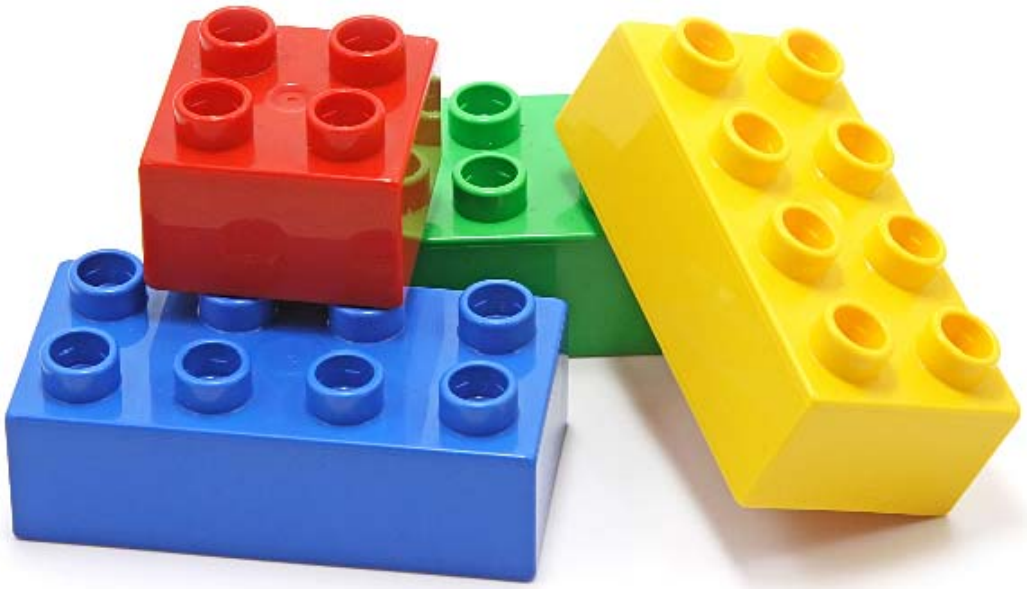
Ulrich Petschow, Jan-Peter Ferdinand, Sascha Dickel, Heike Flämig, Michael Steinfeldt, Anton Worobei

Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit

Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0

Schriftenreihe des IÖW 206/14



i | ö | w
INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Ulrich Petschow, Jan-Peter Ferdinand, Sascha Dickel, Heike Flämig, Michael Steinfeldt, Anton Worobei

Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit

Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0

Gefördert im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse (ITA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, FKZ 1611615

Schriftenreihe des IÖW 206/14
Berlin, Juli 2014

ISBN 978-3-940920-09-6

Impressum

Herausgeber:
Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
Tel. +49 – 30 – 884 594-0
Fax +49 – 30 – 882 54 39
E-mail: mailbox@ioew.de
www.ioew.de

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung von Forschung (BMBF) im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse (ITA, FKZ: 1611615). Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Auffassung und Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zusammenfassung

Im Schnittbereich aus aktuellen technologischen Entwicklungslinien und allgemeinen gesellschaftlichen Dynamiken befinden sich die Wertschöpfungssysteme derzeit in einem Wandel, der die Strukturen und Praktiken von Produktion und Konsum zusehends verändert. Vor dem Hintergrund der allgegenwärtigen Effekte einer umfassenden Digitalisierung und Vernetzung liegt das Ziel dieses Papiers darin, die Hintergründe dieses Wandels zu beschreiben und Optionen für die Gestaltung zukunftsfähiger Produktions- und Konsummuster zu diskutieren. Ausgehend von dem Befund, dass die Modi von Massenproduktion und Massenkonsum weder die sozialen, noch die ökologischen Ansprüche an zukunftsfähige Wertschöpfung wiederspiegeln, lassen sich derzeit eine Reihe weiterführender Ansätze beobachten, die entweder bestehende Wertschöpfungssysteme um neue technologische Möglichkeiten erweitern („Industrie 4.0“), beziehungsweise alternative Muster wie das „Maker Movement“ oder die Neuentdeckung des Selbermachens („Do-It-Yourself“ bzw. DIY) hervorbringen. Hinsichtlich ihres Beitrages zu einer nachhaltigen Entwicklung müssen die Wertschöpfungskonstellationen, die sich oft auch als hybride Formen von Produktion und Konsum vergegenwärtigen, jedoch differenziert bewertet werden. Einen Beitrag dazu leistet diese Arbeit, indem sie am Beispiel des potenziellen Einflusses von 3D-Druckern auf Wertschöpfungssysteme vergleichende Ökobilanzen und Logistikanalysen der daran geknüpften Produktionsmuster präsentiert und deren nachhaltigkeitsbezogene Effekte diskutiert. In einer abschließenden Betrachtung werden die Erkenntnisse der Studie zusammengefasst und Empfehlungen für eine zukunftsfähigere Gestaltung der Wertschöpfungssysteme vorgeschlagen.

Abstract

This paper deals with the ubiquitous effects of an extensive digitalization and networking and their particular impacts on established modes of production and consumption. By drawing on relevant topics at the intersection of current socio-technological dynamics, we identify prevalent trends of transformation and opportunities to strengthen the path of sustainable development in the sphere of economic value creation. In connection with decentralization as a general trajectory, the study analyses the prospective switch from globally produced, mass manufactured consumer goods to visions of a more personalized and consumer-based mode of production. Since this switch involves a broad scope of possible directions (which for instance may include visions of smart factories, small-scale factory networks, the rise of the “maker movement” or extensive practices of “do-it-yourself”), the need to distinguish related constellations in terms of their social and ecological effects appears evident. We tackle this demand by analyzing not only a variety of technological trends but also their mutual links with social, economic and ecological spheres. As a key aspect, the presented paper focuses on the technological applications of 3D-printing and evaluates their actual ecological impacts by drawing on related life-cycle assessments and logistic analysis. The final conclusion summarizes the general findings of our study and presents approaches to shape the path of a decentralized production in a more sustainable way.

Die Autorinnen und Autoren

Ulrich Petschow Leiter des Forschungsfeldes Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Kontakt: ulrich.petschow@ioew.de
Tel. +49 – 30 – 884 594-0

Jan-Peter Ferdinand Fellow am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung; Doktorand im DFG Graduiertenkolleg „Innovationsgesellschaft heute“ an der Technischen Universität Berlin
Kontakt: jan-peter.ferdinand@ioew.de
Tel. +49 – 30 – 884 594-0

Dr. Sascha Dickel Post-Doc am Friedrich Schiedel-Stiftungslehrstuhl für Wissenschaftssoziologie an der Technischen Universität München
Kontakt: sascha.dickel@tum.de
Tel. +49 – 89 – 289-28293

Logistische Analyse im Rahmen der Fallstudien zu ökologischen Effekten dezentralisierter Wertschöpfungsmuster:

Prof. Heike Flämig Professorin für Transportketten und Logistik am Institut für Verkehrsplanung und Logistik der Technischen Universität Hamburg-Harburg
Kontakt: flaemig@tuhh.de
Tel. +49 – 40 – 42878-3907

Anton Worobei Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrsplanung und Logistik der Technischen Universität Hamburg-Harburg
Kontakt: anton.worobei@tuhh.de
Tel. +49 – 40 – 42878-4431

Ökobilanzierung im Rahmen der Fallstudien zu ökologischen Effekten dezentralisierter Wertschöpfungsmuster:

Michael Steinfeldt wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Technikgestaltung und Technologieentwicklung der Universität Bremen
Kontakt: mstein@uni-bremen.de
Tel. +49 – 421 – 218-64891

Inhaltsverzeichnis

0 Einleitung 9

1 Das Ende von Massenproduktion und Massenkonsum? 10

2 Neue Wertschöpfungskonzepte zwischen unternehmenszentrierter Flexibilisierung und dezentraler „Peer Production“ 13

2.1 Unternehmenszentrierte Ansätze 14
2.2 Bottom-Up-Ansätze 14

3 Umsetzungsoptionen zukunftsfähiger Wertschöpfung 16

3.1 Intelligente Fabriken und „Industrie 4.0“ 18
3.2 Kollaborative Produktion und „Desktop Manufacturing“ 20
3.3 Zwischenfazit 24

4 Fallstudien zu ökologischen Effekten dezentralisierter Wertschöpfungsmuster unter Verwendung von 3D-Druck 25

4.1 Umweltwirkungen generativer Fertigungsverfahren: Stand der Forschung 26
4.2 Eigene Fallstudien 29
4.2.1 Fallbeispiel Handyschale 32
4.2.2 Fallbeispiel: Flugzeugersatzteil 42
4.3 Diskussion: Umweltwirkungen generativer Fertigungsprozesse 49

5 Zusammenfassung und Ausblick 51

6 Literaturverzeichnis 54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Likely features of factories of the future (Foresight 2013: 22) 17
Abb. 3.2: Visionen der Desktopfabrikation auf dem Titel des Economist, April 2012 (The Economist 2012) 22
Abb. 3.3: 3D-gedruckte Produkte auf der Verkaufsplattform Etsy (im Uhrzeigersinn): „anywordpens Custom 3D printed pen“, „3D printed personalized Free-Hand case for iPhone 5“, „Blue Random Geometry 3d Printed Ring“ (Etsy 2014).....23
Abb. 4.1: Ansatzpunkte zur Reduzierung der transportbedingten Umweltwirkungen.....30
Abb. 4.2: Grundlegende Struktur von Logistik- bzw. Güterflusssystemen (Quelle: Pfohl 2010, S. 6) 31
Abb. 4.3: Szenario 1: Massenproduktion und Szenario 2: Mass Customization .....
Abb. 4.4: Szenario 3-5: 3D-Druck .....
Abb. 4.5: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion 40
Abb. 4.6: Humantoxizitätspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion 41
Abb. 4.7: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion bei verlängerter Produktnutzungsdauer.....42
Abb. 4.8: Szenarien für das Produkt „Flugzeugersatzteil“ in Abhängigkeit der raum-zeitlichen Organisation der Transportkette .....
Abb. 4.9: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion.....47
Abb. 4.10: Einberechnung des Nutzens in der Gebrauchsphase auf die Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion.....48

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Überblick über vermeintliche Vor- bzw. Nachteile von 3D-Druck gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren 27
Tab. 4.2: Zusammenfassung ausgewählter Eigenschaften der Szenarien für die Handyschalenproduktion 37
Tab. 4.3: Logistisch relevante Ausprägungen der Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion.....45
Tab. 4.4: Rahmendaten für die betrachteten Varianten zur Herstellung eines Flugzeugersatzteils.....46

0 Einleitung

Ziel dieses Papiers ist es, im Schnittbereich aus aktuellen technologischen Entwicklungslinien und allgemeinen gesellschaftlichen Dynamiken einen tendenziellen Wandel der Wertschöpfungssysteme zu beschreiben und Optionen für die Gestaltung zukunftsfähiger Produktions- und Konsummuster zu diskutieren. Ausgehend von dem Befund, dass die Modi von Massenproduktion und Massenkonsum weder die sozialen, noch die ökologischen Ansprüche an zukunftsfähige Wertschöpfung wiederspiegeln, lassen sich derzeit eine Reihe weiterführender Ansätze beobachten, die hinsichtlich ihres Beitrages zu einer nachhaltigen Entwicklung jedoch differenziert bewertet werden müssen. Dass in der öffentlichen Debatte neuen Technologien dabei eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird, zeigt bspw. der aktuelle Hype um 3D-Drucker und die daran geknüpften Szenarien einer dezentralisierten, personalisierten Produktion. Vor dem Hintergrund der vielfältigen, teilweise auch nachhaltigkeitsbezogenen Verheißungen des 3D-Drucks rückt die vorliegende Studie diesen konkreten technologischen Ansatz in den Fokus, indem zum Beispiel Ergebnisse vergleichender Ökobilanzen und Logistikanalysen der daran geknüpften Produktionskonstellationen präsentiert werden.

Ausgehend von der Feststellung, dass die gegenwärtig dominanten Formen von Produktion und Konsumtion vor allem aus Nachhaltigkeitsgründen nicht zukunftsfähig sind, beginnt die folgende Auseinandersetzung mit der Darstellung aktueller Trends wie der umfassenden Digitalisierung und Vernetzung und bezieht diese auf ihre Konsequenzen für die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Strukturen von Produktion und Konsum. Dabei lassen sich typisierend zwei Entwicklungslinien dezentraler Wertschöpfung destillieren: Einerseits lösen die technologisch ermöglichten Dezentralisierungstendenzen die Weiterentwicklung bestehender Wertschöpfungsmuster in Richtung digital-vernetzter und flexibler Produktionssysteme aus, die mit den Logiken starrer, auf Skaleneffekte ausgerichteter Fabriken weitestgehend brechen (Kapitel 2.1). Anderseits ergeben sich auch alternative Wertschöpfungskonstellationen, die insbesondere in neuartigen Mustern wie der Maker-Bewegung oder einer kollaborativen Ökonomie zum Ausdruck kommen (siehe Kapitel 2.2). Das Spannungsfeld der entstehenden Möglichkeiten verdeutlicht sich insbesondere auch im Kontext der Aneignung und Verwendung neuer Technologien, wie beispielsweise dem 3D-Druck: auf der einen Seite können entsprechende Verfahren in professionellem Kontext Teilelement einer global vernetzten Produktion darstellen (und damit mit Blick auf die Steuerungsstrukturen keine wesentlichen Veränderungen hervorrufen, Kapitel 3.1) sowie der anderen Seite hochgradig dezentrale und von industriellen Infrastrukturen losgelöste Herstellungsmuster begründen, die gleichwohl vernetzt jedoch mit Bottom-Up-Steuerungsansätzen verbunden sind (siehe Kapitel 3.2). Inwiefern sich aus diesem Möglichkeitsspektrum Nachhaltigkeitspotenziale im Sinne weitgehender Umweltentlastungen ergeben bzw. wie die Erschließung entsprechender Potenziale ausgestaltet werden kann ist Thema der Auseinandersetzung in Kapitel 4. Darauf aufbauend fasst Kapitel 5 abschließend zusammen, dass ohne die Herausbildung und bewusste Gestaltung entsprechender Rahmenbedingungen auch potenziell umweltentlastende Innovationen keineswegs ausreichen werden, um die erforderlichen Reduktionen der Energie- und Stoffströme zu realisieren.

1 Das Ende von Massenproduktion und Massenkonsum?

Zunächst geht es jedoch um die allgemeineren sozio-technischen Trajektorien, die auf Basis des gesellschaftlichen Megatrends einer umfassenden Digitalisierung und Vernetzung verschiedenster Akteure, Prozesse und Technologien jene Dynamiken begründen, die einen Wandel der Wertschöpfungssysteme seit Beginn des 21. Jahrhunderts forcieren. Als ein Kernaspekt dieses Wandels werden im Spannungsfeld aus Produktion und Konsum die etablierten Rollen von Produzenten und Konsumenten neu verhandelt: indem Konsumenten und potenzielle Nutzer zusehends in Wertschöpfungsprozesse integriert werden, verschwimmen nicht nur die Grenzen zwischen Herstellung und Nutzung von Produkten, sondern auch die Verantwortlichkeiten entlang der Wertschöpfungskette. Somit eröffnet dieses Spektrum neuer Möglichkeiten und Konstellationen auch Potenziale für einen nachhaltigen Wandel der Produktionssysteme. Da das etablierte, auf Massenproduktion und Massenkonsum basierende fordistische Produktionsregime gravierende Nebenfolgen für die Umwelt generierte, wird mit Blick auf die Herausforderungen des Klima- und Umweltschutzes deutlich, dass die Erschließung der Transformationspotenziale von Produktions- und Konsumtionsstrukturen ein Schlüsselfaktor zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung ist.

Dass sich die Vorzeichen und Rahmenbedingungen für zukunftsfähige Wertschöpfung grundlegend verändert haben, zeigt bspw. der Umstand, dass sich die umfassende Durchsetzung von Massenproduktion und Massenkonsum in der Periode nach dem 2. Weltkrieg insbesondere auch durch die unbegrenzte Verfügbarkeit von billigem Erdöl und weitgehender Ignoranz gegenüber der infolge „abgehobenen“ Stoffströme begründet: Die an Massenproduktion geknüpfte Zentralisierung der Herstellung und die Homogenisierung der Produkte beruht im Wesentlichen auf der optimierten Ausnutzung von Skaleneffekten, wodurch einerseits die Produkte massenmarktfähig und breiten Bevölkerungsschichten zugänglich wurden, sich die ökologischen Nebeneffekte dieses Umgangs mit Ressourcen anderseits jedoch auf jenes nicht nachhaltige Niveau schraubten, das aktuell die planetaren Belastungsgrenzen zu sprengen droht (vgl. bspw. Pfister 1995; Rockström et al. 2009). Weitere, insbesondere ökonomische Gründe für den strukturellen Wandel der Wertschöpfung liegen in der Herausbildung differenzierter Nachfragestrukturen bzw. der tendenziellen Marktsättigung für standardisierte Produkte.

Darüber hinaus begründen die Effekte einer umfassenden Digitalisierung in Kombination mit der Herausbildung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien die Treiber für den Übergang von Massenproduktion zu flexibleren Produktionsformen. In der ökonomischen Literatur hat der Beitrag von Coase (1937) eine wichtige Grundlage für die Frage geliefert, weshalb überhaupt Unternehmen existieren. Coase hob in diesem Kontext der Bedeutung der Transaktionskosten hervor. Vereinfacht formuliert begründet sich die Form des Unternehmens darin, dass Innovationsaktivitäten im Unternehmen mit geringeren Transaktionskosten verbunden sind gegenüber Lösungen, die via einem individualisierten Markt erbracht werden. Transaktionskosten bestimmen demnach die Organisationsform zur Erbringung von Leistungen (auch Innovationen). Die Veränderung der Transaktionskosten führen demnach dazu, dass sich die Organisationsformen verändern. Mit den weitreichenden Veränderungen durch die Digitalisierung verringern sich die Transaktionskosten umfassend und damit u.a. zum einen die Organisationsformen und auch das Innovationsregime.

Mit Blick auf die Organisationsformen ist festzuhalten, dass die Digitalisierung eine Zerlegung von Arbeitsschritten (Modularisierung) zunehmend ermöglicht und damit Auslagerungsprozesse aus den Unternehmen verbunden sind. Damit zeichnen sich umfassende (potenzielle) Dezentralisie-

rungsprozesse auf der Basis radikal reduzierter Kommunikationskosten sowie der damit ermöglichten Integration verteilten Wissens durch „communities of peers“ ab: "Such radically decentralized, cooperative, self-organizing modes of problem solving and production are in sharp contrast to organizationally centered innovation“ (Lakhani et al. 2013: 365). Damit verlagert sich der Ort der Innovation aus „klassischen“ Organisationen heraus, ein Tatbestand, der bislang nur begrenzt zur Kenntnis genommen wurde (Redlich / Wulfsberg 2011: 5). Die wachsende Bedeutung der „combinatorial knowledge dynamics“ (Strambach / Halkier 2013) hat weitreichende Auswirkungen nicht allein für die Unternehmen sondern gerade auch für die regionalen und nationalen Innovationsregimes und damit auch für die Wirtschaftsförderung.

Ansätze eines neuen Innovationsregimes

In enger Verbindung mit der Veränderung der Organisationsformen wandelt sich damit auch tendenziell das Innovationsregime. Neue Formen der Offenheit, Kollaboration und Dezentralisierung gewinnen an Relevanz. Es entwickeln sich neue Innovationsmuster, die bestehende Organisationsmodelle und etablierte Praktiken innovativen Handelns herausfordern (Bauwens et al. 2012; Benkler 2006). Die Digitalisierung von Kommunikations- und Koordinationsprozessen ermöglicht die radikale Senkung von Transaktionskosten. Damit wird die Partizipation an Entwicklungsprozessen deutlich vereinfacht (Benkler 2006; Castells 2000). Organisationen erhalten infolge den Zugang zu verteiltem Wissen von Individuen und Gemeinschaften, was als Kernvoraussetzung die Umsetzung von Konzepten wie bspw. Open Innovation (Chesbrough) erst ermöglicht. Darüber hinaus kann sich die herausgehobene Position von kommerziellen Unternehmen in marktnahen Innovationsprozessen durch die beschriebenen Vernetzungstendenzen jedoch auch selbst relativieren – nämlich dann, wenn sich der Schwerpunkt der Innovation in Richtung dezentraler Netzwerke verlagert und dort als nicht-kommerzielles „open source“ Wissen zirkuliert (Al Ani 2013).

Gerade in Hinblick auf die skizzierte Verknüpfung von Innovations- und Produktions- bzw. Verwertungsprozessen ist zu betonen, dass dieser tendenzielle Wandel der Wertschöpfung bisher noch kein umfassendes Regime begründet, da bislang weder ein Zustand paradigmatischer Konsolidierung noch eine weitgehende Ablösung des bislang gültigen Regimes (von Massenproduktion und Massenkonsum) stattgefunden hat. Stattdessen ist das Nebeneinander konkurrierender Muster auszumachen, welche in sich als (technisch vermittelte) soziale Innovationen begriffen werden können, die das Wirtschaftsleben gegenwärtig zu verändern beginnen. Unter dem Gesichtspunkt der Transformationsforschung handelt es sich dabei um spezifische Nischen, die an den Rändern des herrschenden Produktionssystems entstanden sind und tendenziell im Konflikt zum dominanten Regime stehen. Zugleich ist ihr „Überleben“ an eine gewisse Anschlussfähigkeit zum bestehenden Produktionssystem gebunden, was sich beispielsweise an der erfolgreichen Durchsetzung von Open-Source Software erkennen lässt.

Im Kontext der Dezentralisierung eröffnet sich darüber hinaus ein vielfältiger Möglichkeitsraum für die Entwicklung neuartiger Wertschöpfungskonzepte, deren ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Potenziale in jüngerer Vergangenheit Gegenstand einer grundsätzlichen Debatte um zukunftsfähige Formen des Wirtschaftens waren. Im Rahmen dieser Debatte stellt die Aufgabe der zentralisierten Massenproduktion zugunsten kleinerer, selbstständiger und spezialisierter Einheiten vor Ort als wirtschaftliches Organisationsprinzip einen gemeinsamen Nenner dar, wobei auch die vieldiskutierten Ansätze der Nachhaltigkeitsdiskurse der 70er („small is beautiful“, vgl. Schumacher 1973), 80er („Das Ende der Massenproduktion“, vgl. Piore / Sabel 1985) und 90er Jahre („Neue Arbeit, neue Kultur“, in Deutschland“ bspw. veröffentlicht in Bergmann 2004) als ideelle Orientierungen für eine Dezentralisierung der Wirtschaft neue Relevanz erlangen. Die Relevanz neuer

Technologien gerade auch für die Ermöglichung dezentraler Prozesse und Strukturen hat Gershenfeld (2005) beschrieben (Fokus 3D-Druck und FabLabs).

Neue Relevanz von Dezentralisierungs- und Individualisierungspotenzialen

Ein aktuelles, umfassendes und durchaus einflussreiches Bild der Dezentralisierung entwirft bspw. Jeremy Rifkin in „Die dritte industrielle Revolution“ (2011), indem er nachhaltige Regionalisierung und technologisch ermöglichte Dezentralisierung eng zusammendenkt, beide Konzepte allerdings weit fasst, indem er sie beispielsweise auf Großregionen, wie Europa bezieht. Laut Rifkin, der eine industrielle Revolution als das Zusammentreffen von einer fundamentalen Innovation im Energie- und im Kommunikationssektor beschreibt, erleben wir momentan die dritte industrielle Revolution. Maßgeblich dafür sind die Verbreitung des Internets und die Entwicklung erneuerbarer Energien (Rifkin 2011: 47). Die neue Kommunikationsordnung ist dabei der Mechanismus, der „den durch neue Energiesysteme ermöglichten Aktivitätsfluss koordiniert“ (Rifkin 2011: 30), jedoch seine volle Wirkung in Zeiten des zentralen Kapitalismus noch nicht voll entfalten kann.

Eine stärker nutzer/innenzentrierte Perspektive auf den dezentralen Kapitalismus als emergierendes Phänomen bietet der Zugang Shoshana Zuboffs (Zuboff 2010). Sie betrachtet, auf welche Art und Weise sich Produktionsweisen dadurch verändern, dass die individuellen Bedürfnisse mit den Strickmustern der Massenproduktion brechen. Laut Zuboff werden Unternehmensmodelle, die auf den Faktoren Kapitalkonzentration, Zentralisierung und Skaleneffekte basieren, womöglich bald abgelöst. Der Niedergang des Systems der Massenproduktion sei bereits durch vielfältige soziale Sollbruchstellen sichtbar, wenngleich Unternehmen diesen Niedergang gegenwärtig noch durch inkrementelle Innovationen aufzuhalten versuchen. Auch Zuboff sieht das kapitalistische Wirtschaftssystem im Übergang zum „Distributed Capitalism“, welcher die diversen Weisen beschreibt, in denen Produktion wie Konsum zunehmend von „distributed assets, distributed information, and distributed social and management systems“ (Zuboff 2010: 5) abhängig sind.

In der Akzentuierung Zuboffs geht die Dezentralisierung dabei von den Individuen selbst aus, die nunmehr die Quelle ökonomischer Werte sind, da diese bereit sind, für Dinge zu zahlen, die helfen, das eigene Leben effektiv zu gestalten. Konsumiert werden eher „tools and relationships enabled by interactive technologies“ (Zuboff 2010: 3) statt Güter und Dienstleistungen, was eine „Mutation“ des Kapitalismus selbst anzeigt und damit weit über eine systemimmanente Innovation hinausgeht und zunehmend digitale mit stofflichen Dynamiken verbindet. Diese neue Struktur verkleinert nicht nur die räumlichen Dimensionen, sondern jeden Aspekt des sozialen Lebens. Die Beziehung zwischen Lieferant/in und Verbraucher/in könne in dezentralen Wertschöpfungsformen geprägt sein von Vertrauen, Transparenz und einem gemeinsamen Interesse.

Sowohl die stark dezentrale, nutzer/innenorientierte Entwicklung der Ökonomie in Zuboffs Perspektive, als auch die technologisch ermöglichte Dezentralisierung in Rifkins Entwurf einer dritten industriellen Revolution konstatieren weniger konkrete Road-Maps als vielmehr programmatische Leitbilder für die Gestaltung zukunftsfähiger Wirtschaftsmuster. Die Auseinandersetzung mit diesen Leitbildern verdeutlicht jedoch, inwiefern die skizzierten technologische Trends und Dynamiken gesellschaftlichen Wandels zukünftige Wertschöpfungsmuster beeinflussen und verändern können. Dass diese Veränderungen insbesondere auch eine nachhaltige Entwicklung adressieren können, zeigt sich insbesondere in der Verknüpfung beider Perspektiven: Indem Rifkin auf die ökologischen Vorteile nachhaltiger Regionalisierung durch die systemische Nutzung dezentraler Technologien verweist und Zuboff jene Bottom-Up-Strukturen in den Fokus rückt, die eine Aggregation subjektiver Werte und lokaler Praktiken zu systemischen Orientierungen eines verteilten Kapitalismus er-

möglichen, zeigt sich, dass insbesondere die Verschränkung dieser Ebenen das Potenzial der Diffusion nachhaltiger Graswurzelinnovationen impliziert (Smith / Seyfangl 2013).

Beide Aspekte bilden den Gegenstand der folgenden Kapitel, in denen verschiedene Umsetzungsoptionen vermeintlich zukunftsfähiger Wertschöpfung im Kontext der damit assoziierten Produktionssysteme diskutiert und hinsichtlich ihrer ökologischen Effekte bewertet werden. Die heuristische Unterscheidung, die dieser Betrachtung zu Grunde liegt, findet einen Eckpunkt in der Vision Bottom-Up-koordinierter „Peer Communities“, die Wertschöpfungsprozesse außerhalb etablierter Produktionsformen umsetzen. Kontrastierend dazu unterscheiden wir auf der anderen Seite Konstellationen, in denen sich die Logiken bestehender Wertschöpfungsmuster im Prinzip fortschreiben, deren Umsetzungsoptionen sich durch den Einfluss neuer Technologien jedoch entscheidend erweitern (Typisierend: Industrie 4.0). Obwohl sich diese kontrastierende Perspektive mehr oder weniger stark durch die nachfolgenden Analysen zieht, soll sie nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich zwischen den beschriebenen Eckpunkten ein Möglichkeitsraum für hybride Wertschöpfungsmuster herausbildet, indem Aspekte beider Ansätze durchaus miteinander verknüpft werden können. Bereits Zuboff hat darauf hingewiesen, dass sich das digitale Zeitalter durch ein eigentümliches Spannungsverhältnis von Dezentralität und Zentralität auszeichnet. Technologien, die potenziell eine Dezentralität befördern können ermöglichen sogleich Zentralisierungstendenzen – dies lässt sich an der Herausbildung großen marktbeherrschenden Unternehmen im IT- und Social-Media-Bereich ablesen. Dies bedeutet für die weiteren Ausführungen, dass es um Erschließung von Möglichkeitsräumen geht: zwischen der Weiterverfolgung des bestehenden eher zentralisierten Pfades oder einem alternativen Pfad, der die technologisch prinzipiell möglichen Dezentralisierungspotentiale sozial und ökonomisch ausreizt.

2 Neue Wertschöpfungskonzepte zwischen unternehmenszentrierter Flexibilisierung und dezentraler „Peer Production“

Vor dem Hintergrund der zuvor skizzierten, programmatischen Leitbilder lassen sich konkretere Umsetzungsoptionen neuer Wertschöpfungsmodi typisierend einerseits in unternehmenszentrierte Top-Down-Ansätze und andererseits in gemeinschaftszentrierte Bottom-Up-Ansätze unterteilen. Unternehmenszentrierte Ansätze einer flexibilisierten Wertschöpfung verändern zwar die klassischen Muster von Produktion und Konsum, belassen aber die Kontrolle über die Wertschöpfung letztlich den Unternehmen, die Produktionsabläufe auf Basis digitaler Technologien zusehends adaptiver und offen für kundenindividuelle Präferenzen gestalten. Im Kontrast dazu entwerfen gemeinschaftsbasierte Ansätze eine grundsätzliche Alternative zum bisherigen Produzent/innen-Konsument/innen-Modell, indem sie sowohl die Verantwortung über die Produktion, als auch das schöpferische Momentum der Produktgestaltung in die Hände potenzieller Nutzer bzw. Nutzergruppen verlagern und somit als Wegbereiter einer radikal dezentralisierten Bottom-Up-Ökonomie betrachtet werden können (Bauwens et al. 2012: 47ff.). Zwar spielen Technologien zur Digitalisierung von Produktion und Vernetzung von Akteuren auch in diesem Zusammenhang eine wegbereitende Rolle, allerdings lassen sich die daran geknüpften Nutzungskontexte deutlich von jenen industrieller Anwendungen unterscheiden. Im Folgenden geht es darum, die analytischen Eckpunkte des Spektrums neuer Wertschöpfungsprozesse näher zu erläutern, bevor die damit assoziierten Produktionsmuster in den Fokus der Betrachtung gerückt werden (Kapitel 3).

2.1 Unternehmenszentrierte Ansätze

Sinnbildlich für den Typus unternehmenszentrierter Top-Down Ansätze stehen Strategien der so genannten „Mass Customization“, die im ausgehenden 20. Jahrhundert noch weitestgehend konzeptioneller Natur waren, in jüngerer Vergangenheit durch stetige technologische Weiterentwicklungen (insbesondere im Bereich Information und Kommunikation) in den Geschäftsmodellen von produzierenden Unternehmen jedoch sehr konkret werden (Kumar 2008: 535; Piller / Ihl 2013). Mass Customization beschreibt dabei die Umsetzung flexibler Herstellungsprozesse sowie die graduelle Öffnung selbiger für kundenindividuelle Präferenzen, die einerseits eine prinzipiell große Bandbreite an Produkten effizient fertigen können und andererseits gewisse Freiheitsgrade für spezifische Produktanpassungen gewährleisten. Hierzu ist es wichtig, Wertschöpfungsprozesse auch in Anbetracht hoher Flexibilitätsanforderungen robust zu gestalten (Salvador et al. 2009), beispielsweise durch modulare Produktarchitekturen (um Größenvorteile zumindest auf Ebene standardisierter Produktmodule zu realisieren) oder die Umsetzung von Postponement-Strategien (d.h. das Aufschieben einer kundenindividuellen Montage dieser Produktmodule). Die Ambition, Standardprodukte auf die spezifische Nachfrage verschiedener Kundengruppen anzupassen, spitzt sich gegenwärtig dahingehend zu, dass sich die Zielgrößen aktuellerer Ansätze zunehmend auf die „markets of one“ (Gilmore / Pine 2000) fokussieren. In der Tat führen die technologischen Möglichkeiten der individuellen Produktanpassung dazu, dass es zumindest in Teilbereichen (Mode, Design im Allgemeinen, IT usw.) zu einer Personalisierung des Angebots an Konsumgütern kommt. Da auch die Personalisierung der Angebote auf Basis flexibler Kommunikations-, Produktions- und Logistiksysteme für Unternehmen effizient umsetzbar wird und insofern auch breitere Märkte erschließen kann, identifizieren einige Autoren bereits einen Wandel von der „Mass Customization“ hin zu einer „Mass Personalization“ (vgl. Kumar 2008).

Marktseitig impliziert dies eine Kundenintegration in die Produktentstehung und -spezifikation. Unternehmen müssen hier eine geeignete Infrastruktur für die Interaktion mit Kund/innen bereitstellen, um sie erfolgreich durch den Prozess der Produktindividualisierung zu führen. Vorherrschend sind hier so genannte Produktkonfiguratoren, also internetbasierte Werkzeuge, die Kund/innen ermöglichen, das Produkt ihrer Wahl ortsunabhängig über die Webseite des anbietenden Unternehmens zu spezifizieren. Durch einen intensivierten Austausch zwischen Hersteller/innen und Kund/innen in Produktentstehungsprozessen soll eine hohe Identifikation mit dem hergestellten Gut sowie ein hoher Wertzuwachs durch weitgehende kundenspezifische Anpassung realisiert werden. Konzepte zur Umsetzung von Mass Customization basieren folglich derzeit insbesondere auf IKT-basierter Flexibilisierung der Produktionsprozesse sowie dem digital vermittelten Informationsaustausch zwischen Produzenten und Konsumenten, was die prinzipielle Logik einer zentralen Produktion jedoch weitestgehend aufrecht erhält, in Teilbereichen aber auch zu einer Verlagerung die Produktion zum Kunden hin gedacht werden und hybride Formen annehmen kann.

2.2 Bottom-Up-Ansätze

Im Gegensatz dazu fokussieren gemeinschaftszentrierte Bottom-Up-Ansätze dezentrale Wertschöpfungsmuster, wobei sich Dezentralität in diesem Kontext sowohl auf räumliche Dimension (im Sinne einer Regionalisierung) als auch auf die Konstellationen beteiligter Akteure (Personalisierung, die sich u. U. zu einer „Demokratisierung“ aggregiert) bezieht. Ebenfalls flankiert von zunehmend flexibleren Produktionstechnologien sowie den Rollenverschiebungen von Produzent/innen und Konsument/innen wurden daraus entstehende Freiräume in jüngerer Vergangenheit auch durch Akteure erschlossen, die zuvor nicht über die Möglichkeiten zur eigenverantwortlichen Her-

stellung von Konsumgütern verfügten. Gegenwärtig führen diese Tendenzen bspw. zu der Herausbildung des so genannten „Maker Movements“ in dessen Rahmen sich Akteure neue Technologien aneignen, alternative Modi dezentraler und personalisierter Produktion erschließen und Herstellungsparadigmen des „Do-it-yourself“ (DIY) bzw. „Do-it-with-others“ (DIWO) etablieren.

Als übergreifendes Konzept für die skizzierten „Maker“, „DIY“, oder „DIWO“ Phänomene hat sich die Bezeichnung der „Peer Production“ etabliert. Im Vergleich zur unternehmenszentrierten Erweiterung kundenindividueller Gestaltungsmöglichkeiten kennzeichnet das Konzepte der Peer Production einen noch deutlicheren Schritt in Richtung personalisierter und dezentraler Wertschöpfung, da diese nicht auf einzelne, kommerzielle Unternehmen zurückzuführen ist, sondern auf der gemeinschaftsbasierten Koordination einer heterogenen „Peer Group“ aus beteiligten Akteuren gründet. Damit geht einher, dass sich die Wertschöpfungsprozesse zumeist in einem nicht-kommerziellen Umfeld vollziehen und entsprechende Outputs auf keine eindeutigen Besitz- oder Verwertungsursprünge zurückzuführen sind. Demzufolge bilden die hohe Bedeutung von freier Zirkulation von relevantem Wissen (das neudeutsch auch als „knowledge Commons“ bezeichnet wird, (vgl. Helfrich 2012) sowie offene und inkludierende Partizipationsmöglichkeiten zentrale Eigenschaften bei der Umsetzung von Peer Production: „Projekte haben ein gemeinsames Ziel, und alle Teilnehmenden tragen auf die eine oder andere Weise zu diesem Ziel bei, weil sie die Ziele des Projekts teilen, weil sie genießen, was sie tun, oder weil sie der Community etwas zurückgeben wollen. Bei marktwirtschaftlichen Aktivitäten wird dagegen getauscht, meist eine Ware gegen Geld.“ (Siefkes 2012: 350). In ähnlicher Weise beschreiben auch Baldwin und von Hippel (2010) die entstehenden Kooperationsmöglichkeiten wie folgt: "An open collaborative innovation project involves contributors who share the work of generating a design and also reveal the outputs from their individual and collective design efforts openly for anyone to use" (ebd.). Daraus wird deutlich, dass der rein marktorientierte Austausch mit entsprechenden Ansätzen überwunden und zumindest eine Form der vertieften sozialen Einbettung ergänzt wird. Obwohl die Autoren Peer Production hier zunächst noch primär auf die gemeinschaftliche Entwicklung von Open Source Software beziehen, zeichnet sich durch den niedrigschwelligen Zugang zu Designsoftware (google SketchUp, Blender etc.) sowie Produktionshardware (u. a. generative Fertigung wie 3D-Drucken) aktuell auch im Kontext der Entwicklung und Herstellung physischer Produkte die zunehmende Relevanz der beschriebenen Konzepte ab – wir werden unten darauf zurückkommen. Analog zu frei zugänglichen Quellcodes und wegfallenden Restriktionen zum Kopieren und Nutzen im Bereich der Open Source Software kennzeichnet sich die Offenheit im Zusammenhang der kollaborativen Entwicklung materieller Produkte in der Veröffentlichung von Objektspezifikationen, Konstruktionsplänen, Materiallisten, verwendeten Designs usw.

Indem Peer Production die Potenziale neuer Technologien aufgreift und diverse Prinzipien moderner Organisations- und Koordinationsmuster vereint, wird ihr aktuell ein durchaus disruptives Potenzial zugesprochen (Benkler 2006; Economist 2012; Strangler / Maxwell 2012). In der Tat lassen sich vielfältige Möglichkeiten der Veränderung von Wertschöpfungsketten und einer ressourcenschonenderen Gestaltung von Produkten identifizieren (Dickel 2013). Einen Treiber dafür bildet der bereits erwähnte Aspekt, dass sich die Bottom-Up-koordinierten Transaktionen nicht allein an den Logiken des Marktes orientieren, sondern auf einer erweiterten sozialen Ebene auch die Werte und Ansichten der daran beteiligten Akteure inkludieren. In dieser Hinsicht haben Nachhaltigkeit, Kollaboration und Sozialverträglichkeit wichtige Orientierungsfunktionen. Vor dem Hintergrund der Annahme, dass kollaborative Produktion als grassroots innovation weiter an Relevanz gewinnen wird, ist es dringend erforderlich, zu prüfen, inwiefern die daran geknüpften Ansätze und Potenziale für das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung genutzt werden können (Aachener Stiftung Kathy Beys 2012; Smith et al. 2013). Einen Beitrag dazu soll das vorliegende Papier liefern, indem es zunächst die mit zukunftsfähiger Wertschöpfung assoziierten Produktionsmuster kontrastierend darstellt

(Kapitel 3), bevor deren ökologische Effekte anhand der Ergebnisse konkreter Fallstudien diskutiert werden (Kapitel 4).

3 Umsetzungsoptionen zukunftsfähiger Wertschöpfung

Wie die vorherige Auseinandersetzung gezeigt hat, ist der Fokus auf Nachhaltigkeit in unterschiedlichen Schärfegraden in den Ansätzen dezentraler Wertschöpfung durchaus angelegt. Daran anschließende Annahmen legen bspw. nahe, dass sich durch Dezentralisierung signifikante Einsparungen in der Logistikkette (einschl. Lagerhaltung) erreichen lassen. Die positiven ökologischen Effekte dezentralisierter Produktionsstätten entfalten sich dabei zusätzlich, wenn auf effektivere und ressourcenschonende Herstellungsverfahren zurückgegriffen wird, die dazu auch noch individuell auf die Nachfrage der Konsument/innen vor Ort ausgerichtet werden können und die Gefahr der Überproduktion eindämmen. Wie allerdings bereits hier deutlich wird, sind die Vorrausetzungen für eine nachhaltigere dezentralisierte Produktion vorbedingungsvoll und nicht per se gegeben.

Die Auseinandersetzung mit der Nachhaltigkeit von Wertschöpfungsmustern bettet sich in das über die letzten Jahre allgemein gestiegene Interesse an der Industrie und entsprechenden Produktionstechnologien ein. Dieser Befund ist einerseits durch die wirtschaftspolitische Einsicht begründet, die Bedeutung der Produktion für Innovation und die daran geknüpften Dienstleistungen wieder in einem engen Zusammenhang wahrzunehmen. Darüber hinaus werden andererseits insbesondere in den USA und dem Vereinigten Königreich Fragen des Reshoring (im Sinne umgekehrter Offshoring -Prozesse) diskutiert, die u. a. als Reaktion auf eine Nivellierung der Lohnunterschiede verstanden werden und vor dem Hintergrund sinkender Transaktions- und (zumindest für den Fall der USA) Energiekosten als realistische Option gehandelt werden. Neben diesen grundsätzlich zu beobachtenden Trends werden eine Reihe von veränderten Rahmenbedingungen für die Produktion der Zukunft diskutiert, die bereits in der Einleitung dieses Textes in Eckpunkten skizziert worden sind (u.a. Digitalisierung, Konsumwandel). Mithin wird ein erweiterter Möglichkeitsraum eröffnet, der nicht allein im Sinne der Nachhaltigkeit sondern auch der Wettbewerbsfähigkeit überhaupt erst erschlossen werden muss. Im Kontext der Orientierung für Anknüpfungspunkte der Wirtschaftspolitik und -förderung hat das britische Government Office of Science (Foresight 2013) die zentralen Veränderungsdynamiken folgendermaßen zusammen gefasst:

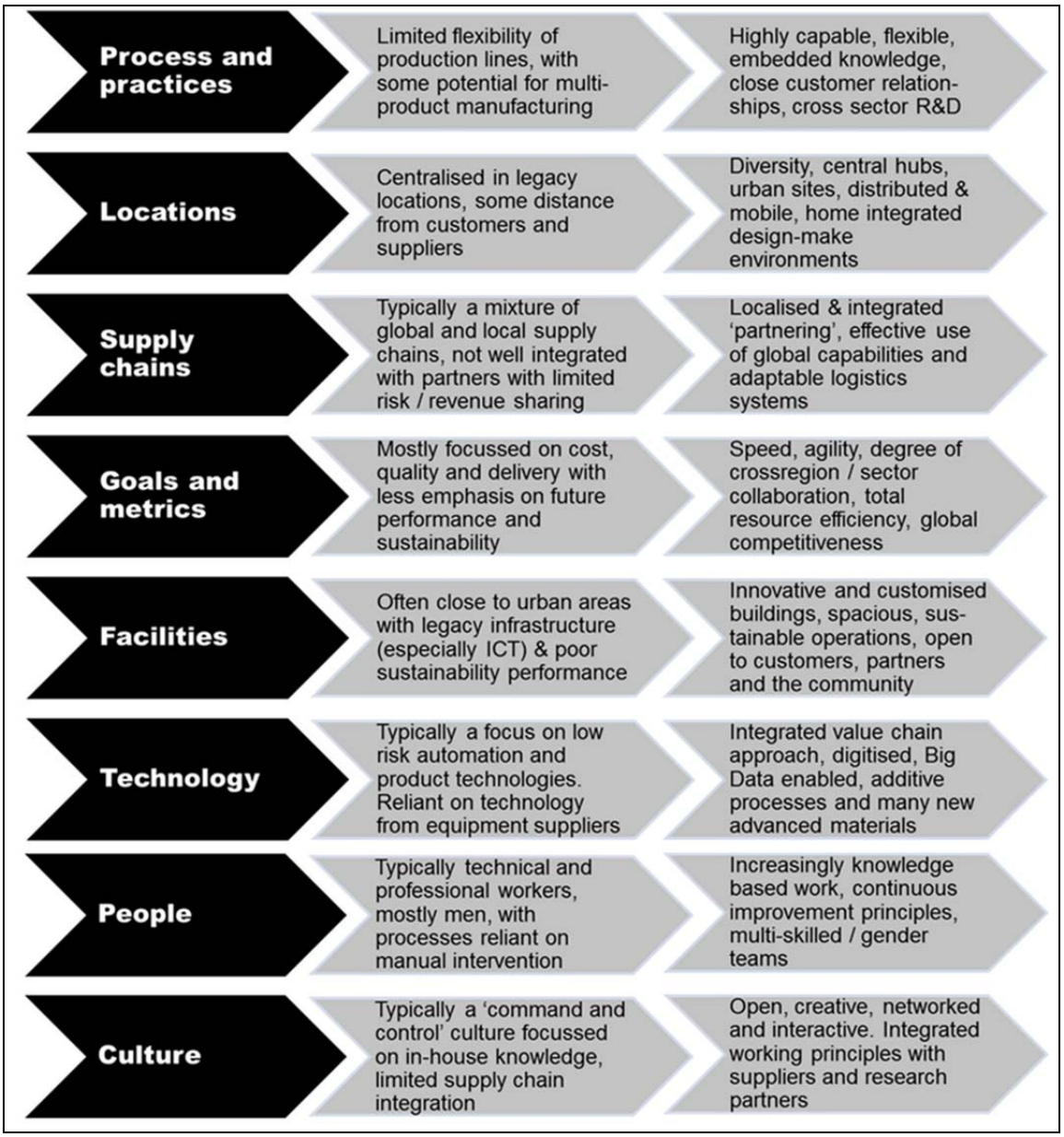


Abb. 3.1: Likely features of factories of the future (Foresight 2013: 22)

Die Abbildung differenziert die Entwicklungsdynamiken in acht Kategorien, die verschiedene materielle und immaterielle Aspekte zukünftiger Produktionssysteme abbilden. Die Dynamiken bewegen sich generell von geschlosseneren zu offeneren Systemen, von zentralisierten zu dezentralisierten Einheiten, von der Kostenorientierung zu breiteren Ansätzen der Bedarfsdeckung aber auch zu einer stärkeren Orientierung auf die Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit. Mit Blick auf die Veränderung der Entwicklungsrichtungen wird deutlich, dass das bestehende Produktions- und Konsumtionssystem vor weitreichenden Herausforderungen steht, um die vielfältigen neue Kombinationen von Produktion und Konsumtion auszuloten und auch im Sinne der Nachhaltigkeit zu erschließen. Ausgehend von der Kontingenz des daraus resultierenden Möglichkeitsraumes, wird in diesem Zusammenhang entscheidend sein, inwieweit die Herausforderungen einer sozial-ökologischen Transformationen handlungsrelevant und Gestaltungsfreiräume entsprechend ge-

nutzt werden. Mit anderen Worten stellt sich also die Frage, wie das transformative Potenzial für die Nachhaltigkeit erschlossen werden kann.

Neben einem umfassenden gesellschaftlichen Wertewandel oder nachhaltigkeitsorientierten Reflektion von Konsumpraktiken, bildet der Wandel von Produktionsstrukturen eine zentrale Voraussetzung für die Realisierbarkeit solcher Verheißungen. Neue technologische Möglichkeiten bilden einen wesentlichen Treiber für diesen Wandel, akzentuieren jedoch entsprechend ihrer Einbettung in unterschiedliche Nutzungskontexte (in Fabriken, zu Hause, als Werkzeug, als Plattform etc.) Verschiedene Gestaltungsoptionen und Aspekte der Flexibilisierung, Dezentralisierung und Personalisierung von Produktion. Entsprechend des in Kapitel 2 eingeführten Kontrastes zwischen eher professionell/unternehmenszentrierten (typisierend: Industrie 4.0) und dezentral/gemeinschaftsbasierten Konstellationen (typisierend: kollaborative Produktion) lassen sich auch bezüglich der Produktionsstrukturen bzw. -systeme zwei idealtypische Pfade unterscheiden: einerseits geht es dabei um die inkrementelle Weiterentwicklung bestehender industrieller Konzepte durch die Möglichkeiten neuer Technologien (Kapitel 4.1), anderseits lassen sich alternative Muster nicht-industrieller Produktion identifizieren, die die Idee der Peer Production um konkrete Umsetzungsansätze ergänzen (Kapitel 4.2).

3.1 Intelligente Fabriken und „Industrie 4.0“

Auf der Seite professioneller, unternehmenszentrierter Produktionsmuster stellt Forschung und Entwicklung im Bereich intelligenter Fabriken derzeit einen Trend dar, der die Möglichkeiten digitaler Technologien direkt auf den Anwendungsbereich der Herstellung materieller Güter bezieht. Die umfassende Digitalisierung und Vernetzung von Produktionsabläufen wird als Schlüssel dafür gesehen, den kontingenten Anforderungen sich dynamisierender Produktionsumwelten gerecht zu werden. Die Kontingenz innerhalb des Produktionsumfeldes resultiert dabei aus den allgegenwärtigen Herausforderungen an das verarbeitende Gewerbe, das sich aktuell und zukünftig nicht allein an Effizienzparametern messen lassen wird, sondern in gleicher Weise auch Anforderungen an nachhaltiges Wirtschaften, sich verändernden Nachfragestrukturen sowie komplexer werdenden Interaktionsmustern entsprechen muss. Die Kombination dieser Aspekte gilt dabei als zentraler Erfolgsfaktor für den globalen Wettbewerb, weswegen aktuell insbesondere auch politische Förderinitiativen wie beispielsweise das europäische „Manufuture“ Programm, die US amerikanischen Forschungsrichtlinien zu „Advanced Manufacturing“ oder die deutsche Forschungsplattform zur „Industrie 4.0“ darauf ausgerichtete Forschungs- und Entwicklungsprojekte ausschreiben und unterstützen. In Deutschland wird dieser Diskurs unter dem Begriff „Industrie 4.0“ geführt (vgl. Acatech 2013). Auch darin wird die Vision von einer zukünftigen Industrie als Teil einer vernetzten, intelligenten Welt entwickelt, in der smarte Fabriken als Ausdruck einer „vierten industriellen Revolution“ nach den Umbrüchen durch Mechanisierung, Elektrifizierung und Informatisierung als vielfältig vernetzte Knoten in digital koordinierten Produktionsnetzwerken die nächste Entwicklungsstufe industrieller Herstellung beschreiben.

Die Grundidee der „Smart Factories“ besteht dabei in der umfassenden Einbettung von Produktionsmaschinen in eine übergreifende Softwarearchitektur. Auf dieser Basis soll eine vollständige Vernetzung von Teilen, Maschinen, Beschäftigten und Kund/innen realisiert, sowie kürzere Reaktionszeiten der industriellen Produktion umgesetzt werden. Obwohl der Pfad der Verschmelzung von Produktions- und Informationstechnologien wie zuvor beschrieben bereits eine mehr als 30-jährige Geschichte aufweist, besteht der qualitative Sprung der Smart Factories in der vollständigen Integration bestehender Insellösungen in offene „Cyber-Physische-Systeme“ (CPS), die nicht nur die fabrikinternen Herstellungsprozesse koordinieren, sondern ebenfalls die Einbindung der Fabriken

in globale Wertschöpfungsnetzwerke strukturieren (vgl. Broy 2010). Allgemein definiert als „physical and engineered systems whose operations are monitored, coordinated, controlles, and integrated by a computing and coordination core" (Rajkumar et al. 2010) bezieht sich das Potenzial von CPS im Produktionskontext insbesondere auf die Verknüpfung vielfältiger Komponenten verschiedener Hersteller/innen, die auf Basis dieser Vernetzung in der Lage sind, kontextbezogene Aufgaben selbstorganisiert zu übernehmen und autark zu arbeiten. Dieser homogene Regelungsansatz ermöglicht es ferner, Produktionssysteme adaptiv und situativ an jeweilige Produktionsbedarfe anzupassen, kurzfristig zu variieren und Fertigungsprozesse entsprechend flexibel zu gestalten.

Die Produktionslogiken von Smart Factories verändern sich durch den umfassenden Informationsaustausch, u.a. ermöglicht durch intelligente Maschinen und Produkte auf den unterschiedlichen Ebenen des Produktlebenszyklus. Die betriebswirtschaftlichen Betrachtungen und Steuerungen und das Engineering erfolgen kontinuierlich über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Das Produktionssystem soll im Rahmen der Industrie 4.0 damit so flexibel und adaptiv werden, dass die Smart Factory auf individuelle Kundenwünsche eingehen kann. Um Einzelstücke rentabel produzieren zu können, wird der verstärkte Einsatz von neuen Produktionstechnologien wie bspw. generativen Verfahren (Stichwort „3D-Druck", siehe auch folgende Kapitel) mittelfristig erwartbar sowie die Herausbildung neuer Geschäftsmodelle wahrscheinlich, wobei die neuen Technologien durchaus auch in die bestehenden Produktions- und Wertschöpfungssysteme eingebettet werden können. Der etablierten Logik kommerzieller Wertschöpfung folgend, sollen sich Ressourcenproduktivität und -effizienz in diesem Zusammenhang „fortlaufend und über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk hinweg verbessern" (Acatech 2013: 5). Ebenso soll die Arbeitswelt durch eine flexiblere Organisation und Work-Life Balance verbessert werden. Zusammengefasst sind drei zentrale Kernpunkte des Entwicklungsprozesses zu Industrie 4.0 (Acatech 2013: 6):

– Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke
– Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme und
– Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus

Obwohl einzelne Komponenten für CPS aktuell bereits Anwendung finden und kontextsensitive, kommunikationsfähige Maschinen mitunter schon in Fabrikinfrastrukturen integriert werden, fungiert das Gesamtkonzept der Smart Factories heute noch eher als Leitbild für Forschung und Entwicklung sowie als Orientierung für darauf ausgerichtete, innovationspolitische Förderaktivitäten. Gegenstand dieser Vision sind intelligente Fabriken, die Komplexität beherrschen, weniger störanfällig sind und die Effizienz der Produktion erhöhen (Acatech 2013). Den aktuellen Stand der Entwicklung bewertet beispielsweise Schreiber (2013: 2) noch zurückhaltend: Obwohl die Forschung im Kontext der Industrie 4.0 bereits auf zwei Jahrzehnte zurück blickt, ist der entscheidende Sprung von der Forschung in die Praxis bisher ausgeblieben." So konnten nach Auffassung des Autors „die starken Vorbehalte[n] gegenüber dezentralen, im Speziellen autonomen Entscheidungsträgern nahe an der Prozessebene nicht ausgeräumt werden". Obwohl sich die Potenziale intelligenter Fabriken in einigen exemplarischen Anwendungsbeispielen bereits nachweisen ließen, basieren diese meist auf Simulationsstudien oder Untersuchungen an Laboranlagen von geringer Komplexität, weswegen die Generalisierbarkeit aktuell noch infrage gestellt werden muss.

Grundsätzlich zeigt die Auseinandersetzung mit allgemeinen konzeptionellen Überlegungen zur Flexibilisierung der Produktion durch „intelligente" Koordinationsmustern und Smart Factories, dass die Zukunft digital vernetzter Produktion noch vor erheblichen Herausforderungen steht und sich vor allem die weitgehende Vernetzung und dezentrale Steuerung über die unterschiedlichen Ebe-

nen der Wertschöpfungsketten hinweg noch am Anfang befindet. Neben den technologischen Herausforderungen sollten bei der Weiterentwicklung des Konzepts auch nicht-technische Fragestellungen hinsichtlich kultureller Praktiken aber auch der Dimension von Macht adressiert werden, da diese die Umsetzung von Produktion ebenfalls entscheidend beeinflussen.

Gerade unter Verweis auf Strategien wie „Mass Customization“ (siehe Kap. 2), die die Verwertungslogik von Massenproduktion und -konsum unter Nutzung neuer Technologien an die Anforderungen adaptiver, flexibler und personalisierter Märkte anpassen, scheinen auch die hier beschriebenen Gestaltungsansätze und Entwicklungsoptionen jene Informatisierungs- und Automatisierungstendenzen fortzuschreiben, die sich im Kontext postindustrieller Produktion seit Jahrzehnten etabliert haben. Entsprechend dieser sich selbstverstärkenden Ausrichtung des Entwicklungspfades beziehen sich auch die Ziele der beschrieben Forschungs- und Entwicklungsambitionen in den jeweiligen Ländern primär auf die Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit. Perspektivisch gehen die mittel- und westeuropäischen sowie nordamerikanischen Staaten davon aus, dass die hohe Qualität ihrer Produktionssysteme insbesondere in hochwertigen Industriesektoren vor allem durch deren Flexibilisierung gehalten werden kann. In der adaptiven Anpassung an individuelle Kundenwünsche oder sich verändernde Nachfragestrukturen sowie der Gestaltung resilienter Wertschöpfungsnetze, die situativ auf komplexe und kontingente Rahmenbedingungen reagieren können, wird der Schlüssel zukunftsfähiger Produktionssysteme gesehen. Vor dem Hintergrund der Verschiebung der industriebezogenen Welthandelsanteile im ostasiatischen Raum, die sich in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere für die traditionellen Industrienationen Europas und Nordamerikas als durchaus problematisch darstellt hat, lässt sich die übergreifende Vision digital-vernetzter Produktionssysteme jedoch nicht nur in der Sicherung der aktuellen Situation, sondern in einer Reindustrialisierung dieser Regionen vermuten. Aspekte der Nachhaltigkeit und ökologischen Effekte der emergierenden Produktionssysteme bilden in der aktuellen politischen und wissenschaftlichen Diskussion eher eine Randnotiz, die vor allem in Dimensionen der Effizienzsteigerung (Energie, Material) diskutiert wird.

3.2 Kollaborative Produktion und „Desktop Manufacturing“

Darf der transformative Charakter einer digital-vernetzten Produktion zumindest angezweifelt werden, bilden Ansätze kollaborativer und individualisierter Produktion eine alternative Form der Umsetzung dezentralisierter Wertschöpfung, die verstärkt die Verschiebung der Gestaltungsmacht weg von kommerziellen Unternehmen und hin zu individuell bzw. gemeinschaftlich-organisierten Akteuren und veränderten normativen Standpunkten ins Zentrum rücken (siehe hier auch die Deutung von Zuboff 2010: Kap. 3) und damit die etablierten Produktionsmuster ungleich stärker irritieren. Getragen werden diese Entwicklungen einerseits durch die Herausbildung neuartiger Akteursrollen, die Grenzen zwischen Produzieren und Konsumieren nahezu vollständig auflösen sowie anderseits durch einen niedrigschwelligen Zugang zu Produktionstechnologien, die es diesen Akteuren erst ermöglicht, selbst produktiv tätig zu werden.

Der erstgenannte Aspekt verweist idealtypisch auf Akteure, die ihren Bedarf an Produkten teilweise durch Eigenproduktion decken. Dieser Modus des Selbermachens erfährt unter dem Label DIY (für „do-it-yourself“) aktuell eine Konjunktur und wird insbesondere in den USA als „Maker Movement“ neu gerahmt. Aber auch im internationalen Raum beginnt sich der Begriff zu verbreiten. Die Maker bilden dabei eine Gemeinschaft aus Tüftlern, Hobbybastlern, DIY-Enthusiasten und Hackern, die ein Bedürfnis haben, mit ihren eigenen Händen etwas zu schaffen, individuelle Produkte statt Mas-

senware von der Stange suchen, und dazu die Werkzeuge und das technologische Wissen (zugänglich) haben. Der Begriff „Maker“ ist eng mit dem 2005 gegründeten Magazin „Make“ verbunden. Er hat sich mittlerweile aber als eine Sozialfigur etabliert, die über ihren Entstehungskontext hinausweist und in der sich spezifische Erwartungen bündeln.

Die Gemeinschaft der Maker wächst auch durch zunehmende Medienpräsenz im Web 2.0. Gerade das Internet bringt neuen Schwung in diese Bewegung, weil sich dort vermehrt Online-Communities bilden, in denen Maker ihre Designs und Bauanleitungen mit anderen teilen. Neben dieser Online-Verbindung schließen sich Maker auch zunehmend in der Offline-Welt zusammen, um sich auszutauschen und den Zugang zu technologisch hochwertigeren Werkzeugen zu teilen und breiter zugänglich zu machen. Als Effekt dieser beiden Vernetzungstendenzen prägt sich im Kontext der Maker ein Ethos des Tauschens und Teilens aus, der sich nicht zuletzt aus dem Open Source-Gedanken begründet. Das Internet spielt hierbei eine maßgebliche Rolle, da das Medium die Vernetzung und die Kollaboration der Akteure untereinander über lokale Kontexte hinaus befördert. So ermöglichen etwa Plattformen wie instructables (www.instructables.com) oder Thingiverse (http://www.thingiverse.com/) den Wissensaustausch der Akteure untereinander. Auf lokaler Ebene kommt der Gemeinschaftsgedanke in den „Maker Faires“ zum Ausdruck. Die letzte dieser Messen für Selbermacher zog in Kalifornien über 100.000 Besucher an und hat mittlerweile Ableger in verschiedenen Ländern. Auch in Deutschland finden – im wesentlich kleineren Maßstab – bereits Maker Faires statt.

Was man auf Maker Faires kaum sieht, sind Reproduktionen von selbstgemachter Massenware, da sich die Reputation innerhalb der Gemeinschaft durch das Schaffen origineller Produkte speist. Die Figur des Makers funktioniert insofern nicht im Sinne der klassischen Produzentenrolle der industriellen Moderne. Der Maker betritt die soziale Bühne vielmehr als schöpferische Persönlichkeit, die sich – analog zu den klassischen Figuren des Künstlers und Erfinders – selbst in seine Produkte einbringen soll. Die Sozialfigur des Maker symbolisiert damit das Bild einer radikal dezentralen, und individuellen Produktionskultur, die durch die schöpferische Kraft individueller Persönlichkeiten angetrieben wird, infolge der Vernetzung der Akteure untereinander jedoch einen idealtypischen Modus kollaborativer Wertschöpfung darstellt, der durch das Teilen und offene Zirkulieren relevanten Produktionswissens reproduziert.

Eine besondere mediale Aufmerksamkeit erfuhr das Maker Movement auch durch die Fertigungstechnologie des 3D-Drucks, die es erlaubt, auf der Basis digitaler Vorlagen relativ einfach materielle Gegenstände automatisiert herzustellen und insofern ein Paradebeispiel für den niedrigschwelligen Zugang zu Produktionstechnologien bildet. Auch wenn diese Technik nur einen kleinen Ausschnitt der Makerkultur ausmacht, so ist sie doch das Zugpferd der neuen Selbermacher. „3D-Drucken“ bildet den derzeit gebräuchlichsten Überbegriff für jene Gruppe von Technologien, die zur generativen Fertigung physischer Objekte genutzt werden. Der gemeinsame Nenner dieser Technologien besteht in dem Prinzip, Gegenstände ohne den Einsatz zusätzlicher Werkzeugmaschinen auf Basis digitaler, dreidimensionaler Modelle durch einen schichtweisen Aufbau entstehen zu lassen. Die zentralen Funktionsansätze dieser Verfahren bestehen demnach einerseits in der unmittelbaren Transformation computerbasierter Daten in physische Gegenstände („turning bits into atoms“) und andererseits in einem additiven, plastischen Aufbau dieser Objekte. Diese Eigenschaft grenzt die generativen Verfahren als formschaffende Prozesse auch grundlegend von anderen Fertigungsverfahren wie beispielsweise Drehen oder Fräsen ab, die formändernd bzw. subtraktiv wirken (Fritz / Schulze 2010: 105).

Mit der Aussicht, nahezu beliebige Objekte in einer universellen Maschine herzustellen, transportiert die Technologie des dreidimensionalen Druckens eine Vision, die auch abseits professioneller

Produktionsprozesse viel Aufmerksamkeit erregt. Dabei bettet sich die eigentliche Technik in eine umfassende Semantik ein, die ausgehend von der 3D-Drucktechnik weitreichende Innovationen und Transformationen beschwört. Diese folgt zumeist dem Motiv, dass 3D-Drucker für den Privatgebrauch zunehmend günstiger werden und die Herstellung von Konsumgütern radikal dezentralisieren, indem die Nutzung generalisierter Fertigungstechnologien prinzipiell jedem offen steht: So wie im Rahmen des „Desktop Publishing“ die allgegenwärtige Verbreitung von Tintenstrahl- und Laserdruckern für den Privatgebrauch die Print- und Medienbranche grundlegend verändert hat, sollen auch 3D-Drucker die derzeitigen Herstellungsstrukturen der fertigenden Industrie revolutionieren: So wird von Stakeholdern im Bereich 3D-Druck immer wieder darauf verwiesen, dass entsprechende Endgeräte als „Desktop Factories“ eine ähnlich umfassende Verbreitung auf den „Schreibtischen der Nutzer/innen“ finden werden, wie es Tintenstrahl- und Laserdrucker für den Privatgebrauch vor Jahrzehnten vorgemacht haben (Anderson 2012). Dass einer der populärsten 3D-Drucker für den privaten Gebrauch mit seinem Produktnamen „Replicator“ direkt auf eine frühe Technologieversion in der „Star Trek“ TV-Reihe verweist, ist bezüglich entsprechender Semantiken durchaus exemplarisch.

Das Bild, das sich im Zuge dieser Auseinandersetzung mit dem 3D-Drucken ergibt, impliziert dabei zumeist eine disruptive Innovationsdynamik, die sich bezogen auf den Wandel von Wertschöpfungssystemen als paradigmatisch darstellt. Die Zukunftsszenarien, die dabei skizziert werden, drehen sich zumeist um eine radikale Individualisierung und Demokratisierung der Produktion, die Reduzierung von Transportaufwand durch eine verstärkte Dezentralisierung der Wertschöpfung und Vor-Ort Herstellung sowie eine weitreichende Vermischung traditioneller Akteursrollen von Produzenten und Konsumenten. All diese Visionen illustriert beispielsweise der Economist auf dem Titel der Aprilausgabe von 2012:

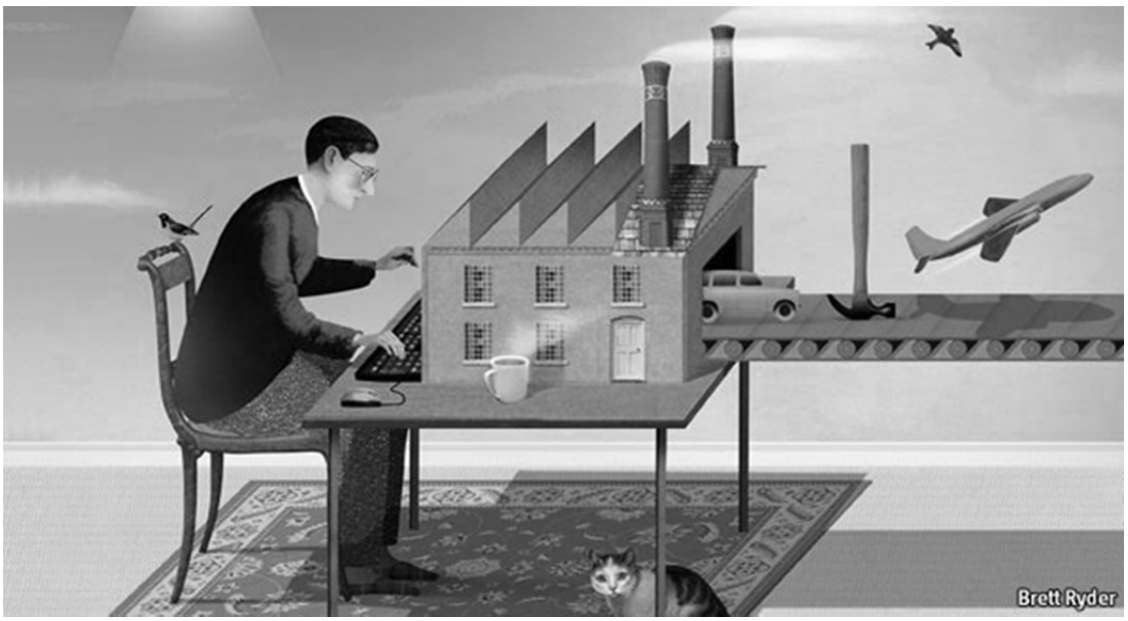


Abb. 3.2: Visionen der Desktopfabrikation auf dem Titel des Economist, April 2012 (The Economist 2012)

Indem 3D-Drucker eine relativ kompakte, handhabbare und erschwingliche Fertigungsmethode darstellen, die prinzipiell eigenständig Konsumgüter produzieren kann und von sonstigen Werkzeugmaschinen unabhängig ist, erscheint eine Entkopplung von Herstellungsprozessen und industriellen Infrastrukturen zumindest für einen Teilbereich der Produktionslandschaft denkbar. Wie wahrscheinlich proklamierte Szenarien von „Personal Fabrication“ oder „Desktop Manufacturing“ dabei jedoch tatsächlich sind, ist aktuell nur schwer zu bewerten. Unabhängig von den jeweiligen , prinzipiell vielfältigen Anwendungskontexten der 3D-Drucker ist deren technologischer Bedeutungszuwachs jedoch unbestritten - unklar bleibt gegenwärtig allerdings, wie sich die Gewichte des Einsatzes dieser Technologien mittelfristig zwischen den Ansätzen „Industrie 4.0“ und „kollaborativer Ökonomie“ verteilen werden.

Ein Blick auf die Internetplattform von Thingiverse verdeutlicht, zu welchen Zwecken die Drucker typischerweise genutzt werden. Die Objekte, deren Blueprints dort veröffentlicht sind, verteilen sich auf die Kategorien Kunst, Mode, „Gadgets“, Hobby, Haushalt, Lehrmaterialien, Modelle, Werkzeuge, Spielzeug sowie Zubehör bzw. Ersatzteile für 3D-Drucker. Es zeigt sich, dass entsprechende Anwendungen im Grundsatz vielfältig sind, in den meisten Fällen jedoch entweder künstlerisch/ designorientierten, funktionalen oder spielerischen Zwecken folgen, von ihrem äußeren Anschein her aber zumeist noch deutlich von professionell hergestellten Produkten abweichen.

In dieser Hinsicht ermöglichen die 3D-Drucktechnologien für den Privatgebrauch auch eine neuartige Form des „User Entrepreneurships“ (Shah / Tripsas 2007), die es Privatpersonen ermöglicht, eigene Produktideen ohne die traditionellen Barrieren des verarbeitenden Gewerbes (insbesondere hohe Investitionshürden für Produktionsmittel) bzw. externe industrielle Verwertung eigenverantwortlich zu kommerzialisieren. Entsprechend der aktuell dominanten Anwendungsbereiche nichtprofessioneller 3D-Drucker adressieren die derzeitigen User Entrepreneure zumeist design- und Lifestyle-orientierte Märkte, wie folgende exemplarische Produkte verdeutlichen, die auf der Marktplatz-Plattform „Etsy“ (http://www.etsy.com) angeboten werden:

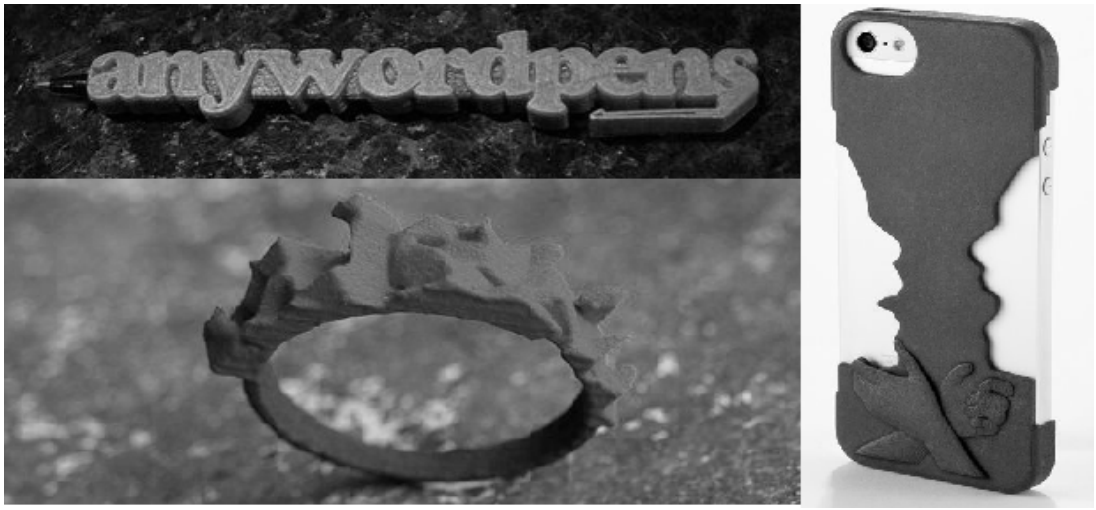


Abb. 3.3: 3D-gedruckte Produkte auf der Verkaufsplattform Etsy (im Uhrzeigersinn): „anywordpens Custom 3D printed pen“, „3D printed personalized Free-Hand case for iPhone 5“, „Blue Random Geometry 3d Printed Ring“
(Etsy 2014).

In der Kombination der Aspekte neuer Akteursrollen und leicht zugänglicher Fertigungstechnologien ergibt sich ein Spektrum neuartiger Produktionskonstellationen: Neben der streitbaren Vision des Desktop Manufacturing geraten in diesem Zusammenhang insbesondere Orte kollaborativer und gemeinschaftsbasierter Wertschöpfung in den Fokus. FabLabs bilden dabei besonders einschlägige Formen neuer Werkstätten dezentraler Fertigung – sie stellen gleichwohl nur einen Ausschnitt aus einem entstehenden Netzwerk von „Makerspaces“ dar, die als offene Werkstätten Nutzer/innen Zugang zu verschiedenartigen Fabrikationstechniken eröffnen und zugleich Nuklei lokaler (gleichwohl aber über digitale Plattformen global vernetzter) Maker Communities darstellen (Moilanen 2012). Diese Werkstätten bilden die Infrastrukturen eines emergenten Produktionsmodus, indem individuelle Autonomie und vernetzte Gemeinschaftlichkeit idealerweise ein wechselseitiges Steigerungsverhältnis konstituieren. Die Selbermacher wollen die Produktion demokratisieren und vernetzen sich einerseits via IKT global, sind aber andererseits ausgesprochen lokal orientiert, indem sie die Produktionsorte zurück in die Städte und Stadtviertel einbetten wollen (Aachener Stiftung Kathy Beys et al. 2012: 36). FabLabs, Maker- oder Hackerspaces bilden in diesem Sinn Reallabore für gemeinschaftliche Arbeit, in denen einerseits Individuen der Zugang zu Fertigungstechnologien ermöglicht wird und andererseits Erfahrung und Know-How ausgetauscht werden.

3.3 Zwischenfazit

In Zusammenhang mit der obigen Diskussion um die Digitalisierung der Produktion und der Auseinandersetzung um Smart Factories und Industrie 4.0 wird der technologische Pfad des 3D-Druckens nur am Rand aufgegriffen bzw. als spezifische Fertigungstechnologie in die digitale Fabrik integriert. Weil die generativen Fertigungsverfahren in diesem Bereich jedoch immer leistungsfähiger und kostengünstiger werden, können sich hier perspektivisch viele Möglichkeiten und Potenziale zur flexiblen und schnellen Umsetzung industrieller Fertigung ergeben: so entstehen durch generative Fertigungsverfahren Möglichkeiten, individualisierte Produkte in stetig wachsender Bandbreite kostengünstig auch in sehr kleinen Stückzahlen und dezentral herzustellen. Auch bezogen auf die daran geknüpften Umwelteffekte läuft die technologische Entwicklung im Kontext intelligenter Fabriken generell auf Ressourceneinsparung hinaus, jedoch trifft dies nicht allein für generative sondern auch für substraktive Technologien zu, die zunehmend ressourceneffizient und z.T. auch dezentralisierend gestaltet werden. Die zentrale Herausforderung besteht hier allerdings darin, dass die Einsparungen bspw. je Produkteinheit durch ein mehr an Nutzung (Rebound Effekt) vielfach wieder in Frage gestellt werden.

Was die allgemeine Einbettung neuer Technologien in sich verändernde bzw. neu emergierende Wertschöpfungsmuster betrifft, lassen sich den hier skizzierten Optionen dezentraler Wertschöpfung zwar diverse Nachhaltigkeitspotenziale zuschreiben (Einsparung von Transportwegen, Entfrachtung der Stoffströme usw.), allerdings ist bisher jedoch weitestgehend offen, inwiefern diese Versprechen tatsächlich eingelöst werden können. Am typisierten Beispiel der Nutzung von 3D-Druck im Kontext von Peer Production deuten sich sowohl die Optionen für die nachhaltigere Gestaltung von Stoffströmen wie auch die Gefahren zur vermehrten Herstellung einfacher Wegwerfgüter an – entscheidend ist die soziale Einbettung solcher Fertigungsweisen. Wirkmächtig können kollaborative Produktionsformen zudem nur werden, wenn sie aus ihrem gegenwärtigen Nischendasein in Deutschland heraustreten und sich in der gesellschaftlichen Breite verankern. Die Etablierung wirtschaftlich erfolgreicher Geschäftsmodelle kollaborativen Produzierens ist dafür eine Voraussetzung. Um transformative Kraft zu entfalten, müssen drittens diejenigen Prinzipien kollaborativen Produzierens, die sich als nachhaltig erwiesen haben, noch stärker als bislang aus dem Labor der Offenen Werkstatt hinausgetragen und mit der Welt der Nutzer/innen und Unter-

nehmen verknüpft werden (Dickel et al. 2014). Die sich vollziehende Öffnung des Innovationssystems sollte genutzt werden, um den Austausch zwischen etablierter Wirtschaft und Peer Production zu intensivieren – wobei deren experimentelle Freiheit zugleich gewahrt, befördert und verwertet werden muss.

4 Fallstudien zu ökologischen Effekten dezentralisierter Wertschöpfungsmuster unter Verwendung von 3D-Druck

Wie im letzten Kapitel deutlich geworden ist, wird generativen Fertigungsverfahren im Kontext dezentraler Produktion eine gewisse Relevanz zugeschrieben - dies gilt sowohl für die Leitidee der Industrie 4.0 als auch die „kollaborative Produktion“. Im Folgenden werden die damit assoziierten Technologien hinsichtlich ihrer ökologischen Effekte bewertet, wobei die jeweils unterschiedlichen Charakteristika und Verwendungszusammenhängen differenziert betrachtet werden.

Diesbezüglich werden in diesem Kapitel zwei Untersuchungsschritte vorgenommen. Auf der Basis der Analyse des aktuellen Forschungsstandes bezüglich der positiven und negativen Umweltwirkungen generativer Fertigungsverfahren und der infolge identifizierten Forschungslücken, wurden explorativ eigene Fallstudien durchgeführt, die vergleichend unterschiedliche generativer Fertigungsverfahren, Produkte und Wertschöpfungsketten zum Ausgangspunkt hatten.

Grundsätzlich ist es an dieser Stelle wichtig, auf das Spektrum der verschiedenen technischen Ansätze zu verweisen, die sich unter dem Sammelbegriff „3D-Drucken“ subsummieren. Dabei ist es sinnvoll, in dieser Hinsicht gegenwärtig idealtypisch zwischen professionellen Geräten und Geräten für den Privat- bzw. Hobbygebrauch zu unterscheiden. Obwohl der jüngste Hype um 3D-Druck insbesondere auf private bzw. nicht-professionelle Anwendungskontexte verwies, existieren zusätzlich dazu eine Reihe professionelle Geräte, die im industriellem Umfeld bspw. im Rahmen von Rapid Prototyping- oder Rapid Manufacturing Prozessen verwendet werden, Diese basieren auf avancierten Prinzipien generativer Fertigung und bedienen sich wie in den Fällen von selektivem Laser-Sintern, Stereolithografie, oder „electronic beam melting“ optischen Technologien zur Aufschmelzung aufwendig vorproduzierter Rohmaterialien. Entsprechende Geräte sind zumeist sehr groß, teuer und kompliziert in der Bedienung, weswegen sie sich für Anwendungskontexte wie FabLabs oder Desktop Manufacturing prinzipiell nicht eignen. Im Bereich der FabLabs etc, werden gegenwärtig primär 3D-Drucker genutzt, die relativ simple, ungefährliche Funktionsprinzipien verfolgen und sich daher vergleichsweise gut für Laienanwendungen eignen. Als Ausgangsmaterialen kommen derzeitig vor allem zwei Kunststoffalternativen infrage: ABS als Polymer auf Erdölbasis und der bio-basierte Kunststoff PLA. Typischerweise werden diese Grundstoffe als „Filament“ in Drahtform auf Spulen gewickelt, an die Drucker geklemmt und direkt in die Druckköpfe geleitet, in denen sie punktuell aufgeschmolzen und schichtweise verarbeitet werden.

Da sich die technische Umsetzung generativer Fertigung so unterschiedlich darstellt, sind generelle Aussagen über den reinen Herstellungsprozess, aber auch über die daran geknüpften Umweltaspekte, nur begrenzt möglich. Dies reflektierend, werden in Bezug auf die Umweltwirkungen von 3D-Druck nachfolgend drei Aspekte beleuchtet:

– Welche Verbindungen zwischen den neuen Produktionstechnologien und Umwelteffekten werden unterstellt?
– Welche empirischen Erkenntnisse liegen zu diesen Umwelteffekten vor?
– Welche Schlüsse lassen sich darüber hinaus aus unseren eigenen Untersuchungsergebnissen ziehen?

Grundsätzlich haben Innovationen in Auseinandersetzung mit ihren ökologischen Folgen immer zwei Gesichter: Einerseits können sie einen Beitrag zur Umweltentlastung leisten bzw. positive Umwelteffekte generieren, andererseits können auch potenzielle Risiken für Ökologie und Nachhaltigkeit mit den neuen Technologien verbunden sein. Im Fall spezifischer Produktionstechnologien ist außerdem darauf zu achten, dass mit neuen Herstellungsverfahren in der Regel ebenