von Flugzeugen mit Leichtbauelementen kommt beispielsweise zu dem Ergebnis, dass im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen 92 bis 215 Millionen Tonnen Treibhausgasäquivalente pro Jahr eingespart werden könnten. Außerdem können umwelt- und gesundheitsschädliche Metalle wie Aluminium, Titan und Nickel sparsamer eingesetzt werden, da für die Herstellung der Teile weniger Material eingesetzt werden muss (Huang et al. 2015).

Anwender der 3D-Druck-Leichtbaufertigung finden sich in der Automobil- sowie Luft- und Raumfahrtindustrie. In der zukünftigen Entwicklung werden Verbundmaterialien eine wichtige Rolle spielen und die Leichtbautechnologie per 3D-Druck für weitere Anwendungsgebiete und Akteure – zum Beispiel im Bereich der erneuerbaren Energien als Material für Windturbinenflügel – interessant machen.

Ersatzteile und Werkzeugherstellung

„Dank des 3D-Drucks müssen Unternehmen nicht länger Ersatzteile physisch im Warenlager aufbewahren. Stattdessen können sie die Teile on-demand, wo benötigt, drucken, und rasch zum Kunden liefern“ (DHL 2016: 18)

Auch in der Industrie entlastet die Herstellung spezieller Ersatzteile mithilfe von 3D-Druck Umweltressourcen und Energie, da Reparaturen ermöglicht oder beschleunigt werden, die das Leben von Werkzeugen oder Produkten verlängern. Beispielsweise setzen Flugzeughersteller verstärkt auf 3D-gedruckte Ersatzteile gerade

für komplexe Leichtbaukonstruktionen, um das Flugzeug schnell wieder in Einsatzbereitschaft zu versetzen (vergleiche Khajavi et al. 2014). Firmen wie Siemens setzen auch auf den Ersatzteildruck: Hier werden beispielsweise Ersatzteile direkt auf Gasturbinen gedruckt (Andreas Graichen und Christoph Kiener 2016, Siemens, pers. Kommentar). Die zu ersetzenden Teile werden vorher entfernt. Dadurch halten die Brenner länger.

Zudem werden Firmen gegründet, die sich auf den Druck von Ersatzteilen spezialisieren (siehe beispielsweise den Ersatzteildienstleister ExOne aus den USA). Diese werden unter anderem von Unternehmen genutzt, die selbst keine 3D-Drucker einsetzen: so plant die Deutsche Bahn beispielsweise nicht mehr verfügbare Ersatzteile für Ihre Züge durch Dienstleister fertigen zu lassen (Stefanie Brickwede und Cagdas Girgin 2016, Deutsche Bahn, pers. Kommentar).

Eine Individualisierung der Herstellung bringt außerdem den Vorteil, Überproduktionen zu verhindern und Lagerungskosten zu vermeiden. Allerdings zeigt hier die Fallstudie der Nutzung von 3D-Druck in der Ersatzteillieferkette für einen Kampffjet (vergleiche Khajavi et al. 2014), dass die zentralisierte Produktion von Ersatzteilen der dezentralen Produktion zurzeit noch vorzuziehen ist. In Zukunft könnte der 3D-Druck aber interessant werden, wenn die Drucker im Preis fallen und ihre technischen Fähigkeiten wachsen.

Die Konstruktion spezieller Formwerkzeuge ist in vielen Produktionsbereichen ein aufwendiger Schritt. Komplexe Werkzeuge mit Kühlkanälen, beispielsweise für das Spritzgussverfahren bei Kunststoffteilen, können mit 3D gedruckten Konstruktionen einfacher und schneller hergestellt werden. In Zukunft ist zu erwarten, dass mit einer verstärkten Anwendung des 3D-Drucks in Unternehmen, auch die Herstellung eigener Werkzeuge und Ersatzteile an Bedeutung gewinnen wird. Negative Gesundheitseffekte durch Einsatz des 3D-Drucks für Ersatzteile und Werkzeuge sind in der industriellen Anwendung weniger stark zu erwarten, weil die Arbeitsschutz-Standards in der Industrie unabhängig vom Verfahren eingehalten werden müssen. Effekte könnten aber externalisiert entstehen, wenn Werkzeuge im Ausland hergestellt werden mit entsprechend geringeren Sozial- und Umweltstandards.

Auch Privaten bietet der 3D-Druck die Möglichkeit, Ersatzteile herzustellen. So können beispielsweise mithilfe des RepRap Druckers Ersatzteile gedruckt werden, die die Lebensdauer des RepRap stark verlängern. Private können durch im Internet frei verfügbare Designs oder (zukünftig) durch den Einsatz von 3D-Scan Ersatzteile herstellen. Auf der Webseite thingiverse.com finden sich beispielsweise mehr als 400 Vorlagen für Ersatzteile (z. B. für Brettspiele, Geschirrspüler oder Waschbecken) (thingiverse 2016). Für die Zukunft des privaten Ersatzteildrucks sind Plattformen für CAD-Modelle wichtig, die für möglichst viele Nutzer zugänglich sind und gut angelegte Dateien bereitstellen. Zentral ist außerdem sicherzustellen, dass private Anwender (also Dritte) Zugang zu Ersatzteilverlagen von Unternehmen bekommen (kostenlos oder gegen Bezahlung). Hier sind Copyright-Fragen zu klären, sodass Ersatzteile beispielsweise von 3D-Druckdienstleistern für private Anwender gedruckt werden können.

Dezentrales Recycling

„Mit der Entwicklung Plastik als 3D-Druckfilament wiederzuverwenden, können wir buchstäblich Müll in Schätze verwandeln“ (übersetzt nach 3DPrinterOS 2016)

Die 3D-Druck-Technologie bietet Umsetzungsmöglichkeiten für neue Recyclingkonzepte vor allem bei Kunststoffen.¹⁵ So kann Kunststoffabfall aus z. B. dem Ozean verwendet werden, um neue Druckmaterialien herzustellen, womit der Verschmutzung von Böden und Gewässern entgegenwirkt wird (Finger 2014; Lomas 2014). Zu beachten ist hierbei aber, dass Materialien aus dem Ozean durch Salz, Reibung und UV-Wirkung degradieren können und Recycling und Aufbereitung deshalb



eine Herausforderung darstellen. Private könnten direkt auch ein Kreislaufsystem etablieren, bei dem gedruckte Objekte wieder zu Filament umgewandelt werden (unter Einsatz von Energie) (vergleiche OECD 2017).

Bisherige Forschung für das Szenario des Recyclings von Hauskunststoffabfall im privaten Bereich zeigt, dass weniger graue Energie (embodied energy) aufgewendet werden muss als in konventionellen Recyclingsystemen (vergleiche Kreiger und Pearce 2014). Dabei wird der Hauskunststoffabfall vor Ort zerkleinert, zu neuem Filament verarbeitet und hieraus werden neue Produkte hergestellt. Für wenig besiedelte Gebiete könnten sich so bis zu 80 Prozent weniger Energiebedarf für Transport und Sammeln von Kunststoffabfall ergeben. Für die USA könnten pro Jahr bis zu 100 Millionen MJ an Energie eingespart werden (Kreiger et al. 2014).

Erste Anwendungsgebiete gibt es hier bereits: Die Chance, das Bewusstsein für das Kunststoffabfallproblem zu schärfen, bietet beispielsweise eine Idee des kanadischen Startup Plastic Bank, welche mithilfe von 3D-Druckern umgesetzt werden kann. An Tauschstellen soll Kunststoffabfall abgegeben, zu neuem Filament verarbeitet und hieraus Haushaltsgerätschaft wie Schüsseln, Teller oder Eimer hergestellt werden (3ders 2013). Die Geräte werden den Kunststoffsammlern im Tausch für Kunststoffabfall zur Verfügung gestellt. Bisher ist das Recycling von Kunststoffabfall nur eingeschränkt möglich, es gibt jedoch schon einfache Geräte wie den RecycleBot (vergleiche Appropedia 2016). Ebenso wie der RepRap, ein sich selbst replizierender, low-budget 3D-Drucker, wurde der RecycleBot in einem open-source Projekt entwickelt. Der Recyclebot kann klein zerteilte Kunststoffreste einschmelzen und zu Filament verarbeiten. Beispielsweise werden so alte Milchflaschen zu neuem Druckmaterial. Weitere Beispiele sind Precious Plastic (Precious Plastic 2016), Filabot (Filabot 2016) und Filafab (d3dinnovations 2016). Precious Plastic entwickelt Recyclingmaschinen und teilt die Entwürfe kostenlos online als open source Dateien. Filabot ist eine kommerziell erhältliche Recyclingmaschine; Filafab kann genutzt werden, um Kunststoffe (z. B. Kunststoffe aus dem Hausabfall) in 3D-Druckfilament umzuwandeln. Daneben können auch 3D-Drucker selbst aus recyceltem Material hergestellt werden. Der Makerspace WoeLab aus Togo verwendete hierfür beispielsweise Elektro-Abfall (Matthews 2016).

¹⁵ Zwar wird nicht durch den 3D-Drucker selbst Plastik recycelt, die innovativen Eigenschaften der Technologie wie die Flexibilität des Produktionsortes und die Möglichkeit von einem größeren Produzentenkreis genutzt zu werden, unterstützt aber das Recycling – beispielsweise indem aus Plastikabfällen hergestelltes Filament vor Ort zu neuen Produkten gedruckt werden kann, wie in diesem Abschnitt dargestellt (siehe auch Kapitel 3.3).

Ein großes Problem des dezentralen Recyclings ist, das Material möglichst sauber und sortenrein zu bekommen. Die in der Kreislaufwirtschaft eingesetzte Technologie zur Sortierung und Qualitätskontrolle ist aufwendig und teuer. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Technologie herunterskaliert werden kann (OECD 2017).

Um die große Anzahl an Kunststoffen zu reduzieren, die potenziell recycelt werden könnten, wäre eine Strategie, auf bestimmte Kunststoffe zu fokussieren. Wenn sortenrein gearbeitet wird, ist die Qualität des Druckmaterials als gut bis sehr gut einzuschätzen.

Ein weiteres Problem ist, dass das dezentrale Recycling die Bereitschaft der Nutzer erfordert, sich mit Recyclingmethoden und Sortieren zu beschäftigen; es entstehen Transaktionskosten. Insgesamt ist die Anwendung des dezentralen Recyclings vor allem eine Chance für Entwicklungsländer, in denen Kreislaufstrukturen noch wenig ausgeprägt sind.

Anwendungen in der Bauindustrie

„Beton 3D-Drucker bricht die Mauern traditioneller Bauherstellung ein“ (übersetzt nach 3dprintingindustry 2015)

Das Anwendungsgebiet des 3D-Drucks in der Bauindustrie weitet sich gegenwärtig von einem einfachen Konstruktions- und Modellbauwerkzeug auf die Herstellung ganzer Gebäudeteile aus. Eingesetzte Materialien sind unter anderem Beton und Polymere. Zurzeit laufen erste Pilotprojekte für den Druck von großen Infrastrukturteilen, z. B. einer Brücke, Gebäudeteilen und ganzer Häuser (siehe MX3D 2016). Es gibt drei 3D-Druckverfahren, die sich für großskalige Objekte eignen: Contour Crafting, D-Shape (Monolite) und Concrete Printing. Zukünftig könnten sich mehrere Vorteile durch die Anwendung des 3D-Drucks in der Bauindustrie ergeben. Der insitu 3D-Druck von Gebäudeteilen kann unter bestimmten Bedingungen ressourcenschonender sein als bisherige Konstruktionsverfahren, da beispielsweise das Rangieren der Bauteile durch Kräne wegfällt und komplexe Geometrien einfacher zu realisieren sind. Die Aluminiumstruktur, die für das D-Shape-Verfahren eingesetzt wird, ist relativ leicht und kann einfach transportiert, auf- und abgebaut werden (Oberti und Plantamura 2015).

Weiterhin können Drucker auch an gefährlichen Orten mit schlechten Arbeitsbedingungen eingesetzt werden und so das Unfallrisiko reduzieren. Bauteile könnten durch die Drucker möglicherweise schneller, akkurater und mit weniger Abfall produziert werden. Zudem werden Material- und Arbeitskosten gesenkt.

Wenn durch den 3D-Druck im Baubereich zukünftig nennenswerte Anteile an Material eingespart werden können, hat dies potentiell größere positive Umweltauswirkungen, da in der Bauindustrie insgesamt sehr viel Material verbraucht wird. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass sich die Vorteile des 3D-Drucks auch in absehbarer Zukunft noch vor allem bei komplexen Objekten mit nur einem verwendeten Material ausspielen werden. Bei Anwendungen in der Bauindustrie ist die Sachlage aber umgekehrt: Es werden relativ einfache Objekte mit mehreren Materialien hergestellt. Bei der herkömmlichen Produktion von beispielsweise Häusern fallen auch in absehbarer Zeit noch geringere Kosten an als bei durch den 3D-Druck hergestellten Häusern oder Gebäudeteilen. Seine Vorteile könnte der 3D-Druck in Zukunft aber bei komplexeren Konstruktionsformen ausspielen, beispielsweise bei Gebäuden und Gebäudekomplexen, die durch ihre Struktur eine höhere Adaptionsfähigkeit an den Klimawandel aufweisen sollen (unterschiedliche Formen der Verschalung) (Reutter 2015).

Nachteile ergeben sich beim Baumaterial und der Wetterabhängigkeit von Fertigungen vor Ort, da beispielsweise die Betonmischungen, die für den 3D-Drucker verwendet werden können, längere Aushärtungszeiten brauchen (Lim et al. 2012). Außerdem müssen für den 3D-Druck von Gebäudeteilen Betonzusatzmittel hinzugegeben werden, um den Beton schneller aushärten zu lassen. Grund hierfür ist, dass beim 3D-Druck Schicht für Schicht Zement aufgetragen wird; bevor eine neue Schicht aufgebracht werden kann, muss der Zement erst hinreichend erhärtet sein (Oberti und Plantamura 2015). Die verwendeten Zusatzmittel für die bisherigen Verfahren sind nicht hinreichend bekannt, grundsätzlich könnten aber Belastungen durch Schadstoffe in Innenräumen auftreten (Oberti und Plantamura 2015). Risiken können auch durch Feinstaubemissionen für die Arbeiter auftreten.

Bioprinting und Nahrungsmittelproduktion

*„Die Herstellung von Fleisch und Leder mithilfe des Bioprintings ist ein zivilisierter Weg, um das Töten von Tieren für Hamburger und Handtaschen hinter uns zu lassen“
(übersetzt nach Forgacs 2013)*

Zukünftig werden in Fachkreisen weitere Entwicklungen und Fortschritte im Bioprinting erwartet (vergleiche beispielsweise Murpy und Atala 2014). Unter Bioprinting werden 3D-Druckverfahren verstanden, auf deren Basis einzelne organische Zellen beziehungsweise organisches Gewebe definiert abgelegt werden und in einem Bioreaktor vervielfältigt werden können. Hierfür werden die Techniken des Tissue-Engineering eingesetzt. Aufgrund des geringen technologischen Reifegrads der Verfahren ist das Bioprinting bislang nur ein Thema für die Forschung (Harhoff und Schnitzer 2015), zu dem jedoch laufend Erfolgsmeldungen erscheinen.

Ein zentrales Anwendungsfeld für Bioprinting ist der Gesundheitsbereich. Hier wird der 3D-Druck, anders als in vielen anderen Bereichen, wie beispielsweise der Bauindustrie, bereits vielfältig eingesetzt (siehe Kapitel 2). In Zukunft ist anzunehmen, dass sich weitere medizinische Innovationen herausbilden, wie beispielsweise neue Instrumente, Implantate und Prothesen. Auch im Bereich des Bioprintings gibt es bereits Grundlagenforschung. Zweidimensionales Gewebe wurde bereits getestet und hergestellt, dreidimensionale Objekte wie z. B. Blutgefäße und „hohle“ Organe sind in der Entwicklungsforschung, auch zu vollständigen Organen wird geforscht (Murphy und Atala 2014; siehe auch Kapitel 2 und Kapitel 3.1.3 zu Bioprinting). Insgesamt sind vielfältige Anwendungsgebiete denkbar, die auch über den bisherigen Entwicklungsstand hinausgehen, wenn die erforschten Verfahren zukünftig den Medizinmarkt erreichen.

Allerdings ist zu beachten, dass gerade beim Bioprinting von komplexen Objekten noch geraume Zeit vergehen wird, bis tatsächlich Organe gedruckt und eingesetzt werden können. Weiterhin ist auch anzumerken, dass Organe in Zukunft auch ohne Beteiligung des 3D-Drucks hergestellt werden können. Hier wird z. B. bereits erforscht, Zellbestandteile von Schweine- und Rattenorganen mithilfe einer Waschlösung aus dem Organ zu lösen. Das übriggebliebene Bindegewebsgerüst kann

dann mit Zellen wieder besiedelt werden (vergleiche TRM Leipzig 2015). Der 3D-Druck hat hier also kein Alleinstellungsmerkmal.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld für Bioprinting sind Toxizitätsanalysen. Im Bereich von medizinischen Anwendungen ist es aktuell möglich, „lebende“ Zellen zu verdrucken, teilweise simultan mit einer Trägerstruktur, in die die Zellen migrieren können (Koll 2015). Solche „künstlichen“ Gewebe sollen in naher Zukunft für Toxizitätsanalysen (z. B. Hautmodelle) genutzt und gegebenenfalls als Alternativen für Tierversuche eingesetzt werden. In Deutschland alleine wurden 2014 mehr als 2 Millionen Tiere für Tierversuche eingesetzt (BMEL 2015). Somit könnte das Leiden der Tiere oder ihre Tötung für medizinische Zwecke verringert werden. Hier gibt es bereits erste Anwendungen. So kooperiert L'Oréal USA mit dem Bioprinting-Unternehmen Organovo, um 3D-gedrucktes und anschließend vervielfältigtes lebendes Gewebe herzustellen, das für die Evaluation von neuen Produkten eingesetzt werden kann (L'Oréal 2015).

Durch Entnahme tierischer Gewebezellen kann außerdem künstliches Biomaterial zum Verzehr oder auch als Leder für den Handel hergestellt werden. Damit ergeben sich positive Implikationen für die Umwelt: die Umweltauswirkungen der weltweiten Fleischproduktion und –konsumption können so gelindert werden (also beispielsweise Landnutzungswandel, Treibhausgasemissionen, Stickstoffeinträge). Forschungsergebnisse zeigen hier, dass für die Herstellung von künstlichem Fleisch im Vergleich zur konventionellen Produktion bis zu 45 Prozent weniger Energie aufgewendet werden muss, bis zu 96 Prozent weniger Treibhausgase emittiert werden, bis zu 99 Prozent weniger Land verbraucht wird und bis zu 96 Prozent weniger Wasser eingesetzt werden muss (Tuomisto et al. 2011).

Auch hier existieren bereits erste Anwendungen. So wurde an der Universität Maastrich 2013 ein verzehrfähiges Stück Fleisch – „cultured meat“ – ausgedruckt (Maastricht University 2015). Aufbauend auf diesen ersten Erfolgen wurde das niederländische Startup Mosa Meat gegründet, welches „cultured meat“ bis zur Produktreife entwickeln und in den Massenmarkt einführen möchte. Das gleiche Ziel verfolgt das amerikanische Unternehmen Beyond Meat (<http://beyondmeat.com>). Ein

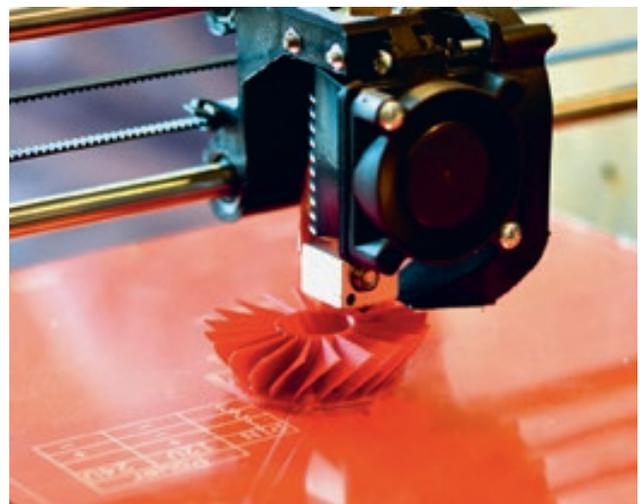
weiteres Unternehmen, das sich dem Thema widmet, ist Modern Meadow, der Mutterkonzern von Organovo Holdings. Schon seit einigen Jahren forschen sie an der Entwicklung von Geweben mit dem Ziel, künstliches Biomaterial zum Verzehr und als Leder herzustellen (Modern Meadow 2015). In den USA wird die Forschung „zelluläre Landwirtschaft“ von der Wohltätigkeitsorganisation „New Harvest“ unterstützt (New Harvest 2015). New Harvest organisiert Forschungskonferenzen zur „zellulären Landwirtschaft“ und finanziert Projekte zur Herstellung von Milch, Eiern und Fleisch ohne Tötung beziehungsweise Einsatz von Tieren. Es wird allerdings absehbar noch längere Zeit dauern, bis Alternativen zu tierischem Fleisch in größerem Ausmaß hergestellt werden können. Die Forscher der Universität Maastricht schätzen 10 bis 20 Jahre. Für die Herstellung ihres ersten Stück Fleisches in der Größe $2 \times 1 \times 0,1$ cm wurden 250.000 Euro Entwicklungskosten investiert (DWN 2013). Außerdem sollte aus tierethischer Perspektive auch die Gewinnung des Ausgangsmaterials mitbetrachtet werden. Hierbei ist insbesondere wichtig, die Haltung der Spendertiere sowie die Nährlösung für die Zellkulturen mit in den Blick zu nehmen (hierfür wird fötales Kälberserum benötigt, das den noch lebenden Föten geschlachteter Rinder entnommen wird), vor allem wenn die Herstellung künstlichen Fleisches hochskaliert wird.

Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz von 3D-Druck könnte die Herstellung von veganem Fleisch, beispielsweise in Form von Burgern sein. Von dem Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) wird hierfür das Verfahren der Nasstexturierung genutzt, wobei ein pflanzlicher Proteinbrei erhitzt und durch eine Düse abgelegt wird. Aufbauend auf den Entwicklungen wurde das Unternehmen AMIDORI Food Company (<http://www.amidori.com>) gegründet. Das Unternehmen Beyond Meat (<http://beyondmeat.com>) aus den USA nutzt ebenfalls eine Extrusions-Technologie und bietet in den Frischfleischtheken erster Testmärkte einen fleischlosen Burger an, der in Aussehen, Textur und Geschmack dem „Original“ sehr nahe kommt. Zukünftig muss geprüft werden, ob extrusionsbasierte 3D-Druckverfahren für die Herstellung von veganem Fleisch eingesetzt werden können und welche möglichen Vorteile ihr Einsatz böte.

3.1.4 Zusammenfassung der direkten Umweltwirkungen aus 3D-Druck

Die Analyse der drei Bereiche „Druckverfahren“, „Materialien“ und „Anwendungsfelder“ ergibt für den Trend 3D-Druck verschieden gelagerte Umweltauswirkungen. Durch die Druckverfahren entstehen künftige Belastungen durch hohen Energieverbrauch und Schadstoffe in Innenräumen (Feinstaub; VOC; Nanopartikel) aber auch teils Entlastungen durch rohstoffeffizientere Verfahren. Rohstoffgewinnung und Herstellung der Druckmaterialien werden die Umwelt unter anderem über die Beanspruchung von Naturraum und diffuse Nähr- und Schadstoffeinträge belasten. Belastungen entstehen auch durch die Toxizität der Materialien und die teils mangelnde Recyclingfähigkeit. Entlastungen entstehen künftig vor allem durch die *Nutzung* des 3D-Drucks: für die Industrie durch den Einsatz von Prototypen, Leichtbau, Ersatzteilen und Werkzeugen; für Private durch Recycling und möglicherweise beim Konsum von Lebensmitteln, die mithilfe des 3D-Drucks produziert werden. Auch durch 3D-Druck unterstützte Toxizitätstests kann die Umwelt zukünftig entlastet werden.

Um die Stärke dieser Umweltauswirkungen besser einschätzen zu können, muss die Marktentwicklung des 3D-Drucks miteinbezogen werden. Hier zeigt sich insgesamt, dass der 3D-Druck auch in absehbarer Zeit nur einen äußerst kleinen Anteil am weltweiten Maschinenpark umfassen wird. Damit relativieren sich die Belastungen durch den Energieverbrauch und den Materialabbau teilweise. Anders einzuschätzen sind die Schadstoffe in Innenräumen und die Toxizität der Stoffe für Anwender im Desktop-Bereich, wie Private, Designer und Architekten. Die Anzahl der verkauften Geräte steigt hier stark an. Von der Umweltpolitik sollte dieser Bereich deshalb aufmerksam verfolgt werden.



3.2 Indirekte (Umwelt)auswirkungen

Trends wie der 3D-Druck wirken sich auch indirekt auf die Umwelt und Gesellschaft aus. So können beispielsweise im Zuge von 3D-Druck Konsummuster verändert oder gesellschaftliche Diskurse geprägt werden, in dessen Folge dann erst Wirkungen auf die Umwelt entstehen. Insgesamt belasten oder entlasten sie die Umwelt über lange, komplexe und multikausale Wirkungsketten (Kaltschmitt und Schebeck 2015). Für die Umweltbewertung von Trends ist es deshalb zentral (aber auch besonders schwierig) auch die indirekten Effekte zu erfassen.

Welche Bereiche durch 3D-Druck indirekte Wirkungen auf die Umwelt haben wurde gemäß dem für dieses Vorhaben entwickelten Assessment-Verfahren identifiziert und näher untersucht. Dabei wurde in den Suchfeldern Bevölkerung und Demographie, Gesellschaft und Kultur, Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Technologie und Raum über Wirkkategorien nach indirekten Umweltauswirkungen des 3D-Druck gesucht und dies möglichst konkret dargestellt. Aufgrund der indirekten Natur der Wirkungen können diese Umweltimplikationen größtenteils nur angedeutet werden.

3.2.1 Erschließung neuer Nischenmärkte und Geschäftsmodelle

Der 3D-Druck wirkt sich auf die Wirtschaft aus, vor allem auf die Wettbewerbsposition und Wirtschaftlichkeit von Unternehmen. Durch den 3D-Druck werden neue Geschäftsmodelle ermöglicht (Rayna und Striukova 2016). Der 3D-Druck bietet Unternehmen verschiedene Vorteile: Nischenmärkte können leichter bedient werden, die bisher aufgrund mangelnder Rentabilität nicht in den Blick kamen – beispielsweise wenn die Nachfrage eines Produktes unsicher ist und sich die Massenproduktion für dieses Produkt nicht lohnen würde.

Verschiedene Anwendungsbeispiele illustrieren dies. Der japanische Spielzeughersteller Hasbro kooperiert mit dem 3D-Dienstleister shapeways. Auf der Webseite SuperFanArt können Kunden geschützte Marken von Hasbro nutzen und modifizieren und eigene Modelle der Marken wie beispielsweise MyLittlePony erstellen (all3dp 2015). Von Hasbro akzeptierte Designs werden auf der Webseite veröffentlicht und können von Kunden erstanden werden; Shapeways produziert und vertreibt die Spielzeuge. Für Hasbro bietet sich ein neues Geschäftsmodell: schon entwickelte Produkte müssen nur noch genehmigt werden, die eigene Entwicklung entfällt. Gleichzeitig können Kunden und möglicherweise eine



ganze Online-Community an die Firma gebunden werden. Umweltwirkungen ergeben sich hier unter anderem aus der veränderten Produktionstechnik für das Spielzeug, einem gegebenenfalls sich ergebenden Mehrabsatz sowie Veränderungen bei der Logistik (vergleiche auch den nächsten Abschnitt).

Die amerikanische Firma Local Motors ermöglicht den open source Zugang zum Designprozess von 3D-gedruckten Autos (Local Motors 2016). Nutzer können an verschiedenen Aufgaben wie beispielsweise dem Design einzelner Autokomponenten mitwirken. Ideen werden online diskutiert und schließlich die überzeugendsten Lösungen durch Local Motors ausgewählt. Die Ideen werden verbessert und anschließend umgesetzt. Local Motors profitiert dabei von der Expertise der Nutzer und bindet diese gleichzeitig an das Projekt. Hierbei können sich verschiedene Umweltwirkungen ergeben: Wenn etwa durch einen transparenten und für jeden offenen Entwicklungsprozess mehr Fachexpertise zur umweltfreundlichen Konzeption der Autos eingebracht wird, kann es zu Entlastungen kommen. Gleichzeitig verstärkt sich gegebenenfalls die Individualisierung der Produktion, was den Produktionsaufwand vergrößert, wenn in kleinen Stückzahlen individuelle Autos hergestellt werden.

In diesen (kleinskaligen) Beispielen erscheint der 3D-Druck durch die Erschließung von Nischenmärkten als einer der Treiber der wirtschaftlichen Entwicklung. Auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene, aber auch für einzelne Unternehmen (und für die oben genannten Beispiele) sind diese Effekte noch nicht quantifiziert. Auch die Auswirkungen für die Umwelt sind bisher noch nicht analysiert. Aus der bisherigen Forschung ist (auf einer höheren Aggregatsebene) bekannt, dass ein zentraler Transmissionsriemen des Zusammenhangs von Wirt-

schaftswachstum und Umweltauswirkungen Einkommensänderungen sind (Bagliania et al. 2008; Bringezu et al. 2004; Aşıcı und Acar 2016). Wachsen Unternehmen, Branchen oder sogar die Gesamtwirtschaft, können neue Arbeitsplätze geschaffen werden und Einkommen erhöht sich. Einkommensänderungen stehen aber in starkem Zusammenhang mit Umweltauswirkungen wie Ressourcenverbräuchen, da sie zu einem Anwachsen des Konsums führen. Der 3D-Druck kann die wirtschaftliche Entwicklung weiter vorantreiben und auf diesem Wege zu indirekten Umweltauswirkungen führen (insbesondere wenn das Wachstum nicht in grünen Zukunftsmärkten erfolgt und der Transformation zu einer Green Economy dient).

3.2.2 Dezentralisierung von Logistik und Transport

Die Nutzung von 3D-Druck kann zu einer Rückverlagerung der Produktion beitragen und sich auf etablierte Logistikstrukturen auswirken, da durch den 3D-Druck vor Ort Transportwege für Produkte entfallen (Campbell et al. 2011). Diese Dezentralisierung kann zu einer ökologischen Entlastung in Form von reduzierten Emissionen auf Schutzgüter wie Luft, Böden und Wasser führen (Bühner 2013). Weiterhin kann durch den 3D-Druck leichter on-demand produziert werden und Produktionsentscheidungen können so lange hinausgezögert werden bis die Nachfrage für das Produkt gegeben ist (Tang et al. 2016). Allerdings entfallen nicht alle Transporte, da die Rohstoffe für das Druckmaterial und die Druckerteile weiterhin transportiert werden müssen (Faludi et al. 2015a). Der Transportweg des Druckfilaments für heimische 3D-Drucker kann sogar einen etwa gleich langen Transportweg haben, wie Produkte aus der Massenfertigung (Petschow 2014).

Insgesamt zeigt sich, dass die Dezentralisierung der Produktion durch die 3D-Druck-Technologie nicht zwangsläufig zu einer Verminderung der CO₂-Bilanz beiträgt, wenn neben den gefahrenen Kilometern auch Material, Verarbeitung und Entsorgung betrachtet wird (Petschow 2014). Wesentliche Faktoren sind die Art des Transportes (besonders Lufttransporte) und das individuelle Verhalten der Nutzer, das sich auf die CO₂-Bilanz auswirken kann (Produktlebensdauer). (Petschow 2014). Außerdem muss der 3D-Druck nicht zwangsläufig zur Rückverlagerung beitragen wie Fallstudien zeigen – da CAD-Vorlagen leicht ins Ausland gesendet werden können, könnte sich sogar eine gegenläufige Entwicklung abzeichnen (Sandström 2016). Aus industrieller und unternehmerischer Sicht ist auch eine Regionalisierung der Ersatzteilproduktion in einzelnen Zentren denkbar – unwahrschein-

lich ist, dass die Drucker (z. B. durch Dienstleister) direkt zum Kunden kommen (da dieser Prozess zu aufwendig wäre).

Vorteile bei der Produktion zu Hause ergeben sich dadurch, dass Transporte durch Rücksendungen von Produkten ausgeschlossen werden, da direkt vor Ort gedruckt wird. Die dezentrale Produktion von Ersatzteilen ist außerdem aus wirtschaftlichen Gründen sehr interessant, da Lagerkosten gespart, gegebenenfalls Wartezeiten verkürzt und Ressourcen durch Materialeinsparungen geschont werden können (Petschow 2014). Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass die Ressourceninanspruchnahme durch die wachsende Zahl an benötigten Druckern steigen würde.

3.2.3 Wandel der Konsum- und Lebensstile

Durch den 3D-Druck können sich auch kulturelle Auswirkungen ergeben. Diese betreffen vor allem die Nutzung des 3D-Drucks im Privatbereich. Hier zeigen sich vielfältige Verknüpfungen. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, steigen die verkauften Stückzahlen für Desktop-Drucker rasant an; gleichzeitig wird der 3D-Druck in sogenannten Fab-Labs und Maker-Spaces eingesetzt. Der 3D-Druck kann hier als eine soziale Praxis verstanden werden, die mit bestimmten Werten, Lebensstilen und Motivationen verbunden ist. Diese Werte, Lebensstile, Motivationen können wiederum für die Umwelt relevant werden. Zurzeit gibt es nur erste qualitative Forschung, die beginnt, diese Praxis stärker zu untersuchen (siehe beispielsweise Kohtala und Sampsa 2015; Fordyce et al. 2015; Prendeville et al. 2016).

Betrachtet man die soziale Praxis in Maker-Spaces und Fab-Labs, dann können grundsätzlich verschiedene Werte damit verknüpft sein, die einen positiven Umweltbezug haben – beispielsweise „Partizipation“, „Kollaboration“, „Teilen“, „Selbstrealisierung“, „Experimentieren“ und „Offenheit“ (siehe Bonvoisin 2016). Von verschiedenen Autoren wird auch darauf hingewiesen, dass Fab-Labs und Maker-Spaces Teil der „counter-culture“ sind –



einer Bewegung also, die generell eher skeptisch gegenüber der Wegwerfgesellschaft und wachsendem Konsum eingestellt ist (siehe hierzu Bonvoisin 2016). Gleichzeitig variieren die Motivationen von Nutzern von Fab-Labs und Maker-Spaces aber stark. Oft stehen hier der Spaß am Basteln und die Interaktion mit anderen im Vordergrund. Nachhaltigkeits- und Umweltaspekte sind beim 3D-Druck nicht für alle Nutzer wichtig. Eine Fallstudie eines Workshops mit 3D-Druck-Bastlern zeigte beispielsweise, dass nur ca. 25 Prozent Nutzer Umweltfragen mitbedenken (Kohtala und Sampsa 2015).

Neben den Fab-Labs und Maker-Spaces ist auch die soziale Praxis des 3D-Drucks zu Hause relevant. Hier existiert bisher allerdings noch kaum Forschung zu umweltrelevanten Werten und Lebensstilen. Durch die Nutzung von Desktop 3D-Druckern könnte sich (auch je nach Umfang der produzierten Güter) eine veränderte Rolle der Konsumenten zur Produktion ergeben – durch den 3D-Druck wird die starke Trennung zwischen Produktion und Konsumption aufgehoben. Verschiedene Begleiterscheinungen der Massenproduktion (wie beispielsweise Materialverbrauch) könnten so für den Einzelnen sichtbar werden. Ein weiterer Faktor ist die stärkere Bindung an selbst hergestellte Objekte. Dieser Faktor wird oft als Vorteil des 3D-Drucks dargestellt – verwiesen wird in der Forschung beispielsweise darauf, dass mit selbsthergestellten Gegenständen Erinnerungen verbunden sind, die die Lebensdauer dieser Produkte verlängern könnten (siehe beispielsweise Chen et al. 2015; Gao et al. 2015). Allerdings ist zu beachten, dass der 3D-Druck im Privatbereich bisher nur für spezielle Anwendungen genutzt wird (beispielsweise Dekoration). Dies zeigt auch ein Blick auf die Plattform Thingiverse, auf der Druck-Designs getauscht werden können. Nutzer teilen hier zwar auch Designs für Ersatzteile (siehe oben Abschnitt 3.1.3) aber vor allem auch Kunst-, Fashion-, Gadgets- und Hobby-Designs (siehe auch Olson 2013 und Kapitel 3.1.3 zum Druck zu Hause). Außerdem sind oft auch beim Kauf von Massenware bestimmte Erinnerungen mit dem Produkt verbunden (je nach Objekt). Ohne weitergehende Untersuchungen lässt sich gegenwärtig noch nicht genau abschätzen, welche Verhaltensmuster sich letztendlich durchsetzen werden und ob sich angesichts des gesellschaftlichen Wertepluralismus überhaupt generalisierbare Entwicklungen beziehungsweise Konsumtrends ablesen lassen können.

Insgesamt betrachtet bietet der 3D-Druck über Maker-Movement und Fab-Labs aber die Möglichkeit, nachhaltig-

keitsrelevante Werte zu verstärken. Für die Umweltpolitik bedeutsam wird vor allem die Nutzung zu Hause sein, da die verkauften Desktop-Drucker, wie in Kapitel 2 dargestellt, in absehbarer Zukunft stark zunehmen werden. Hier zeigt sich ein ambivalentes Bild für den 3D-Druck: absehbar ist, ähnlich wie beim Konsum insgesamt, die vereinzelte umweltbewusste Nutzung (z. B. für Ersatzteile; siehe auch Kapitel 3.1) und zusätzlich die Bindung an gedruckte Objekte für einzelne wenige Anwender, ausgelöst durch die hier beschriebenen kulturellen Prozesse. Insgesamt aber ist wahrscheinlich, dass der 3D-Druck nicht zu einer umfassenden nachhaltigkeitsrelevanten Verhaltensänderung in breiten Anwenderkreisen führen wird. Tendenziell werden sich bestehende Konsum-Motivationen und Konsumverhalten auf den 3D-Druck rückspiegeln. Um diese Entwicklung abzuschwächen, erscheinen die beschriebenen potentiell positiven Auswirkungen auf Lebensstile, Motivationen und Werte zu schwach.

3.2.4 Zusammenfassung der indirekten Umweltwirkungen aus 3D-Druck

Die Analyse der indirekten Umweltauswirkungen ergab, dass verschiedene der indirekten Dimensionen betroffen sind. Besonders relevant erscheint die Verknüpfung mit den Dimensionen Wirtschaft sowie Gesellschaft und Kultur. In der Wirtschaft wird der 3D-Druck schon seit längerem eingesetzt, zunehmend auch über das rapid prototyping hinaus (siehe Kapitel 2). Im Vergleich zum weltweiten Maschinenbausektor wird der 3D-Druck zwar auch in absehbarer Zeit noch ein Nischenmarkt bleiben, aber der 3D-Druck verschafft in diesem Nischenmarkt Wettbewerbsvorteile und ermöglicht neue Geschäftsmodelle. Auch der Bereich Gesellschaft und Kultur ist relevant, weil wie in Kapitel 2 dargestellt, die Zahl der Desktop-Drucker zunehmend stark anwachsen wird. Damit wird insbesondere wichtig, welche Lebensstile und Werte sich mit dem 3D-Druck verknüpfen.

Die Wirkung auf die Umwelt (und die VERUM-Belastungskategorien) lässt sich aufgrund der diffusen Beziehung über mehrere Wirkungsschritte hinweg schwer angeben. Insgesamt gibt es eine Vielzahl intervenierender Variablen, welche die Umweltauswirkungen beeinflussen. Dazu zählen beispielsweise Rebound-Effekte für Ressourceneffizienz-Gewinne. Insgesamt betrachtet ist aber insbesondere die Ressourceninanspruchnahme ein besonders betroffener Bereich – Ressourcenverbräuche werden durch die Bevölkerungsentwicklung, Einkommensänderungen sowie das Konsumverhalten betroffen sein.

3.3 Identifizierung innovativer Charakteristiken

Zukünftige Umweltauswirkungen können auch über das Innovationspotential von Trends identifiziert werden. Grundlage hierfür ist das IIC-Verfahren, das in Kapitel 1 skizziert wurde. Die Methode abstrahiert von den spezifischen 3D-Druckverfahren, Druckmaterialien und bisheriger und absehbarer Nutzung und wählt als Ausgangspunkt die innovativen Charakteristiken des 3D-Drucks. Ausgehend von diesen Eigenschaften wird untersucht, welche weiteren zukünftigen Auswirkungen auf die Umwelt denkbar sind.

Das Vorgehen zeichnet sich durch eine wesentlich größere Offenheit und den Blick in die weiter entfernte Zukunft aus. Diese Perspektive komplementiert die beiden vorhergehenden Analysen (Kapitel 3.1 und 3.2), welche stärker bereits absehbare Auswirkungen untersuchen.

Das IIC-Verfahren ergab für den 3D-Druck diverse spezifische innovative Charakteristika, nämlich:

1. Design- und Produktionsfreiheit
2. Neue Produzenten
3. Flexibilität des Produktionsortes

Die Charakteristika und ihre Konsequenzen sind teils schon implizit in vorherigen Abschnitten eingeflossen. Offenkundig haben die innovativen Charakteristika des 3D-Drucks ja auch schon aktuell diverse Implikationen. Im Folgenden wird der Blick aber vor allem auf die noch nicht so sehr in den Blick genommenen Implikationen gelenkt.

„Design- und Produktionsfreiheit“ ist die innovative Charakteristik des 3D-Drucks, komplexe Geometrien aus formlosen Rohstoffen Schicht für Schicht aufzubauen. Beim 3D-Druck muss keine Rücksicht mehr auf die Realisierbarkeit der Herstellung aus Halbzeugen genommen werden, wie beim Fräsen oder Schneiden. Dadurch werden einige der bisherigen Vorgaben für Gegenstände, beispielsweise bezüglich deren Dicke, aufgehoben.

Die innovative Eigenschaft „Neue Produzenten“ bedeutet, dass durch die Erschwinglichkeit und die relativ einfache Handhabung von Desktop 3D-Druckern beliebige Akteure zu Produzenten werden können. Derzeit liegt der Preis für private Druckgeräte zwischen 800 Euro und 2.500 Euro (siehe auch die Übersicht in Kapitel 2). Zudem ist zu erwarten, dass bisherige Barrieren bei der Zugangsfreundlichkeit der Technologie, wie der Umgang



mit CAD-Software, wohl in Zukunft vermindert werden. So will die Spielzeugfirma Mattel den 3D-Druck mit der geplanten Markteinführung des Spielzeug-3D-Druckers „Thingmaker“ im Herbst 2016 schon Kindern ab 3 Jahren zugänglich machen (Mattel 2016).

Die innovative Charakteristik „Flexibilität des Produktionsortes“ beinhaltet, dass 3D-Druckgeräte relativ standortunabhängig und einfach aufgestellt werden und so vor Ort nach einem digitalen CAD-Modell produzieren können, wobei nur das Druckfilament und das fertige Produkt transportiert werden müssen.

Diese drei betrachteten innovativen Charakteristiken erzeugen ein grundlegendes Spannungsverhältnis für die Umweltpolitik. Mit dem 3D-Druck sind bestimmte, neu gewonnene Freiheiten verbunden, die den Trend innovativ machen. Wie gerade dargestellt: „Design- und Produktionsfreiheit“ kann interpretiert werden als die Freiheit, Produkte zu entwerfen und herzustellen; die „Flexibilität des Produktionsortes“ bedeutet die Freiheit, an unterschiedlichsten Orten zu produzieren; „Neue Produzenten“ impliziert die Freiheit für unterschiedlichste Akteure, Objekte herzustellen. Von einigen Autoren wird das Produktionsverfahren deshalb auch als „demokratisch“ bezeichnet (siehe beispielsweise Gao et al. 2015). „Demokratisch“ können diese neu gewonnenen Freiheiten sein, weil sie immer mehr Menschen den Zugang zur Herstellung ermöglichen.

Die Freiheit, etwas zu erschaffen, steht aber im Konflikt mit der Notwendigkeit, die (negativen) Auswirkungen dieser Freiheiten – hier von Produktionsprozessen – zu kontrollieren und menschen- und umweltfreundlich zu gestalten. Die Umweltpolitik steht grundsätzlich vor der Herausforderung, einerseits die positiven Aspekte, die mit dem 3D-Druck einhergehen, nicht zu beschränken und gegebenenfalls auch zu fördern, andererseits aber auch die möglichen zukünftigen Belastungen zu minimieren, die mit der gewonnenen Freiheit entstehen.

Gerade weil die Umweltpolitik unter dem grundsätzlichen Problem des Zeitverzugs steht – also dem Problem, erst zeitlich verzögert auf neue Umweltprobleme reagieren zu können – sollte dieses Spannungsverhältnis mitbedacht werden.

Nachfolgend werden für die hier identifizierten innovativen Charakteristiken spezifische Herausforderungen und Implikationen für die Umweltpolitik abgeleitet. In all diesen Umweltauswirkungen ist das Spannungsverhältnis präsent, auch wenn sich jeweils eigene Be- und Entlastungen ergeben.

3.3.1 Design- und Produktionsfreiheit

Neue Bauten¹⁶

Schon lange sind Architekten davon fasziniert, energiesparende Gebäude zu entwerfen, die sich an Termitenbauten in der Natur orientieren. In den heißen Gegenden Afrikas und Australiens, mit Außentemperaturschwankungen von bis zu 40° innerhalb eines Tages- und Nachtzyklus, schaffen es die Termiten in ihrem Nestbau aus totem Holz, Erde und Speichel ein konstantes Klima von ca. 30° zu halten. Dieser Effekt entsteht zum einen durch die natürlich zirkulierende Luft in dem schornsteinartigen Gebilde. Warme Luft steigt durch ihre geringere Dichte auf und kann oben entweichen, während kalte Luft von unten nachströmt.

Zum anderen bietet der schmale und hohe Bau der senkrecht stehenden Sonne mittags wenig Einstrahlungsfläche und morgens beziehungsweise abends, wenn die Sonne im flachen Winkel scheint, eine große Einstrahlungsfläche, die den Bau vor oder nach einer kalten Nacht erwärmt. Dieses System auf den Gebäudebau zu übertragen, gelang mit der standardmäßigen Einführung des 3D-Drucks in der Bauindustrie. Durch die an Kränen geführten Drucker, kann das Material für die Fassade verschachtelt aufgebaut werden, um zusätzlich Sonnenstrahlung optimal zu reflektieren. Zudem kann die schlauchartige Form in der Höhe optimal angepasst werden. Durch diese Bauweise verbrauchen die Gebäude nur 10 Prozent der Energie, die andere Bauwerke benötigen würden, und schaffen im Sommer wie im Winter ein angenehmes Raumklima. In die neue Raumgeometrie mit eingedruckte Möbel sorgen dafür, dass die Gebäude unmittelbar bezugsfertig sind. Sanftere Formgebungen der Räume werden so ebenfalls ermöglicht.

Die Fähigkeit, komplexe Objekte freier als in anderen Produktionsverfahren zu entwerfen und herzustellen, resultiert potentiell in einem breiten Kanon von künftigen Umweltauswirkungen. Über Leichtbau wurde schon an anderer Stelle gesprochen. Die Designfreiheit hat aber viele weitere Implikationen:

Umgehen von Umweltstandards

Die Designfreiheit erleichtert das Umgehen von Umwelt- und Sozialstandards, wie auch sonstiger Produktionsstandards. Der vereinzelt schon unternommene Versuch zum Druck von Waffen verdeutlicht dies. Für die Umweltpolitik können sich hier einige Probleme ergeben. Privatanwender können etwa Produkte drucken, von denen sie gar nicht wissen, dass sie bestimmten Umweltstandards genügen müssen. Ebenso können Umweltstandards bewusst umgangen werden. Mangelhafte Filteranlagen, die nur dem äußeren Schein nach funktionieren, können recht unaufwendig selbst ausgedruckt werden. Oder ein Autoreifen wird ausgedruckt, der weder Umwelt- noch Sicherheitsstandards genügt, der aber recht preiswert im eigenen Drucker erstellt werden kann. Falsche Auslegungen, falsche Materialwahl oder Fehler bei der Produktion können künftig zu (umweltrelevanten) Unfällen oder dauerhaften (schleichenden) Umweltbelastungen unterschiedlichster Art führen.

Beschleunigen von Moden

Die Designfreiheit macht den privaten Druck auch abhängiger von gesellschaftlichen Moden. Gedruckt wird, was gefällt – jeweils beeinflusst von den sozialen Strukturen und Veränderungen. Diese gesellschaftlichen Moden existieren auch jetzt schon und beeinflussen den Konsum. Aber durch den 3D-Druck bekommen sie eine neue Qualität – verbunden mit der Entwicklung im IT-Bereich können sich Moden noch schneller verbreiten, wenn individuell an unterschiedlichsten Orten von Privatpersonen Produkte erstellt werden: Die Handtasche, die mir meine Freundin gezeigt hat, kann ich gleich schon selber ausdrucken. Insgesamt wird die Wirkungskette zwischen gesellschaftlichen Veränderungen und der Produktion wesentlich kürzer und die Einwirkungsmöglichkeiten der Politik werden geringer (da beispielsweise Großproduzenten wegfallen). Hinzu kommt, dass durch die private Verwendung von 3D-Druckern Güter produziert werden, für welche vorher kein Bedarf bestand. Die 3D-Druck-Technologie kann so, wie viele Innovationen, Bedürfnisse erst schaffen, die befriedigt werden müssen.

¹⁶Dieses Beispiel ist fiktiv und soll die möglichen Implikationen der Design- und Produktionsfreiheit illustrieren.

Umweltentlastung durch Designfreiheit und Bionik

Die Designfreiheit ermöglicht es, neue nachhaltige Objekte zu erdenken, zu testen und herzustellen. Sicherlich folgen aus der Design- und Produktionsfreiheit nicht automatisch umweltfreundlichere Produkte. Gerade in Kombination mit Bionik¹⁷ kann der 3D-Druck aber ressourceneffizientere Produkte weiter vorantreiben. So haben natürliche Strukturen beispielsweise die Fähigkeit zur Selbstheilung und Selbstreinigung. Durch die dem 3D-Druck inhärente Design-Freiheit können diese natürlichen Strukturen leichter nachgeahmt werden.¹⁸

Weniger Konsum von Naturprodukten im Lebensmittelbereich

Um die Designfreiheit zu gewährleisten, müssen spezifische Produktionsvoraussetzungen gegeben sein. Materialien müssen beispielsweise in Pulver- oder Filament-Form vorliegen. Voraussetzung sind also immer Materialien, die von den natürlichen Ausgangsprodukten recht weit entfernt sind. Dies ist besonders im Lebensmittelbereich augenfällig. Hier werden Lebensmittel vor allem durch Extrusion based processes, aber auch durch powder bed fusion processes hergestellt (siehe Kapitel 2.2 und Lipton et al. 2015), für welche das Druckmaterial in flüssiger oder Pulver-Form vorliegen muss und Naturprodukte vorher aufbereitet werden müssen. Gedruckt werden zurzeit unter anderem Schokolade, Pizza, Pürees und Nudeln, zukünftig sind auch noch wesentlich weitere Anwendungen in der Nahrungsmittelindustrie denkbar. Je mehr 3D-Druck bei Nahrungsmitteln genutzt wird, desto weniger werden Nahrungsmittel folglich unbehandelt belassen. Der 3D-Druck fördert damit teils eine Entfremdung der Konsumenten von Naturprodukten.¹⁹

Verlängerung der Lebensdauer

Die neue Produktionsfreiheit erlaubt es, Ersatzteile über bisherige Nachlieferzeiten hinaus herzustellen. Dies kann die Lebensdauer von Produkten fast bis in das Unendliche verlängern. Jedes Einzelteil, das kaputt geht, kann wieder ersetzt werden. Unklar ist allerdings, ob dies letztendlich einen Mehrwert für die Umwelt mit sich bringt. Wird auf diese Weise etwa die Lebensdauer verbrauchsintensiver Konsumprodukte (Kühlschränke, Autos et cetera) vergrößert, kann auf diese Weise die Transformation in Richtung einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft und Gesellschaft auch behindert werden.

Individuelle Produkte – ohne Information

Mit einer langfristig denkbaren starken Verbreitung von individuell erstellten Produkten sinken die Möglichkeiten für eine systematische Verbraucherinformation. Dies betrifft schon so einfache Dinge, wie Gebrauchsanweisungen, geht aber, speziell für den Umweltbereich, auch über in den Bereich des Labellings. Produkte, die individuell erstellt und vermarktet werden, können kaum noch mit Umweltsiegeln versehen werden. Eine einheitliche Information zu den Umwelteigenschaften eines Produktes wird dann sehr schwer.

3.3.2 Neue Produzenten

Schuhdesigner



Die Herstellung und der Kauf vieler Waren werden sich möglicherweise stark verändern. Ein Beispiel könnten Schuhe sein. Bisher werden Schuhe für den Massenmarkt produziert. Zum Schuhkauf geht man ins Schuhgeschäft und probierte verschiedenste Modelle an. In seltenen Fällen besucht man noch einen Schuster, doch werden Schuhe kaum noch individuell gefertigt, auch aufgrund der hohen Kosten, die damit verbunden sind. Künftig mag sich dies wieder komplett ändern. Wer neue Schuhe braucht, wendet sich dann an eine neue Klasse von Geschäft – Schuhdesigner. Für die Kunden hat dies diverse Vorteile: Schuhdesigner kennen sich mit den Erfordernissen guter Schuhe (Laufeigenschaften et cetera) und der Anatomie der Füße ebenso gut aus wie mit den Erfordernissen und Vorlieben ihrer Kunden und den aktuellen Schuhmoden. Je nach Bedarf, teils auch monatlich (etwa mit Kundekarten die besonderen Rabatt gewähren) können sich Kunden neue Schuhe ausdrucken lassen. Bei Neukunden erfasst ein Laser jedes

¹⁷ Unter Bionik werden Innovationen verstanden, die durch das Nachbilden natürlicher Funktionen, Mechanismen und Strukturen entstehen (Almeida und Oliveira 2016).

¹⁸ Nicht nur durch die Bionik, sondern auch generell durch die Designfreiheit können nachhaltige Ideen leichter verwirklicht werden. Gerade die Bionik aber bietet besonders großes Potential, die Möglichkeiten der Designfreiheit auszuspielen.

¹⁹ Zwar können als Ausgangsstoffe auch Naturprodukte verwendet werden (dies gilt auch außerhalb des Lebensmittelbereiches für Druckmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen), für den Lebensmittelbereich müssen diese aber in eine druckbare Form modifiziert werden.

Detail der eigenen Fußform und erstellt daraus ein CAD-Modell. Die Sohle, die daraus gedruckt werden kann, passt aufgrund der Individualisierung perfekt. Da der Schuh nicht für die Massenproduktion designt wird, kann Form, Farbe und Material frei gewählt werden. Alte Schuhe können gleich vor Ort wieder zerkleinert und zu Druckmaterial verarbeitet werden.

Durch den 3D-Druck weitet sich auch das Feld der Anwender hin zu privaten Akteuren aus (wie in Kapitel 2 dargestellt). Auch hierdurch können wieder Herausforderungen für die Umweltpolitik entstehen.

Die Pro-Designer

Zwischen dem klassischen Handel und dem klassischen Handwerk könnte sich künftig eine neue Geschäftsform etablieren, die von den Möglichkeiten des 3D-Drucks profitiert: produzierende Designer (Pro-Designer). Sie erstellen vor Ort individualisierte Produkte: Möbel, Bekleidung, Schmuck et cetera. Pro-Designer können sich viel freier entfalten und ihre Stärken, wie Kreativität und Erfindungsreichtum, besonders zur Geltung bringen. Umweltpolitisch relevant wird diese Entwicklung, weil so ganz neue Zielgruppen in den Blick kommen – so muss beispielsweise sichergestellt werden, dass die jeweiligen Mitarbeiter/innen in den neuen Unternehmen den 3D-Druck sachgemäß einsetzen. Durch unerfahrene Produzenten könnten sonst verstärkt Gesundheitsrisiken entstehen. Schulungen sowie ein Umweltmanagement werden nötig, um den möglichen Belastungen entgegenzuwirken.

Handwerk 3D

Abgesehen von der schon skizzierten Option, sich weiterzuentwickeln und als Pro-Designer individualisierter Waren – wie dies vor Jahrhunderten ja schon der Fall war – zu etablieren (siehe oben), können sich für Handwerksbetriebe noch weitere Chancen auftun. Jede Form von Bau- oder Ersatzteil lässt sich potentiell künftig jederzeit selbst erstellen. Dies kann einen Gas- und Wasserinstallateur ebenso betreffen wie einen Uhrmacher. Die eigenen Möglichkeiten werden damit erheblich erweitert. Die Rolle des Handwerks als Reparaturbetriebe kann damit deutlich ausgebaut werden. Dort, wo bisher wegen Wartezeiten und Kosten von Ersatzteilen eine Reparatur nicht lohnend war, kann sich dies künftig deutlich ändern. Gleichzeitig kann das Handwerk selbst viel eher auch Optimierungen bestehender Produkte vornehmen. Ist etwa ein Tisch zu kurz, weil noch ein Familienmitglied hinzugekommen ist, werden noch 20 cm

herangedruckt (und die Tischbeine versetzt). Auch hier ergibt sich für die Umweltpolitik die Herausforderung, dass die Betriebe im Umgang mit den neuen Produktionsgeräten und ihren Umweltauswirkungen erst geschult werden müssen und dass die Einhaltung von Umweltstandards sichergestellt werden muss. Dies stellt auch die Umweltaufsichtsbehörden vor neue Herausforderungen, da auf einmal viel mehr Produktionsbetriebe kontrolliert werden müssen und dies bei einem sich gleichzeitig stark ausweitenden Spektrum von Produktionsmöglichkeiten.

Der Prosument

Durch den 3D-Druck wird es mehr Prosumenten geben. Die Grenze zwischen Hersteller und Konsument verschwimmt hier, Privatleute werden zunehmend bestimmte Güter selbst produzieren. Neben dem Problem, dass damit, wie schon geschildert, mehr Personen – und dann auch vollkommene Laien – mit den Umweltauswirkungen der Produktionsvorgänge teilweise vertraut gemacht werden müssen, ergeben sich daraus auch Chancen: Für selbst hergestellte Produkte wird man auch eher Verantwortung übernehmen wollen. Gleichzeitig werden Privatanwender schon aus Eigeninteresse den Umgang mit toxischen sowie kanzerogenen oder mutagenen Materialien eher meiden (Voraussetzung hierfür ist, dass das nötige Wissen über Inhaltsstoffe und ihre Gesundheitswirkungen bereits vorliegt). Bis zu einem gewissen Grad sollte dies also dabei mithelfen, dass Produkte umweltfreundlicher werden.

Rückgang des klassischen Handels

Durch den 3D-Druck könnte der Handel abnehmen, wenn vermehrt privat gedruckt wird. Dadurch verringern sich die Einflussmöglichkeiten des Handels auf den Kunden – Werbung und damit verbundene Konsumanreize gehen zurück. Gleichzeitig entfällt aber auch eine wichtige Instanz für Beratung und als zentrale Anlaufstelle für Reklamationen bei gekauften Objekten. Für die Umweltpolitik bedeutet dies, dass ein zentraler Akteur, der prinzipiell über Umwelteigenschaften von Produkten informieren könnte, wegfällt beziehungsweise in seiner Rolle gemindert wird.

Herausforderungen für die Produzentenverantwortung

Da mit den neuen Produzenten (Pro-Designer, Handwerker, aber auch Privatpersonen) potentiell fast jeder etwas herstellen kann, kann es künftig wesentlich schwieriger werden, Produzenten zu lokalisieren und beispielsweise für Produktfehler oder Nichteinhaltung von Umweltstandards zur Rechenschaft zu ziehen. Das Konzept der

Produzentenverantwortung funktioniert damit häufig nicht mehr. Ein Beispiel für die sich ergebenden Probleme ist der Abfallbereich: Wenn es keine zentralen Produzenten gibt, die auch die Verantwortung für die Abfallentsorgung grundsätzlich tragen, wird es deutlich schwieriger, Entsorgungssysteme zu etablieren. Gleichzeitig wird eine fachgerechte Entsorgung noch komplexer, weil die individualisierten Produkte jeweils individuelle Recyclingkonzepte erfordern. Kennzeichnungen zu den verwendeten Stoffen werden fehlen und jedes Produkt kann auf einmal alles Mögliche beinhalten. Damit ergibt sich letztlich eine sich auftuende Schwere zwischen faktisch sinkender Produzentenverantwortung und erhöhter Notwendigkeit für eine solche.

3.3.3 Flexibilität des Produktionsortes

Produktionszentrum Afrika²⁰

Zusammen mit anderen Trends kann der 3D-Druck langfristig auch noch ganz andere Konsequenzen haben. Neue Herstellungsorte können sich viel einfacher und mit viel geringeren Voraussetzungen etablieren. Das eröffnet wiederum einzelnen Ländern und Regionen ganz neue Chancen.

Nehmen wir Yelwa, eine Stadt in Nigeria: Aufgrund des sehr hohen Bevölkerungswachstums im Land und des Zuzugs aus den umliegenden Dörfern ist die Stadt von etwa 90.000 Einwohnern im Laufe von 50 Jahren bis 2010 auf fast eine Million angewachsen. Parallel zum Bevölkerungswachstum ist die lokale Wirtschaft gewachsen, angetrieben durch die neuen Möglichkeiten des 3D-Drucks. Die Stadt produziert die meisten Artikel ihres Bedarfs selbst. Der Erfindungsreichtum der Bevölkerung kann mit dem neuen Produktionsmittel unmittelbar umgesetzt werden. Das Wohlstandsniveau ist insgesamt angewachsen und der Lebensstandard gestiegen. Yelwa ist dabei kein Einzelfall. Zahlreiche städtische Zentren in Westafrika haben nicht zuletzt mithilfe des 3D-Drucks eine rapide wirtschaftliche Entwicklung erlebt. Gleichzeitig sind durch die neue Produktionsweise aber auch neue Umweltprobleme entstanden: Weil immer mehr Holz als Rohstoff für Druckmaterialien eingesetzt wird, hat sich die Entwaldung ausgeweitet. Und die Schadstoffemissionen der Druckgeräte haben zwar merklich nachgelassen, aber die Exposition der Einwohner ist trotzdem stark angestiegen. Das liegt auch daran, dass die Produktion jetzt in Wohngebieten stattfindet.

Der 3D-Druck kann flexibel und relativ unabhängig vom Standort an unterschiedlichsten Orten eingesetzt werden. Dies erzeugt für die Umweltpolitik spezifische Herausforderungen.

Flexibilisierung des Arbeitsortes

Durch den 3D-Druck können Arbeiten und Wohnen zukünftig wesentlich näher zusammentreten. Viele Tätigkeiten werden verstärkt in der eigenen Nachbarschaft ausgeübt, in lokalen Dienstleistungszentren, und nicht mehr in einer weiter entfernten Fabrik. Damit verkürzen sich die Arbeitswege und der Verkehr wird deutlich verringert – ein zentrales Anliegen der Umweltpolitik. Mit der Verlagerung von Produktion in das unmittelbare Wohnumfeld ergeben sich aber auch neue Probleme. Die Schadstoffbelastung aus dem 3D-Druck beeinträchtigt potentiell alle Anwohner. Die Umweltpolitik muss mithin die Einhaltung deutlich strengerer Grenzwerte garantieren.

Lieferketten ohne Absender

Der flexible Produktionsort hat auch Auswirkungen auf Lieferketten. Grundsätzliches Problem eines nachhaltigen Lieferkettenmanagements ist es, auch bei Zulieferern Umwelt- und Sozialstandards sicherzustellen. Hierfür wurden mittlerweile verschiedene Initiativen ins Leben gerufen, die diese Standards global sicherstellen sollen (vergleiche beispielsweise den Standard der Global Reporting Initiative für Nachhaltigkeitsberichte; GRI 2016). Diese basieren zumeist auf freiwilligen Verpflichtungen der Industrie. Wenn die Dezentralisierung der Produktion weiter zunimmt, kann dies auch das nachhaltige Lieferkettenmanagement und die Kontrolle von Standards über die Lieferkette hinweg erschweren, da immer weniger klar wird, an welchem Ort die jeweiligen Produkte von wem wie hergestellt wurden.

Export von Umweltstandards bei Geräten und Zubehör

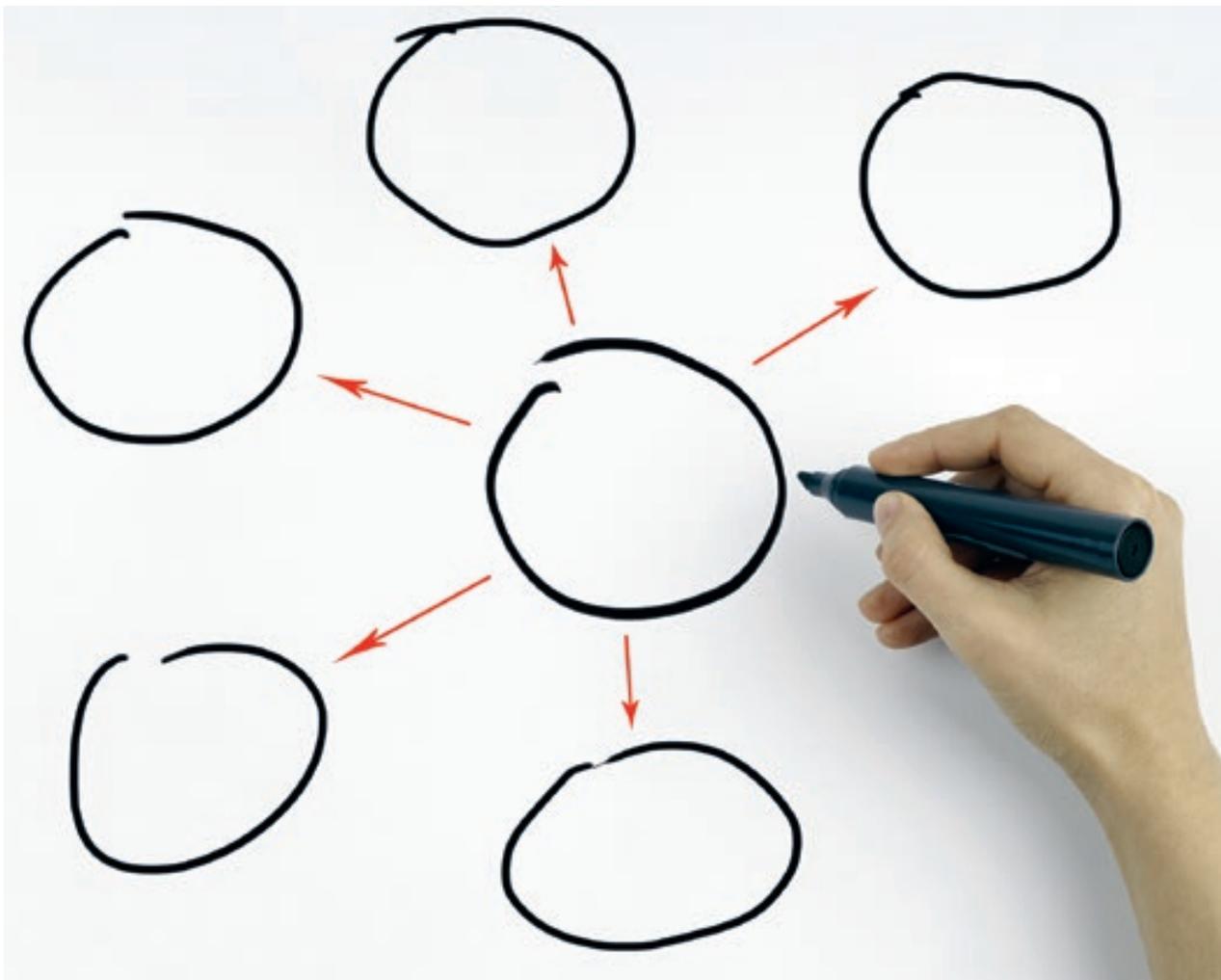
Durch den Export von 3D-Druckern könnten implizit Umweltstandards weltweit gesetzt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass für den 3D-Druck hohe Standards in den Herstellungsländern eingeführt werden. Werden entsprechend starke Vorgaben in der Zukunft für 3D-Drucker implementiert, dann werden diese durch den weltweiten Maschinenhandel auch in die importierenden Länder getragen. Der Export von Druckern könnte so zu lokalen Umweltentlastungen beitragen.

²⁰Dieses Beispiel ist fiktiv und soll die möglichen Implikationen der Flexibilität des Produktionsortes illustrieren.

Angepasste (Umweltschutz-)Technik

Schon jetzt wird der 3D-Druck im Rahmen der Katastrophenvorsorge eingesetzt, um jederzeit rasch an jedem Ort dringend benötigte Güter zu erstellen. Künftig kann der fast ubiquitär mögliche Einsatz von 3D-Druckern auch dazu führen, dass Waren stärker an die örtlichen Bedingungen angepasst werden. Indem dort produziert wird, wo die Waren auch gebraucht werden, können die Produkteigenschaften stärker den örtlichen klimatischen, kulturellen, sozialen und ökonomischen Bedingungen angepasst werden. Letztlich sollte dies aus umweltpolitischer Sicht dazu führen, dass der Ressourceneinsatz weltweit effektiver wird, da vermieden wird, dass Technik eingesetzt wird, die nicht zu den Voraussetzungen, Fähigkeiten und Bedürfnissen vor Ort passt.

Die hier diskutierten Entwicklungsmöglichkeiten des 3D-Drucks und die sich ergebenden Umweltimplikationen sind ebenso vielfältig wie weitreichend. Viele der skizzierten Entwicklungen werden sich erst in längeren Zeiträumen so stark materialisieren können, dass sie deutlich spürbare Konsequenzen für unseren Alltag haben. Der Umweltpolitik bleibt damit oftmals noch geraume Zeit zu reagieren, sowohl mit Blick auf die sich ergebenden Chancen wie auch auf die sich ergebenden Risiken. Die Zeit sollte allerdings auch genutzt werden.



4.1 Fazit: Abschätzung der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks

Wie in Kapitel 2 dargestellt, wird der 3D-Druck schon seit den 1980ern in der Industrie eingesetzt. Die Technologie stellt dementsprechend für Großunternehmen und die Industrie keine Neuheit per se dar. Die aktuelle gesellschaftliche Aufmerksamkeit kommt dem 3D-Druck vor allem deshalb zuteil, weil seit etwa 2007 vermehrt Private und Kleinunternehmen (wie Handwerk, Pro-Designer, Architekten) sowie Startups und FabLabs auf das Produktionsverfahren zurückgreifen. Der 3D-Druck dringt mittlerweile auch in den öffentlichen Raum vor und wird in Schulen und Bibliotheken genutzt. Auch Kinder werden zukünftig 3D-Drucker einsetzen (vergleiche Kap. 2.1). Diese Ausweitung des Produktionsverfahrens sowohl innerhalb des industriellen Umfelds als auch für weitere kleinskaligere Anwendungsbereiche zeigt sich an den Wachstumsszahlen für 3D-Drucker und den Marktprojektionen. Insgesamt betrachtet steigt das Marktvolumen rapide an und wird auch absehbar weiter wachsen. Die Geschwindigkeit dieses projizierten Anstieges muss aber differenziert beurteilt werden: Betrachtet man die Geräte- und auch Druckmaterialien steigen die Zahlen für die Industrie langsam an, während im Desktop-Bereich ein wesentlich stärkeres Wachstum absehbar (und schon beobachtbar) ist. Insbesondere die Anzahl der verkauften Desktop-Drucker wird weiter stark zunehmen (vergleiche Kapitel 2.3). Insofern kann sicherlich von einer „Revolution im 3D-Druck“ gesprochen werden. Damit wird der 3D-Druck auch für die strategische umweltpolitische Vorausschau relevant, weil sich Umweltauswirkungen des Druckverfahrens quantitativ verstärken können.

Gleichzeitig hilft ein Blick auf den weltweiten Maschinenhandel, um das Marktvolumen des 3D-Drucks in Beziehung zu setzen und auch die Umweltauswirkung der Technologie besser einschätzen zu können. Trotz starken Wachstums wird der 3D-Druck-Markt auch in absehbarer Zukunft verhältnismäßig klein sein. Das gilt ebenso für die verdruckten Materialien und die Anzahl der verkauften Druckgeräte. Die These der industriellen „Revolution durch den 3D-Druck“ ist deshalb kritisch zu betrachten – die Technologie wird sich eher in bestehende Produktionsabläufe integrieren, als die industrielle Produktion



insgesamt revolutionieren. Dies muss auch für die umweltpolitische Bewertung des 3D-Drucks mitbedacht werden – letztlich sind hier keine dramatischen (gesamgesellschaftlichen) Verschiebungen zu erwarten.

Im Lichte dieser Marktentwicklung, der verschiedenen Anwendungsfelder, Druckverfahren und Materialien wurde der 3D-Druck in Kapitel 3 mithilfe dreier Ansätze untersucht. Die dort diskutierten Umweltauswirkungen zeichnen ein komplexes Bild des Produktionsverfahrens. Das Belastungs- wie Entlastungspotential der Technologie ist unter anderem abhängig von dem verwendeten Druckverfahren, den eingesetzten Materialien, dem Anwendungsfeld beziehungsweise gedruckten Objekt jeweils im Vergleich zu anderen Produktionsverfahren. Für einzelne Bauteile beziehungsweise gedruckte Objekte ist eine solche ökobilanzielle Analyse bereits geleistet worden (vergleiche etwa Faludi al. 2015a und 2015b). Insgesamt betrachtet hinkt die umweltwissenschaftliche Beschäftigung aber der skizzierten Ausweitung der Technologie noch hinterher.

Trotz der Komplexität der Umweltauswirkungen des 3D-Drucks können aber Korridore angegeben werden, die ein Bild der umweltpolitischen Bedeutung des 3D-Drucks zeichnen. Die in diesem Bericht identifizierten Auswirkungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt (für die genauere Darstellung der Auswirkungen siehe Kapitel 3). Teils sind die Effekte ambivalent; dies wird in der Tabelle entsprechend kenntlich gemacht.

Tabelle 3:

Identifizierte positive und negative Umweltauswirkungen des 3D-Drucks

Kategorie	Positive und Negative Umweltauswirkungen
Druckprozess (Kap. 3.1.1)	<ul style="list-style-type: none"> Belastung durch hohen Energiebedarf Entlastung durch Rohstoffeffizienz Belastungen durch Feinstaubbelastungen, Flüchtige Organische Verbindungen, Lösemittel, Nanopartikel Entlastungen durch Wegfall der Schneidflüssigkeit gegenüber dem Fräsen
Druckmaterialien (Kap. 3.1.2)	<ul style="list-style-type: none"> Belastungen durch Rohstoffgewinnung, Aufbereitung und Herstellung der Druckmaterialien (Kunststoffe, Metalle, Green Materials) Belastungen durch Toxizität der Materialien (auch Prozessfrage) und Emissionen aus den Materialien selbst Belastungen durch teils mangelnde Recyclingfähigkeit Entlastung durch Green Materials (bei Kaskadennutzung von Rohstoffen)
Anwendungen (Kap. 3.1.3)	<ul style="list-style-type: none"> Belastungen durch Druck von ‚Nonsense-Objekten‘ im Eigengebrauch Entlastungen durch Prototypenbau (z. B. Reduktion der Produktionszeit) Entlastungen durch Leichtbau (z. B. Reduktion der CO₂-Emissionen von Flugzeugen) Entlastungen durch Ersatzteile und Werkzeuge (Verlängerung der Lebensdauer von Produkten) Entlastungen durch mögliches dezentrales Recycling (Transporteinsparungen) Möglicherweise Entlastungen in der Bauindustrie (unter Umständen rohstoffeffizienter als andere Verfahren und potentiell bessere Anpassung von Gebäuden und Gebäudekomplexen an den Klimawandel) Entlastungen im Bereich Bioprinting und Nahrungsmittel (z. B. Toxizitätstests, Leder)
Indirekte Effekte (Kap. 3.2)	<ul style="list-style-type: none"> Erschließung neuer Nischenmärkte und Geschäftsmodelle (unter Umständen Ressourcenauswirkungen; aber auch Ermöglichen der Umsetzung grüner Ideen) Entlastungen durch dezentrale Logistik Konsumwandel und Wandel der Lebensstile (ambivalente Effekte)
Design- und Produktionsfreiheit (Kap. 3.3.1)	<ul style="list-style-type: none"> Entlastungen durch Designfreiheit und Bionik (z. B. Leichtbau) Potentielle Entlastungen durch Verlängerung der Lebensdauer der Produkte Belastungen durch geringere Nutzung von Naturprodukten Belastungen durch geringere Verbraucherinformation über umweltbezogene Produkteigenschaften Potentielle Belastungen durch mögliches Umgehen von Umweltstandards Potentielle Belastung durch Beschleunigung der Produktionszyklen (Moden)
Neue Produzenten (Kap. 3.3.2)	<ul style="list-style-type: none"> Potentielle Belastungen durch neue Wirtschaftsakteure: Pro-Designer und ‚Handwerk 3D‘ (beispielsweise Gesundheitsrisiken; Nicht-Einhaltung von Umweltstandards) Ambivalente Effekte durch den Rückgang des Handel (Entlastungen durch verringerte Konsumanreize durch den Handel; Belastungen durch verringerte Produktinformationen) Potentielle Belastungen durch sich aufspaltende Produktionsorte (unter anderem Auswirkungen für Produktverantwortung)
Flexibilität des Produktionsortes (Kap. 3.3.3)	<ul style="list-style-type: none"> Potentielle Belastungen durch Verlagerung der Produktion in das Wohnumfeld Potentielle Belastungen durch Lieferketten ohne Absender (Auswirkungen auf nachhaltiges Lieferkettenmanagement) Potentielle Entlastungen durch Exporte von Umweltstandards (Gerätetechnik) Potentielle Entlastungen durch angepasste (Umweltschutz-)Technik

Quelle: eigene Darstellung

Aus dieser Liste identifizierter positiver wie negativer Umweltauswirkungen können zentrale Chancen und Risiken des 3D-Drucks identifiziert werden, die von der Umweltpolitik besonders beachtet werden sollten und als wichtige Ergebnisse der strategischen Vorausschau für den 3D-Druck gelten können. Diese Umweltauswirkungen sind teils schon stärker beobachtbar, teils noch wesentlich stärker Zukunftsthemen. Sie lassen sich teilweise bestimmten Akteursgruppen zuordnen (beispielsweise Leichtbau in der Industrie), teilweise sind es übergreifende Themen (Recyclingfähigkeit der gedruckten Teile in der Desktop- Anwendung und bei Großunternehmen).

Mittelfristige Risiken des 3D-Druck für Umwelt und Gesundheit:

Durch die 3D-Drucker und die verwendeten Materialien können **Gesundheitsbelastungen** auftreten. Gesundheitsrisiken entstehen zum einen in der Industrie, insbesondere bei Großunternehmen für Arbeiter; zum anderen in der kleinskaligen Anwendung mit Desktop-Druckern (Privatgebrauch, Non-Profit sowie kleinen Unternehmen). Abhängig sind diese Gesundheitsrisiken unter anderem vom technischen Wissen der Anwender, dem Bewusstsein um die Umweltbelastungen des 3D-Drucks, der Überwachung der auftretenden Gesundheitsbelastungen, dem Preis der Drucker und Materialien und davon teils abhängig der technischen Beschaffenheit der Geräte und Materialien. Im industriellen Umfeld sind in weniger starkem Umfang Belastungen zu erwarten, da hier bereits etablierte Mechanismen für den Arbeitsschutz bestehen sowie erfahrenes Fachpersonal zur Verfügung steht, das mit den potentiellen Risiken besser vertraut ist. Belastungen können gleichwohl entstehen, vor allem bei noch nicht automatisierten Anlagen, z. B. beim Post-Treatment, wenn Arbeiter Feinstäuben und Nano-Partikeln ausgesetzt werden. In der Desktop-Nutzung ist mit höheren Belastungen zu rechnen, da die Anwender mit den Risiken wesentlich weniger vertraut sind und oft nötige Fachkenntnisse fehlen. Auch kommen entsprechende Schutzvorrichtungen noch weniger zum Einsatz, da diese teuer sind. Belastungen können durch Emissionen aus den Materialien selbst, durch Emissionen aus dem Prozess (Feinstäube, Nano-Partikel, flüchtige organische Verbindungen) Belastungen auftreten, insbesondere wenn keine Filter verwendet werden. Aber auch durch das Post-Treatment (Handling

der Teile nach dem Druck) und bei der Entsorgung können Laien Risiken ausgesetzt werden. Auch die Toxizität der verdruckten Materialien und der gedruckten Objekte erzeugt spezifische Risiken.

Der 3D-Druck wirft auch aus Sicht der Kreislaufwirtschaft Probleme auf. Dies betrifft den anfallenden **Abfall** und die **Recyclingfähigkeit** der Druckmaterialien. So degradieren Pulver im Pulverbettverfahren in der Industrie und können in der Regel nur „downgecycelt“ werden, z. B. für die weitere Verwendung im Spritzguss.²¹

Ähnliches gilt für die flüssigen Photopolymere die z. B. im Desktopbereich für das Stereolithographie-Verfahren genutzt werden. Durch Sonneneinstrahlung (UV-Licht) können die Materialien vernetzen (aushärten), werden gelartig und sind sodann für den 3D-Druck unbrauchbar und quasi nicht recyclebar. Dies passiert z. B. bei längeren Stehzeiten der Drucker oder beim Auslösen der gedruckten Teile von der Druckplattform. Beim 3D-Druck können klassische Materialien (z. B. Stahl) neue materiologische Eigenschaften bekommen, mit Auswirkungen für etablierte Stoffkreisläufe. Die zunehmende Nutzung von Desktop-Druckern durch Selbstständige, Kleinstunternehmen und zu Hause wirft auch die Frage auf wie gedruckte Objekte sinnvoll in die Kreislaufwirtschaft eingebunden werden können.

3D-Drucker haben einen hohen **Energiebedarf** und verursachen über die Deckung dieses Bedarfs Umweltbelastungen. Der Energiebedarf variiert zwischen den einzelnen Verfahren (siehe Kap. 3.1.1) und auch je nach Anwendungsgebiet; im Vergleich zu konventionellen Produktionsmethoden ist der Energiebedarf in manchen Fällen sogar geringer. Die Umweltauswirkungen des 3D-Drucks insgesamt werden aber in existierenden Ökobilanzen zu verschiedenen Bauteilen jeweils durch den Energiebedarf dominiert. Verschiedene negative Umweltauswirkungen können durch den Energiebedarf der 3D-Drucker entstehen. Dazu zählen CO₂-Emissionen mit entsprechenden Auswirkungen für den Klimawandel sowie der Ressourcenverbrauch fossiler Energieträger mit Implikationen für intergenerationale Gerechtigkeit (Verfügbarkeit dieser Ressourcen für zukünftige Generationen). Die Energie-Effizienz des 3D-Drucks ist eine wichtige Stellschraube um den 3D-Druck nachhaltiger zu machen.

²¹ Mit Downcycling ist hier gemeint, dass das degradierte Pulver durch schlechtere Materialeigenschaften nicht mehr für die gleiche Anwendung nutzbar ist, sondern nur noch für Anwendungen mit geringeren Materialanforderungen (z. B. als Schaumstoff).

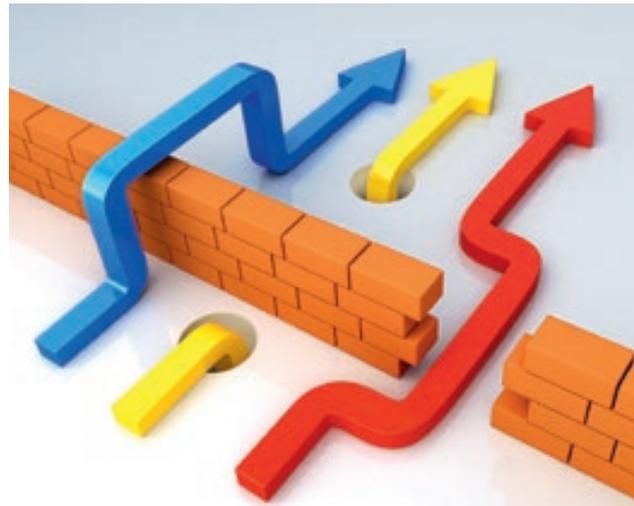
Mittelfristige Chancen des 3D-Druck für Umwelt und Gesundheit:

Der 3D-Druck bietet neben diesen Risiken auch große Chancen: Der 3D-Druck kann für einige der Verfahren zur **Ressourceneffizienz** in der Produktion beitragen und damit den Wandel hin zu einer Green Economy unterstützen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben werden Ressourceneffizienzgewinne erzeugt durch: die Verfahren selbst (additiv; allerdings unter verschiedenen Einschränkungen, vergleiche Kap. 3.1), den Druck von Prototypen, den Einsatz für den Leichtbau, sowie durch Verbesserungen des Prozessablaufes und Funktionsintegration. Wie bei anderen Ressourceneffizienz-Gewinnen sind hierbei auch mögliche Rebound-Effekte mit zu beachten, welche die Effizienzgewinne teils wieder kompensieren können.

Entlastungen könnten durch „**Green Materials**“ entstehen. Der 3D-Druck wird die Nutzung von „Green Materials“ begünstigen, aus technologischen und aus ökonomischen Gründen (siehe auch OECD 2017: 27ff.). PLA (ein Agrarkunststoff) wird im 3D-Druck-Desktopbereich schon breit eingesetzt, im Unterschied zu anderen Fertigungsverfahren in denen „Grünere Materialien“ noch wesentlich weniger dominant verwendet werden. Der Grund hierfür liegt auch im FDM-Verfahren: die Materialeigenschaften von PLA sind für das Verfahren vorteilhaft im Vergleich zu anderen Druckmaterialien. Darüber hinaus kann der 3D-Druck zur Senkung der Arbeitskosten beitragen – dadurch können Unternehmen ihre Kosten senken, auch wenn sie auf teurere „Green Materials“ zurückgreifen. Schließlich kann insbesondere die Kaskadennutzung von Rohstoffen wie beispielsweise Holzresten, Karottenresten und Zuckerrohrresten sowie die Nutzung von Recycling-Filamenten entlastend wirken. Hierbei sind aber die Umweltauswirkungen bei der Nutzung von nachhaltigen Materialien miteinzubeziehen (siehe Kapitel 3.1.2).

Durch die Möglichkeit **Ersatzteile** zu produzieren und bestehende Produkte zu reparieren kann die Lebensdauer von Gütern verlängert werden. Ersatzteile können in einzelnen 3D-Druckzentren produziert werden oder dezentral mit „Stadtteil“-3D-Druckern.

Sehr zukunftsgerichtet kommen weiterhin auch die Chancen durch die Nutzung von **tissue engineering** (künstliche Herstellung von biologischem Gewebe) für die künstliche Fleischproduktion sowie Fleischersatz-



produktion sowie für Toxizitätsanalysen und dem Druck von Geweben (oder ganzer Organe) für die medizinische Nutzung in den Blick. Durch künstliche Fleischproduktion unter Unterstützung des Bioprintings können sich erhebliche Entlastungen ergeben (Reduzierung des Energiebedarfes, Reduzierung der Treibhausgase, Reduzierung der Naturraumbeanspruchung, Verringerung des Wasserverbrauches). Ähnliche Entlastungen können auch durch die Herstellung von „veganem Fleisch“ mithilfe der extrusionsbasierten Verfahren entstehen. Hierbei sind aber auch tierethische Bedenken miteinzubeziehen (siehe Kapitel 3.1.3).

Langfristige Herausforderungen:

Über diese oben dargestellten Chancen und Risiken hinaus sind die stärker in der Zukunft liegenden potentiellen Veränderungen zentral, die sich aus den **innovativen Charakteristiken** des 3D-Drucks ergeben. Diese Veränderungen betreffen sowohl die Produktionsorte, als auch die Produzenten, die hergestellten Produkte und die Konsumenten dieser Produkte und damit zentrale Aspekte nachhaltiger Produktion und Konsumtion. Einige mögliche Auswirkungen dieser Veränderungen sind in diesem Bericht skizziert worden: dazu zählen unter anderem verringerte Verbraucher- und Produktinformationen, neue Kaufanreize durch Beschleunigen von Moden, Unterminierung von Umwelt- und Sozialstandards durch unklare Lieferketten, damit erschwerte Produktverantwortung und Hemmnisse für den produktionsorientierten Umweltschutz sowie Risiken für neue Produzenten durch Verlagerung der Arbeit in das Wohnumfeld. Diese Veränderungen sollte die Umweltpolitik sich bewusst machen, beobachten und gegebenenfalls gegensteuern.

4.2 Handlungsempfehlungen für die Umweltpolitik und Forschungsbedarf

Es besteht umweltpolitischer Handlungsbedarf. Grund hierfür sind die in diesem Bericht identifizierten Risiken, die es zu minimieren gilt, aber auch die (Umwelt-)Chancen, die politisch unterstützt werden müssen, denn sie stellen sich nicht automatisch ein. Der Handlungsbedarf bezieht sich vor allem (aber nicht ausschließlich) auf die zuvor formulierten Prioritäten (Chancen und Risiken des 3D-Drucks). Da zentrale Aufgabenfelder der Umweltpolitik (wie beispielsweise der Gesundheitsschutz, Übergang zur Kreislaufwirtschaft und Green Economy) betroffen sind, muss die Nachhaltigkeit der Technologie wesentlich stärker auf die umweltpolitische Agenda gesetzt werden.

Um **Gesundheitsbelastungen** durch die 3D-Drucker und der 3D-Druckmaterialien zu minimieren, sind verschiedene Schritte für die verschiedenen Anwendungskontexte zu empfehlen. Im industriellen Umfeld sollten möglichst alle Prozess-Schritte automatisiert werden, um die Exposition insbesondere bei der Vorbereitung der Drucks und der Nachbearbeitung der Druckobjekte zu minimieren. Dazu sollten Unternehmen Belastungen ihrer Arbeiter durch den 3D-Druck systematisch überprüfen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen ergreifen. Wichtig ist auch die Schulung der Mitarbeiter und Aufklärung über mögliche Risiken. Die Umweltpolitik kann hier unterstützen – durch Informationen über gesundheitliche Risiken des 3D-Drucks –, aber auch gezielt Druck ausüben, falls freiwillige Maßnahmen der Industrie nicht ausreichen. Dazu muss die Umsetzung der innerbetrieblichen Maßnahmen überprüft werden.

Für das Umfeld der kleinskaligen Anwendung mit Desktop-Druckern ist stärkeres umweltpolitisches Engagement gefragt, da wie im Bericht dargestellt, hier stärkere Gesundheitsrisiken entstehen können. Die Industrie muss lebensmittelechte Druckfilamente (und Druckmaterialien allgemein) bereitstellen, die Desktop-Nutzern keinen Risiken aussetzen. Dazu reicht es nicht aus, über die Gefahren in Sicherheitsdatenblättern zu informieren. Insgesamt muss sichergestellt werden, dass die Materialien nicht toxisch sind und so gelagert werden können, dass keine gesundheitsgefährdenden Emissionen freigesetzt werden, und schließlich dass die gedruckten Objekte unbedenklich für Nutzer im Desktop-Umfeld sind. Während des Druckprozesses muss sichergestellt werden, dass Feinstäube, Nano-Partikel und flüchtige

organische Verbindungen minimiert werden. Geräte und Materialien müssen Standards entsprechen – z. B. durch die verpflichtende Einführung von Filtersystemen. Hier sollte notfalls auch auf regulierende Maßnahmen zurückgegriffen werden, beispielsweise durch die Anpassung der Durchführungsbestimmungen der Öko-Designrichtlinie.

Durch die Umweltpolitik sollten Desktop-Nutzer über die Risiken und Möglichkeiten zur Begrenzung der Exposition (Aussetzung) mit Emissionen aus dem 3D-Druck informiert werden. Die Informationen sollten zielgruppengerecht aufbereitet werden. Informationen könnten beispielsweise über Universitäten, 3D-Druckermessen (maker faires) und über Handwerkskammern, Architektenkammern sowie Branchenverbände verbreitet werden. Anzudenken ist auch die Einführung beziehungsweise Übertragung von Label- oder Zertifizierungskonzepten, die auf weniger umweltbelastende Herstellungsverfahren beziehungsweise Materialien verweisen. Hightechgeräte und -materialien sollten gefördert werden.

Insgesamt sollte die Toxizität der Materialien und der gedruckten Objekte sowie die Gesundheitsbelastung durch 3D-Druckverfahren weiter erforscht werden. Hier besteht beispielsweise noch Forschungsbedarf bei der räumlich/zeitlichen Verteilung der Emissionen von Feinstaub und flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (VOC) und der Ablagerung auf Oberflächen (Afshar-Mohajer et al. 2015). Außerdem sollten Strategien zur Vermeidung von Toxizität-Aussetzungen entwickelt werden. Ansatzpunkte können von Seiten der Forschung sowohl die Verbesserung der Druckverfahren sein als auch die Verbesserung der Materialien oder die Verwendung von völlig neuen Stoffen und Zusammensetzungen. Innovationen wie die Verwendung von Salz, Gips oder Sägespänen als Druckmaterial sollten weiter verfolgt werden ebenso wie „Green Materials“ und Recycling-Filamente (Faludi et al. 2015b).

Um den **Energiebedarf** der Geräte zu reduzieren, sind verschiedene Schritte zentral. Diese Schritte beziehen sich wiederum auf die unterschiedlichen Anwendergruppen des 3D-Druck (kleinskalige Nutzung von Desktop-Druckern versus Anwendung in der Industrie und bei Großunternehmen). Aus umweltpolitischer Sicht muss sichergestellt werden, dass die 3D-Drucker möglichst energieeffizient designed sind, das heißt eine low

power standby Funktion haben (vergleiche auch OECD 2017) und energieeffizient eingesetzt werden, also möglichst gut ausgelastet sind, mit geringen Stillstandzeiten und geringer Einstellungs- und Reinigungszeit (vergleiche auch hierzu OECD 2017). Außerdem sollten 3D-Drucktechnologien zum Einsatz kommen, die wenig Energie verbrauchen. Die Weiterentwicklung der 3D-Drucker ist teils eine Forschungsaufgabe (z. B. Weiterentwicklung der Lasertechnologien), aber umweltpolitisch müssen hier auch Standards gesetzt werden, die es einzuhalten gilt (beispielsweise Standby-Funktion), notfalls auch über regulative Maßnahmen. Darüber hinaus kann die Industrie ihre Bemühungen verstärkt darauf lenken, den Energiebedarf zu minimieren. Dazu gehört die Integration der 3D-Drucker in Fertigungsstraßen, um z. B. industrielle Kühlkonzepte (Wasserkühlung et cetera) für die Laser nutzen zu können und die Erhöhung der Auslastung der Drucker. Für Energie-Effizienzmaßnahmen sind aus umweltpolitischer Sicht zielgerichtete Informationen für Unternehmen und Desktop-Nutzer über Möglichkeiten der Senkung des Energiebedarfs zentral (Energieverbrauchskennzeichnungen).

Um den hohen Energiebedarf der Drucker zu reduzieren, sollten insbesondere weitere technische Mittel erforscht werden, um beispielsweise Verfahren zu beschleunigen oder Aufheiz-Zeiten zu verringern. Schließlich sollte die Energieeffizienz des 3D-Druckes weiter verbessert werden, z. B. durch Forschung zur besseren Isolation der Druckunterlage beziehungsweise der beheizten Bauteile und zur Verringerung der Produktionszeit (Baumers et al. 2011).

Der 3D-Druck weist teils auch Energieeinsparungspotenziale auf. Diese Potenziale sind stark abhängig von der eingesetzten Technologie (vergleiche Kap. 3.1.1) im Vergleich zu substituierten Fertigungsverfahren und dem hergestellten Objekt. Verschiedene Ökobilanzen zeigen aber, dass der 3D-Druck teils energieeffizienter produzieren kann (vergleiche Kap. 3.1.1). Für diese Energieeffizienzpotenziale können Rebound-Effekte auftreten, wenn beispielsweise durch die verringerten Kosten für die Herstellung von Gütern die Nachfrage angeregt wird. Grundsätzlich kann solchen Rebound-Effekten durch verschiedene Strategien entgegengewirkt werden: z. B. indem die Effizienzgewinne durch eine Abgabe abgeschöpft werden oder Verbraucher aufgeklärt werden. Bevor solche Strategien angedacht werden, muss aber erst weitere Forschung klären, inwieweit und wie stark Rebound-Effekte im 3D-Druckbereich auftreten.

Im industriellen Umfeld werden die Themen **Recycling** und **Entsorgung** von gebrauchten Pulvern bereits mitgedacht und die Pulver werden in der Regel in entsprechende Prozesse eingebracht. Die zukünftig zunehmende Nutzung der Drucker im Desktop-Bereich macht es notwendig, Stoffkreisläufe auch für dieses Anwenderfeld zu schließen. Dies ist zunächst eine Forschungsaufgabe, die auch von der Umweltpolitik in den Blick genommen werden sollte. So sollte geprüft werden, wie gedruckte Objekte in die Kreislaufwirtschaft eingebunden werden können, beispielsweise über eingedruckte Label, die über die Materialeigenschaften des Druckobjektes Aufschluss geben. Insgesamt sollte systematisch analysiert werden, welche neuen Materialien eingesetzt werden, welche Abfälle entstehen, wie diese Materialien sich im Druckprozess verändern und in bestehende Kreisläufe eingebunden werden können.

Um **Ressourceneffizienzgewinne** in der Industrie zu realisieren, sollte die vermehrte Verwendung von Leichtbau in der Luftfahrtindustrie als Klimaschutzbeitrag gefördert werden, da, wie in Kapitel 3.1. erläutert, die Technologie dazu beitragen kann, Emissionsreduktionsziele zu erreichen (Huang et al. 2013; Nickels 2015). Insgesamt bietet der 3D-Druck, wie in Kapitel 3.1. erläutert, einiges Potential für eine nachhaltige Produktion, wenn weiter an der Schnelligkeit, Genauigkeit und Anwendbarkeit des 3D-Drucks sowie der besseren Integration in größere Produktionsprozesse geforscht wird (vergleiche Frazier 2014). Außerdem sollte an Materialien geforscht werden, die mit wenig Energieaufwand verarbeitet werden können, wie etwa Kunststoffe, die ohne eine Erwärmung der Druckunterlage auskommen (vergleiche Faludi et al. 2015b). Um Unternehmensökobilanzierungen zu unterstützen, ist es ferner zentral, dass Daten zur Energieeffizienz der Drucker und zum Einsatz von Sekundärrohstoffen möglichst kostengünstig zur Verfügung gestellt werden.

Um das Potential der 3D-Drucker für **Ersatzteile** zu nutzen, sollten Barrieren abgebaut werden und entsprechende Anreize geschaffen werden. Dazu gehören Fragen zur Haftung und dem Urheberrecht, wenn Ersatzteile in Desktop-Druckern hergestellt werden. Dritte sollten das Recht haben, Ersatzteile auch über bisherige Lieferzeiten hinaus selbst herzustellen, unter Umständen nach Zahlung einer Lizenzgebühr, gegebenenfalls auch über 3D-Druckdienstleister als zentrale Anlaufstelle für Ersatzteile. Um die langfristige Reparaturfähigkeit von Objekten sicherzustellen, sollten CAD-Zeichnungen

verschiedener Ersatzteile / Bauteile langfristig von der Industrie bereitgestellt werden. Anzudenken ist hier einerseits Anreizstrukturen zu schaffen und andererseits die Industrie dazu zu verpflichten, solche Vorlagen bereitzuhalten.

Im Bereich der **Toxizitätsanalysen, Herstellung von künstlichem Fleisch- und Fleischersatz und künstlichem Leder** kann die Umweltpolitik unterstützend eingreifen. Dazu zählt die Verfügbarmachung und Kommunikation bestehender Ansätze zur Nutzung von tissue engineering für Toxizitätsanalysen. Beispielsweise könnten Akteure aus dem Kosmetikbereich vernetzt werden und es kann gemeinsam mit Wissenschaftlern und Politikern diskutiert werden, wie tissue engineering weiter vorangetrieben werden kann. Für die Herstellung von künstlichem Fleisch und künstlichem Leder ist noch ein großer Schritt zu tun, da die Kosten zurzeit noch äußerst hoch sind. Demzufolge sollte die Umweltpolitik auch hier vor allem als agenda setter für die Innovations- und Forschungspolitik auftreten. Die Nutzung künstlichen Fleisches ist absehbar mit großen Vorbehalten aus der Bevölkerung verbunden. Gerade in diesem Bereich sind noch weitere Forschungsschritte notwendig, um das Potential für die Umwelt entfalten zu können. Dazu gehört zentral die kostengünstigere Produktion von Gewebe und die Erforschung von künstlichen Produkten, die auch verbraucherfreundlich sind, das heißt, die hinsichtlich Konsistenz und Geschmack konventionellen Produkten ähnlich sind und so Verbraucher nicht abschrecken. Hierbei sollten aber auch tierethische Perspektiven miteinbezogen werden.

Für die sich abzeichnenden noch stärker in der Zukunft liegenden Veränderungen, die sich aus den **innovativen Charakteristiken** ergeben, erscheinen mehrere Schritte angezeigt. Erstens erscheint es wichtig, frühzeitig mit relevanten Branchenverbänden und Erstanwendern in Kontakt zu treten und gemeinsam Möglichkeiten zu eruieren, den integrierten Umweltschutz in neuen Kleinstbetrieben und Verbraucher- und Produktinformationen sicherzustellen. Gemeinsam sollten Strategien erarbeitet werden, Umweltbelastungen möglichst gering zu halten und Betriebe und die hergestellten Produkte auch nach dem möglichen Bedeutungsgewinn durch den 3D-Druck möglichst nachhaltig zu gestalten. Untersucht werden sollte weiter, wie groß der Anteil der neuen Zielgruppen für produktionsorientierten Umweltschutz ist und absehbar sein wird. Wichtig wäre in dem Zusammenhang weiter aufzuschlüsseln, welche Kleinstbetriebe aus welchen

Branchen den 3D-Druck einsetzen werden. Auch bereits bestehende betriebliche Umweltschutzmaßnahmen und künftige Anknüpfungspunkte für 3D-Druck bezogene Umweltschutzmaßnahmen könnten analysiert werden. Zweitens erscheint es in Bezug auf die Auswirkungen auf Lieferketten wichtig, bestehende Ansätze des nachhaltigen Lieferkettenmanagements weiter zu denken (wie beispielsweise Standards für Nachhaltigkeitsberichterstattung, z. B. der Global Reporting Initiative, GRI). Sichergestellt werden muss auch hier, dass Umweltstandards über die gesamte Lieferkette eingehalten werden.

Als abschließender Gedanke sei nach der Analyse der Umweltauswirkungen und Diskussion umweltpolitischer Handlungsempfehlungen auch noch einmal auf den Zusammenhang mit laufenden umweltpolitischen Strategieprozessen verwiesen. Die nationale Umweltpolitik versteht sich zunehmend als transformative Kraft in der Gesellschaft (siehe BMUB 2016: Integriertes Umweltprogramm 2030). Das Forschungsvorhaben „Analyse und Bewertung der Wirkungen von gesellschafts- und umweltpolitischen Themen auf die Umweltpolitik mit Hilfe der Methode der Trendanalyse“ hat ausgehend von der zunehmenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzung des 3D-Drucks untersucht, welche Umweltauswirkungen durch die Technologie absehbar sind. Im Sinne einer transformativen Umweltpolitik sollte nun wiederum der Blick auf die Gesellschaft zurückgehen und es sollten Initiativen in die Gesellschaft hinein ergriffen werden, um den 3D-Druck nachhaltig zu gestalten. Dies gilt insbesondere auch für mittel- und langfristigen Umwälzungen, die sich potentiell aus dem 3D-Druck ergeben. Hierfür hat dieser Bericht Ansatzpunkte erarbeitet, die nun von der Umweltpolitik und anderen Politikbereichen (z. B. BMBF für die Forschungsförderung) im Sinne einer transformativen Umweltpolitik angegangen werden sollten. Dies beinhaltet auch, über die hier diskutierten Maßnahmen der „klassischen Umweltpolitik“ hinaus, eine gesellschaftliche Debatte zu den Umweltauswirkungen des 3D-Drucks anzustoßen.

5 Anhang: Assessment Verfahren

Tabelle 4:

Belastungsarten und -kategorien in VERUM

Belastungsarten	Belastungskategorien
Chemische Belastungen	Treibhausgase Schadstoffe / Nährstoffe in Außenluft Schadstoffe in Innenräumen Abwasser Diffuse Nähr- und Schadstoffeinträge, Pestizide
Physikalische Belastungen	Lärm Strahlung Mechanische Tötung von Tieren
Biologische Belastungen	Krankheitserreger Invasoren
Ressourceninanspruchnahme	Verbrauch mineralischer Rohstoffe inklusive fossiler Energieträger Verbrauch biotischer Rohstoffe Wasserverbrauch Naturraumbeanspruchung
Störfälle / Unfälle	

Quelle: UBA 2014

Tabelle 5:

Dimensionen und Kategorien indirekter Umweltauswirkungen

Dimensionen	Kategorien
Demographie	Fertilität Mortalität Migration Altersverteilung
Raum	Urbanisierung und Landflucht Zersiedelung und Suburbanisierung Bevölkerungsdichte
Wirtschaft	Wirtschaftswachstum Wettbewerbsfähigkeit Produktivität Energie- und Materialintensität Strukturelle Transformation Konsumverhalten Mobilität und Verkehr Einkommensverteilung Arbeitslosigkeit Armut Wohlstand und hoher Lebensstandard Soziale Sicherheit
Wissenschaft und Technologie	Innovationen Technologischer Wandel
Politik	Politische Teilhabe und Politische Freiheiten Interessenorganisationen Staatsform / Herrschaftsform / Regierungssystem Mediensystem und Medien Parteiensystem und Politische Parteien Rechtssystem Verwaltungssystem
Gesellschaft und Kultur	Umweltbewusstsein Diskurse / Narrative / Frames Ausbildung von Werten, Einstellungen, Meinungen und Lebensstilen Wissensbildung

Quelle: eigene Darstellung

- 3D-Druck Magazin (2016):** Spielzeughersteller Mattel stellt ThingMaker 3D-Drucker für \$ 299,99 vor – Update. <https://3druck.com/drucker-und-produkte/spielzeughersteller-mattel-stellt-thingmaker-3d-drucker-vor-5142079/>. Aufgerufen am 09.11.16.
- 3D-Druck Magazin (2017):** Labs. <https://3druck.com/labs/>. Aufgerufen am 03.02.2017.
- 3ders (2013):** Plastic Bank: Startup monetizes plastic waste for 3D printers to reduce poverty. <https://www.3ders.org/articles/20131214-plastic-bank-startup-monetizes-plastic-waste-for-3d-printers-to-reduce-poverty.html>. Aufgerufen am 17.05.16.
- 3DPrinterOS (2016):** 3D Printing: Recycling plastic waste and saving the world. <https://www.3dprinteros.com/3d-printing-recycling-plastic-waste-and-saving-the-world/>. aufgerufen am: 12.12.2017.
- 3dprintingindustry (2015):** Concrete 3D Printer Breaks Down Walls of Traditional Construction. <http://3dprintingindustry.com/2015/10/28/concrete-3d-printer-break-downs-walls-of-traditional-construction/>. Aufgerufen am 18.05.16.
- 3dprintingindustry (2017):** History of 3D Printing. <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>?. Aufgerufen am 08.02.2017.
- 3D systems (2015):** 3D Systems Sustainability Program. <http://infocenter.3dsystems.com/cube/user-guide/3d-systems-sustainability-program>. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- Afshar-Mohajer, Nima., Wu, Chang-Yu, Ladun, Thomas., Rajon, Didier A., & Huang, Yong (2015):** Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. In: Building and Environment, 93, S. 293–301.
- Ahn, Sung-Hoon; Chun, Doo-Man; Chu, Won-Shik (2013):** Perspective to green manufacturing and applications. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14:6, S. 873–874.
- All3dp (2015):** 3D Printed Toys from Hasbro. <https://all3dp.com/3d-printed-toys-hasbro/>. Aufgerufen am 11.11.16.
- Almeida, Henrique A.; Mário S. Correia (2016):** Sustainable Impact Evaluation of Support Structures in the Production of Extrusion-Based Parts. In: Muthu, Senthilkannan Subramanian; Savalani, Mahesh Monica (Hrsg.): Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 1. Singapore: Springer Singapore.
- Almeida, Henrique A.; Oliveira, Eunice S. G. (2016):** Sustainability Based on Biomimetic Design Models. In: Muthu, Senthilkannan Subramanian; Savalani, Mahesh Monica (Hrsg.): Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 2. Singapore: Springer Singapore.
- Alves, Salete Martins and de Oliveira, Joao Fernando Gomes (2006):** Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact. In: Journal of materials processing technology, 179:1, S. 185–189.
- Anubis 3D (2016):** Improving manufacturing processes with 3D printing, rapid prototyping. <https://www.onlinetmd.com/article/3d-printing-anubis-manufacturing-22416>. Aufgerufen am 13.05.16.
- Appropedia (2016):** Recyclebot. <http://www.appropedia.org/Recyclebot>. Aufgerufen am 13.05.2016.
- Aşıcı, Ahmet Atıl und Sevil Acar (2016):** Does income growth relocate ecological footprint? In: Ecological Economics, 61:2, S. 707–714.
- Azimi, Parham; Dan Zhao; Claire Pouzet; Neil E. Crain and Brent Stephens (2016):** Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. In: Environmental science & technology 50:3, S. 1260–1268.
- Bagliania, Marco; Giangiacomo Bravo und Silvana Dalmazzone (2008):** A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator. In: Ecological Economics 65, S. 650–661.

- Banerjee, Sukamal (2016):** 3D Printing: Are You Ready for the New Decentralized Industrial Revolution? <http://www.wired.com/insights/2015/02/3d-printing-decentralized-industrial-revolution/>. Aufgerufen am 13.05.2016.
- Baumers, M.; Tuck, Christopher; Wildman, Ricky; Ashcroft, I. und Hague, R. (2011):** Energy inputs to additive manufacturing: does capacity utilization matter? In: EOS, Ausgabe 1000: 270, S. 30–40.
- Berman, Barry (2012):** 3-D printing: The new industrial revolution. In: Business horizons, 55:2, S. 155–162.
- BMEL (2015):** Tierschutz in der Forschung. http://www.bmel.de/DE/Tier/Tierschutz/_texte/TierschutzTierforschung.html?docId=7027766 Aufgerufen am 13.05.2015.
- BMUB (2016):** Integriertes Umweltprogramm 2030.
- Bonvoisin, Jérémy (2016):** Implications of Open Source Design for Sustainability. In: Setchi, Rossi; Howlett, Robert J.; Liu, Ying; Peter Theobald (Hrsg.): Sustainable Design and Manufacturing 2016. Cham: Springer International Publishing.
- Bringezu, Stefan; Helmut Schütz, Sören Steger und Jan Baudisch (2004):** International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. In: Ecological Economics, 51:1-2, S. 97–124.
- Bühner, Moritz (2013):** First LCA on 3D Printer Sustainability: Green Manufacturing Revolution or Overrated Gadget? Hg. v. Knowtheflow.com. Aufgerufen am 22.10.2015.
- Burkhart, Mathias und Aurich, Jan C. (2015):** Framework to Predict the Environmental Impact of Additive Manufacturing in the Life Cycle of a Commercial Vehicle. In: Procedia CIRP, 29, S. 408–413.
- Campbell, Thomas; Christopher Williams; Olga Ivanova und Banning Garrett (2011):** Could 3D Printing Change the World? In: Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Technologies.
- Chen, Danfang; Steffen Heyer; Suphunnika Ibbotson; Konstantinos Salonitis; Jón Garðar Steingrímsson und Sebastian Thiede (2015):** Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. In: Journal of Cleaner Production, 107, S. 615–625.
- Condemarin, Mayra (2015):** Unternehmensberater At Kearney prophezeit für die nächsten Jahre 3D-Druck-Boom. <http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/marktforschung/at-kearney-3d-druck-boom-27124973.html>. Aufgerufen am 24.11.2015.
- d3dinnovations (2016):** FilaFab. <http://d3dinnovations.com/filafab/>. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- DHL (2016):** 3D Printing and the future of supply chains. A DHL perspective on the state of 3D printing and implications for logistics. http://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/dhl_trendreport_3dprinting.pdf Aufgerufen am 16.10.2017
- DWN (2013) Forscher essen Stammzellen-Burger für 250.000 Euro.** <http://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2013/08/06/forscher-essen-stammzellen-burger-fuer-250-000-euro/>. Aufgerufen am 25.05.16.
- Faludi, Jeremy (2013):** Environmental Impacts of 3D Printing. <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/blog/environmental-impacts-3d-printing>. Aufgerufen am 13.05.16.
- Faludi, Jeremy; Bayley, Cindy; Bhogal, Suraj; Iribarne, Myles (2015a):** Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. In: Rapid Prototyping Journal, 21:1, S. 14–33.
- Faludi, Jeremy; Zhongyin Hu; Shahd Alrashed; Christopher Braunholz; Suneesh Kaul und Leulekal Kassaye (2015b):** Does Material Choice Drive Sustainability of 3D Printing? In: International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 9:2, S. 216–223.
- FAZ (2014):** Wofür braucht man eigentlich einen 3D-Drucker? <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/computer-internet/wofuer-braucht-man-eigentlich-einen-3d-drucker-12901734.html>. Aufgerufen am 13.05.16

Filabot: Website. <https://www.filabot.com/>. Aufgerufen am: 12.12.2017.

Finger, Tobias (2014): Startup Plastic Bank sagt Abfallbergen den Kampf an. <http://green.wiwo.de/3d-druck-mit-plastikmuell-startup-plastic-bank-sagt-abfallbergen-den-kampf-an/>. Aufgerufen am 20.10.2015.

FIZ Karlsruhe (2016): Schicht um Schicht. Der 3D-Druck setzt sich durch – Patentanmeldungen zeigen einen klaren Aufwärtstrend. <https://www.fiz-karlsruhe.de/de/benefiz/archiv/schicht-um-schicht-der-3d-druck-setzt-sich-durch-patentanmeldungen-zeigen-einen-klaren-aufwaertstrend.html>. Aufgerufen am 13.05.2016.

Fordyce, Robbie; Heemsbergen, Luce; Mignone, Paul und Nansen, Bjorn (2015). 3D printing and university makerspaces: Surveying countercultural communities in institutional settings. In: *Digital Culture & Education*, 7:2, S. 192–2015.

Forgacs, Andras (2013): Leather and meat without killing animals? http://www.ted.com/talks/andras_forgacs_leather_and_meat_without_killing_animals?utm_campaign=&utm_content=awesm-publisher&awesm=on.ted.com_forgacs&utm_medium=on.ted.com-static&utm_source=modernmeadow.com#t-66597. Aufgerufen am 13.05.2016.

Frazier, William E. (2014): Metal additive manufacturing: a review. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23:6, S. 1917–1928.

Gao, Wei; Zhanga, Yunbo; Ramanujana, Devarajan; Ramaniam, Karthik; Chenc, Yong; Williams, Christopher B.; Wange, Charlie C.L.; C. Shina, Yung; Zhanga, Song; D. Zavattierif, Pablo (2015): The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. In: *Computer-Aided Design*, Ausgabe 69, S. 65–89.

Gershenfeld, Neil (2012): How to make almost anything. In: *Foreign Affairs*, 91:6, S. 43–57.

Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent (2015): Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. New York, NY [u.a.].

Google (2010): Zeitgeist 2010: So hat die Welt gesucht. <https://archive.google.co.kr/intl/de/press/zeitgeist2010/more-data.html>. Aufgerufen am 08.02.2017.

Gordon, Rachel; Harrop, Jon (2015): 3D Printing Materials 2015–2025: Status, Opportunities, Market Forecasts Pricing, properties and projections for materials including photopolymers, thermoplastics and metal powders. IDTechEx

Hague, Rod; Martin Harrop (2010): Comparative government and politics. New York: Palgrave Macmillan.

Hagl, Richard (2015): Das 3D-Druck-Kompendium. Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.

Harhoff, Dietmar; Schnitzer, Monika (2015): EFI Gutachten 2015. Unter Mitarbeit von Uschi Backes-Gellner, Christoph Böhringer, Dominique Foray und Ingrid Ott. Expertenkommission Forschung und Innovation. Berlin.

Huang, Runze; Matthew Riddle; Diane Graziano; Joshua Warren; Sujit Das; Sachin Nimbalkar; Joe Cresko und Eric Masanet (2015): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. In: *Journal of Cleaner Production*, 135, S. 1559–1570.

Huang, Samuel H.; Peng Liu; Abhiram Mokasdar und Liang Hou (2013): Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67:5-8, S. 1191–1203.

Huber, Joseph (2011): Allgemeine Umweltsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Kaltschmitt, Martin; Liselotte Schebek (2015): Umweltbewertung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Khajavi, Siavash H.; Partanen, Jouni; Holmström, Jan (2014): Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65:1, S. 50–63.

Kohtala, Cindy; Sampsa Hyysalo (2015): Anticipated environmental sustainability of personal fabrication. In: *Journal of Cleaner Production*, 99, S. 333-344.

Koll, Sabine (2015): Niere aus dem Drucker? Sag niemals nie. http://www.medizin-und-technik.de/home/-/article/33568401/40578835/Niere-aus-dem-Drucker-Sag-niemals-nie/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ Aufgerufen am 22.10.2015

- Kollmuss, Anja; Julian Agyeman (2002):** Mind the Gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? In: *Environmental Education Research*, 8:3, S. 239–260.
- Krämer, Andreas (2014a):** Juniper Research rechnet im Privatsektor mit 1 Million verkaufter 3D-Drucker bis 2018. <http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/marktforschung/marktstudie-juniper-research-rechnet-im-privatsektor-mit-1-million-verkaufter-3d-drucker-bis-2018-2742853.html>. Aufgerufen am 24.11.2015
- Krämer, Andreas (2014b):** Marktstudie: Markt für 3D-Drucker wächst bis 2018 um 45,7 Prozent jährlich. <http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/marktforschung/marktstudie-markt-fuer-3d-drucker-waechst-bis-2018-um-457-prozent-jaehrlich-2755633.html>. Aufgerufen am 24.11.2015.
- Krämer, Andreas (2015):** Gartner rechnet mit Verdoppelung der 3D-Drucker-Auslieferungen in 2016. <http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/marktforschung/prognose-verkaufter-3d-drucker-2016-27132213.html>. Aufgerufen am 24.11.2015.
- Krebs, Frederik C. (2009):** Fabrication and processing of polymer solar cells: a review of printing and coating techniques. In: *Solar energy materials and solar cells*, 93:4, S. 394–412.
- Kreiger, Megan; Joshua M. Pearce (2014):** Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. In: *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1:12, S. 1511–1519.
- Leichtbau BW GmbH (2016):** Neue Design-Möglichkeiten durch 3D-Druck halbieren Werkzeuggewicht bei Mapal. <https://3druck.com/pressemeldungen/neue-design-moeglichkeiten-durch-3d-druck-halbieren-werkzeuggewicht-bei-mapal-5841044/>. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- L'Oréal (2015):** L'Oréal USA Announces Research Partnership with Organovo to Develop 3-D Bioprinted Skin Tissue. <https://www.prnewswire.com/news-releases/loreal-usa-announces-research-partnership-with-organovo-to-develop-3-d-bioprinted-skin-tissue-300077535.html>. Aufgerufen am 13.05.2015.
- Liebl, Franz; Schwarz, Jan O. (2010):** Normality of the future. Trend diagnosis for strategic foresight. *Futures*, 42:4, S. 313–327.
- Lim, Sungwoo; Richard A. Buswell; Thanh T. Le; Simon A. Austin; Alistair G. F. Gibb und Tony Thorpe (2012):** Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: *Automation in construction*, 21, S. 262–268.
- Lipton, Jeffrey I.; Meredith Cutler; Franz Nigl; Dan Cohen und Hod Lipson (2015):** Additive manufacturing for the food industry. In: *Trends in Food Science & Technology*, 43:1, S. 114–123.
- Local Motors (2016):** Labs. <https://launchforth.io/localmotors/>. Aufgerufen am 11.11.2016.
- Lomas, Natasha (2014):** The 3D Printing Landfill Of Opportunity. <https://techcrunch.com/2014/04/20/plastic-problem/>. Aufgerufen am 22.10.2015.
- Loy, Jennifer; Peter Tatham (2016):** Redesigning Production Systems. In: Muthu, Senthilkannan Subramanian; Savalani, Mahesh Monica (Hrsg.): *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 1*. Singapore: Springer Singapore.
- Maastricht University (2015):** What is Cultured Meat? <https://culturedbeef.mumc.maastrichtuniversity.nl/what-cultured-meat>. Aufgerufen am 25.05.16.
- Macdonald, N. P.; Zhu, F.; Hall, C. J.; Reboud, J.; Crosier, P. S.; Patton, E. E.; Wlodkowic, D.; Cooper, J. M. (2016):** Assessment of biocompatibility of 3D printed photopolymers using zebrafish embryo toxicity assays. *Lab on a chip*, 16:2, S. 291–297.
- Magenta (2016):** Plastic Injection Molding Industry Expected to Grow by Almost 5% Annually Through 2020. <http://www.magentallc.com/news/plastic-injection-molding-industry-expected-to-grow-by-almost-5-annually-through-2020/>. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- Mani, Mahesh; Kevin W. Lyons und S. K. Gupta (2014):** Sustainability Characterization for Additive Manufacturing. In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, S. 419.
- Marquardt, Erik (2014):** Statusreport Additive Fertigungsverfahren. Unter Mitarbeit von Jürgen Ensthaler, Tobias Grimm, Benjamin Günther, Gregor Jell, Jörg Lenz, Maximilian Munsch et al. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure.

- Matthews, Chris (2016):** This Innovative West African Lab Is Turning E-Waste into 3D Printers and Robots. https://motherboard.vice.com/en_us/article/mg7bwa/upcycling-e-waste-into-3d-printers-and-robots-at-togos-woelab. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- Mattel (2016):** The ultimate 3D Printer for creative families. <http://www.thingmaker.com/printer/>. Aufgerufen am 13.05.16
- Meier, Christian (2013):** Beim Drucken entsteht Feinstaub. <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.3d-drucker-beim-drucken-entsteht-feinstaub.045a2b94-9cc9-4b6e-b73d-9176df3ebdfa.html>. Aufgerufen am 12.12.2017.
- Michler, Inga (2014):** 3-D-Druck leitet dritte industrielle Revolution ein. Welt (02.06.2014).
- Millenium Ecosystem Assessment (2005):** Ecosystems and human well-being. Synthesis. Washington, DC.
- Mitani, Tomoko; Lam, Lai-Ling (2015):** Market Share Analysis: Printers, Copiers and MFPs, Worldwide, 2014. <https://www.gartner.com/doc/3071618/market-share-analysis-printers-copiers>. Aufgerufen am 17.05.2016.
- Modern Meadow (2015):** <http://www.modernmeadow.com/#home-1>. Aufgerufen am 25.05.16.
- Mognol, Pascal; Denis Lepicart und Nicolas Perry (2006):** Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. In: Rapid proto-typing journal, 12:1, S. 26–34.
- Murphy, Sean V.; Anthony Atala (2014):** 3D bioprinting of tissues and organs. In: Nature biotechnology, Ausgabe, 32:8, 773–785.
- MX3D (2016):** MX3D Bridge. <http://mx3d.com/projects/bridge/>. Aufgerufen am 13.05.2016
- New Harvest (2015):** Cellular Agriculture. <http://www.new-harvest.org/about>. Aufgerufen am 25.05.16.
- NewsWire (2016):** Injection Molded Plastic Market Worth \$ 295.89 Billion By 2022: Grand View Research, Inc. <http://www.marketwatch.com/story/injection-molded-plastic-market-worth-29589-billion-by-2022-grand-view-research-inc-2016-04-06>. Aufgerufen am 17.05.2016.
- Nickels, Liz. (2015):** AM and aerospace: an ideal combination. In: Metal Powder Report, 70:6, S. 300–303.
- Oberti, Ilaria; Francesca Plantamura (2015):** Is 3D printed house sustainable? CISBAT 2015 – September 9-11, 2015 – Lausanne, Switzerland.
- OECD (2017):** Estimating the Environmental Impacts of Widespread 3D Printing. OECD Environment Directorate.
- Olson, Robert (2013):** A boon or a bane? In: The Environmental Forum, 30:6, S. 34-38.
- Oskamp, Stuart; P. Wesley Schultz (2005):** Attitudes and opinions. Mahwah, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Oskui, Shirin M.; Graciél Diamante; Chunyang Liao; Wei Shi; Jay Gan; Daniel Schlenk und William H. Grover (2016):** Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts. In: Environ. Sci. Technol. Lett., 3:1, S. 1–6.
- Petrovic, Vojislav; Juan Vicente Haro Gonzalez; Olga Jorda Ferrando; Javier Delgado Gordillo; Jose Ramon Blasco Puchades und Luis Portoles Grinan (2011):** Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. In: International Journal of Production Research, 49:4, S. 1061–1079.
- Petschow, Ulrich (2014):** Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0. Hg. v. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung. Berlin (Schriftenreihe des IÖW).
- Precious Plastic (2016):** Start Collaborating, Boost Plastic Recycling! <https://preciousplastic.com/>. Aufgerufen am: 12.12.2017.
- Prendeville, Sharon; Grit Hartung; Erica Purvis; Clare Brass und Ashley Hall (2016):** Makespaces: From Redis-tributed Manufacturing to a Circular Economy. In: Setchi, Rossi; Howlett, Robert J.; Liu, Ying; Peter Theobald (Hrsg.): Sustainable Design and Manufactu-ring 2016. Cham: Springer International Publishing.
- Rayna, Thierry; Ludmila Striukova (2016):** Adaptivity and Rapid Prototyping: How 3D Printing Is Changing Business Model Innova-tion. In: Van den Berg, Bibi; van der Hof, Simone; Kosta, Eleni (Hrsg.): 3D Printing: Legal, Philosophical and Economic Dimensions. The Hague: T.M.C. Asser Press.

Reeves, Phil; Chris Tuck und Richard Hague (2007): Rapid Manufacturing a Low Carbon Footprint. In: tct Magazine, 16:4, S. 45–50.

Reportlinker (2017): Global and China Injection Molding Machine Industry Report, 2017-2021. <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-and-china-injection-molding-machine-industry-report-2017-2021-300444739.html>. Aufgerufen am: 12.12.2017.

Reutter, Steve (2015): Werden Häuser bald vom 3D-Drucker gebaut? <https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article147422556/Werden-Haeuser-bald-vom-3D-Drucker-gebaut.html>. Aufgerufen am 29.05.2017.

Richter, Stephan; Wischmann, Steffen (2016): Additive Fertigungsmethoden. Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung.

Ruth, João-Pierre (2016): Shapeways CEO Calls Again for 3D Printing Revolution in Manufacturing. <http://www.xconomy.com/new-york/2016/04/12/shapeways-ceo-calls-again-for-3d-printing-revolution-in-manufacturing/#>. Aufgerufen am 13.05.2016.

Sandström, Christian G. (2016): The non-disruptive emergence of an ecosystem for 3D Printing – Insights from the hearing aid industry’s transition 1989–2008. In: Technological Forecasting and Social Change, 102, S. 160–168.

Seeger, Stefan; Jens Günster (2016, unveröffentlicht): Additive Manufacturing. Overview on Possible Emissions. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Short, D. B.; Sirinterlikci, A.; Badger, P.; Artieri, B. (2015): Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping. Rapid Prototyping Journal, 21:1, S. 105–110.

Silva, Jorge V.; Rodrigo A. Rezende (2013): Additive Manufacturing and its future impact in logistics. In: IFAC Proceedings Volumes. 46:24, S. 277–282.

Stephens, Brent; Azimi, Parham; El Orch, Zeineb; Ramos, Tiffanie (2013): Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. Atmospheric Environment, 79, S. 334–339.

stratasys Direct Manufacturing (2015): <https://web.archive.org/web/20150905105355/http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=927553>. Zuerst aufgerufen am 26.10.2015, im Web Archive archiviert am 05.09.2015 (ursprüngliche Webseite nicht mehr zugänglich).

Tang, Yunlong; Sheng Yang und Yaoyao Fiona Zhao (2016): Sustainable Design for Additive Manufacturing Through Functionality Integration and Part Consolidation. In: Muthu, Senthilkannan Subramanian; Savalani, Mahesh Monica (Hrsg.): Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 1. Singapore: Springer Singapore.

Telenko, Cassandra; Conner Seepersad, Carolyn (2012): A comparison of the energy efficiency of selective laser sintering and injection molding of nylon parts. Rapid Prototyping Journal, 18:6, S. 472–481.

Thingiverse (2016): Search Thingiverse, <http://www.thingiverse.com/search/page:2?q=spare+part&sa=>. Aufgerufen am 29.07.2016.

TRM Leipzig (2015): Künstliche Organe – Ersatzteile für den Menschen. <https://web.archive.org/web/20160824213824/http://www.mdr.de/wissen/kuenstlicheorgane130.html>. Zuerst aufgerufen am 13.05.2016, im Web Archive archiviert am 24.08.2016 (ursprüngliche Webseite nicht mehr zugänglich).

Tuomisto, Hanna L. and M. Joost Teixeira de Mattos 2011: Environmental impacts of cultured meat production. In: Environmental science & technology, 45:14, S. 6117–6123.

UBA (2014): Vereinfachte Umweltbewertungen des Umweltbundesamtes (VERUM). Texte 33/2014. Dessau-Roßlau.

UNEP (2012): GEO 5. Global Environmental Outlook. Environment for the future we want.

University of California, Riverside (2015): How Toxic Are 3D-Printed Objects? <https://www.youtube.com/watch?v=HwkFF5esAAM>. Aufgerufen am 13.05.2016

van Noort, Richard (2012): The future of dental devices is digital. In: Dental Materials, 28:1, S. 3–12.

VDMA (2016): Maschinenbau in Zahl und Bild. <https://www.vdma.org/article/-/articleview/12874852>. Aufgerufen am 17.05.16.

Wohlers, Terry (2015): Wohlers Report 2015. 3D printing and additive manufacturing state of the industry; annual worldwide progress report. Fort Collins, Colo.

Kapitel 1.2 Abgrenzung und Zielsetzung

Binoculars V von Chase Elliott Clark

<https://www.flickr.com/photos/chasblackman/8502151556/in/photolist-dXiKrW-6bnfSQ-8kNct8-6U5L3N-8kRPx5-8kNCu2-8kP1uB-SJRZHb-5ACnVR-9CWfaF-6vCtRc-6vGGpY-6vCuxg-6vCtWR-6vGFXj-6vCuq2-6vGG4Q-CbU8p3-8cN5RE-8pcL3G-pTqz9-r4WMeC-beq4u6-jie2n2-pTqym-4vLy3J-v2CGZ-36EFpg-6v6wxb-6ioWaU-dKZWNH-7wxVMw-6pzVoW-d2gwpq-atFUEM-24vEm1-v14zm-v14SD-4L1dtJ-a6fNkk-achQMj-5Rd3Tv-5Krqp-7Vkpud-beq58D-6QBZoA-beq4Yg-beq4TM-66F3sL-beq53T>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 1.3 Verwendete Methodik

Flow von Luca Mascaro

<https://www.flickr.com/photos/lucamascaro/5479506175/in/photolist-9mcUhp-9mdg2i-4xPZU7-9zWG2S-pkXWnU-byjeKB-e6ry77-56jHY6-6RfWfG-7nV4Rd-8FfgpC-4Hjrjn-5aKccq-966mP6-7VddZs-g3bH8n-g3bcfE-74djUC-6hvwER-6hvwBt-qjQXkD-9mg4Bm-g3bJ7M-9mdCaH-g3b7C2-8FfgqU-cErsEJ-93XL9w-9mgA8u-6BGW86-pS86W3-tBDF6V-g3b8Qx-9mdBAP-4GF13E-9mcVpT-6aFP5G-rmhtKr-4xHrMm-6uzTmT-9mg3Sd-89QZRG-9mdhfK-4Gd4eM-87K8RN-ppapcZ-qiDfZn-7qG1v4-p9r7xJ-pkn5Uo>

© Creative Commons CC BY-SA 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 2.1 Entwicklung

B9 Creator resin printer von mangtronix

<https://www.flickr.com/photos/mangtronix/12331560733/in/photolist-dfXSnt-jMGto6-fnDPqJ-dfXSjv-dfXUXG-dfXSeZ-dfXSgr>

© Creative Commons CC BY-SA 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 2.2 Prozesskette, Verfahren und Materialien im 3D Druck

LNF 2014 3D Drucker von www.ocg.at

https://www.flickr.com/photos/ocg_bilder/13733706125/in/photolist-mVAQmD-mVCWhw-mVARQk-mVASUz-mVASFD-eoVW34-mVB1Re-eoVWdr-epSbS9-epScuN-mVAQWr-mVB4ua-mVCVGy-mVB4YB-mVARpk-mVB4vH-mVAPtB-mVCTu7-mVCTGS-mVAQVp-mVAR6p-mVAQb8-epS9sm-mVCufq-mVARRH-mVB3ep-eoVXNH-mVB1Yt-ovkMui-eoVWRZ-eoVWzH-eYbb71-eXYE3T-rjJ3hE-eYcmQL-eXY9Ci-epTxkf-ovmdpC-eoY5fP-oMNN61-eXYfui-epTEhW-epTimq-epTV1h-epTgT9-eoX4Yr-g9kTFJ-eoXbPc-eoXQcX-eoXXmV

© Creative Commons CC BY-ND 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 2.3 Markt 3D Druck

Kein Titel von geralt

<https://pixabay.com/de/unternehmer-idee-kompetenz-vision-1340649/>

© Creative Commons CC0 1.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 2.4 Zentrale Akteure

3D Druck Treffen Nürnberg von flughafen

<https://www.flickr.com/photos/p1hde/9166239871/in/photolist-eXZnLt-pi9N8w-6bXez-p1tnP1-eh73Tw-pKEzEd-nNv8Yu-eh1j3P-v2ycph-9vQHxS-cqK7aL-9vMFoM-9vMEKD-9vQHmh-9vQGTJ-9vMEhV-cgRQuu-wKNUh4-vmZeLH-vjkGyJ-vmZjd8-u2pFHU-vjkQ3b-vmDpoH-upP4PR-v553vA-v55b9d-upDm7S-v5cT1Z-vmZqHn-upDeMh-vmZrfz-upPaog-v559c5-vjkWDS-upPTtP-vm8mwN-vmZxQD-upDqqw-upPeya-upDoSb-upP1aX-vjkQpU-v5csYv-upNZRv-vm7X4A-vmDnV2-vjkPqE-v5cpd4-vmZeRT>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.1 Abschätzung der Be- und Entlastungen

a) Direkt: Symbolbild Stromtrasse von Ralph Kuehnl
<https://www.flickr.com/photos/kirscheplotzer/19567631190/in/photolist-vP8e2y-9eyJzy-9eyHWS-hBfMBG-vP8day-w4qHq5-vPfv7z-vPfwIn-odCMtU-ov8oUZ-od5961-odCueW-odCPJB-oVyvmn-opH97V-sfyXwq-owTdYk-ov6EVY-ouVhL9>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

b) Indirekt: Hasloo Group Production Studio –
shutterstock.com

c) Innovation: Glühbirne von Butz.2013
<https://www.flickr.com/photos/61508583@N02/14419830386/in/photolist-nYepch-nYeovC-6ixMFF-e7ny1E-8AjDJs-ghFoxA-oKnBgC-9jadze-dsaPgP-n2s3vP-qVoTxH-n2s3YH-o5y2gZ-95pkwR-ducuec-h2aLPo-cRdCL-cbk78S-aqyRQU-adjA9Y-gtPriH-eCWYx-8gND7B-8gND3t-beteKD-e9pKWD-o3VU2g-n8jj8-bDtyZD-2ixQgq-byq8Tm-byq8Df-pn3m6-e18LrZ-byq8wy-aN6da-2ixQfq-4UUuj3-KgzBn-7AGNwj-nHMty3-7zDeDj-5Kmp2z-adjBb9-o3mTuo-rgW4aL-fZsico-5nqxZz-7r4Av3-dJ7mA8>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.1.1 Druckverfahren

3D printing Christmas tree von Simon Fraser University
– University Communications

<https://www.flickr.com/photos/sfupamr/15818810160/in/photolist-hBJZU9-kbSyGA-hCmNWp-hCbLEF-hCvhDL-hCBNmi-hC6Jb4-qi6CgA-dHaFzA-q6Rx9d-fbNQoA-aiJwLB-nsPGdN-dYwj4o-hBLdKg-hCtFHW-rg6VJQ-fbyzYx-eaDTLg-hBKyWm-ngqcp9-hBLwzs-hCi7SL-hC6aZS-hCmnUF-hBLKGZ-hBznUV-iBpBAC-hCBFVv-hCkGLx-hCh4CS-hBFRnq-hC2PPW-hC2Pzt-hBPAsE-hC7s1g-hC1fYs-hBLk4i-hCntW1-hBPHfD-hC5c1j-hC9Cwm-hCDpY6-hBXaU5-hBGRby-hC4N8z-hBFkS4-hCtezX-hC3YJu-hCBoXq>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.1.2 Materialien

3D printing filament von westonhighschool library
<https://www.flickr.com/photos/124105511@N08/15760663749/in/photolist-q1HweT-kM4mSg-9bsVva-egyhmq-mGyQsS-hCp1Ut-egYWzi-r7N3zj-q1HytT-hCmbJ6-hCazjj-egYWv4-hCdfL8-hC1tum-fWowRp-hCCk2p-pdFxfj-kLXudF-hC6tVG-hBENmh-hC7NbY-hBDXcX-hBZmfU-hBCgyv-hC3v5t-hBQ4qX-hC6Hio-hC1cPJ-hBXtrw-hCBr98-hCjWAH-hCoB6h-hC8wyy-hBKID6-hCAr5T-hC2foh-hCosBd-qQeXaC-hBDq7R-hBXxCz-hBLzkr-hC337G-hBR9n8-hBEf3j-hCkB5a-hBDPGM-hBN6Wz-hC51Qa-mGyBs3-hCBxCD>

© Creative Commons CC BY-SA 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.1.3 Anwendungsfelder

Recycle von Alan Levine
<https://www.flickr.com/photos/cogdog/335609090/in/photolist-vE5TC-nD9dgw-9TRC1f-qMGury-ro3Ggy-3SQQ4A-6SvJhf-dMYFD6-fniWSO-967XMH-pWrzGK-87Vwvr-a1Pdec-4R9h5W-oL15Nb-dJDD4r-6izabz-69NNKq-6iDiWA-38wB6-bEMyN5-euBWE-6GKkrE-6iza4T-5pfa6N-5K3PVV-8civta-7MnnLf-9m7XTc-9oiUCV-a3Fi6P-gspo9o-bJVAiM-EdKK3-6kwijQ-9FaHPV-wonZf-7CUHNe-4HmyjA-2oJkT-Eyu4A-fzSH1f-cnL4ju-9hJfzP-5Avouu-5PsqKT-4vuyjn-EjPwu-3dXFUc-8jYzf>

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.2.1 Erschließung neuer Nischenmärkte und Geschäftsmodelle

Kalkulation von Dennis Skley
<https://www.flickr.com/photos/dskley/14895278831/in/photolist-oGfcsG-dXrbQN-b4ip3V-rPdC9i-bnh5hQ-eiWoR2-n4kweD-sqqN6U-qCjDCd-5wgCHm-dsnbji-sswAEu-n4niR7-n4ktzF-n4kDqF-ssG9c8-ssxTfG-4KEJpe-oEM1xw-9htB2-n4kGE6-n4nfaQ-eNXnud-n4ksxv-d9MAYh-n4kJ8-n4kM3V-n4nnTL-hX3KJf-b6NXbM-4TZ1vE-7dGNhE-hDCmxX-b3MrWD-5gUCya-eNKWrH-4eQ2g9-n4k8B8-n4kKk6-z1P5zp-CHN4j1-3n373R-5CPEU9-3n37dB-FhoNhb-oijkdM-kRMEtF-kRMG9p-fpTjSt-fpTvkp>

© Creative Commons CC BY-ND 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:
Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.2.3 Wandel der Konsum- und Lebensstile

Bio- Einkaufswagen? von gravitat-OFF

<https://www.flickr.com/photos/92682792@>

N00/2650036746/in/photolist-53b8AJ-8N1HXy

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Kapitel 3.3.2 Schuhdesigner

Red/Black Shoe von tiffany terry

<https://www.flickr.com/photos/35168673@>

N03/3647355121/in/photolist-6yiDB8-3TLKu4-6wtFXi-

8NHtpe-7BHKG2-dKysET-cBJySj-4odUrS-oszvxD-

cVvTAJ-56a9wQ-7AN7tC-mShGG-c2VoH7-em4PQ3-

dp2qot-b3EVWM-6K7eMJ-8k3Ny4-bNJu4t-dYSTaF-

6z6Srf-4ErnBE-LRR79-4Enaf2-28Fy5o-ej2SAM-

a9wVM2-raxtFN-9kaFk4-nH542a-6ZJRMk-fzCYXF-

jegFgg-cJetnA-3GYtDW-9ZBvYA-3L2M7H-qyjaqJ-

8H1V6k-bDnsE4-dMyPC5-4Erwg7-4q2k2V-aE8Sc1-

61okRG-bz3nHN-csevxh-5XmY1H-nFji2U

© Creative Commons CC BY 2.0

Modifizierung des Ursprungsbildes:

Schwarz-weiß gefärbt

Seite 10 asharkyu_shutterstock

Seite 14 Alex_Traksel_shutterstock

Seite 25 smallblackcat_shutterstock

Seite 35 MarinaGrigorivna_shutterstock

Seite 39 This Is Me_shutterstock

Seite 44 stoatphoto_shutterstock

Seite 45 ClickHere_shutterstock

Seite 48 Inozemtsev Konstantin_shutterstock

Titelbild dreamnikon_iStock



► **Diese Broschüre als Download**
bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt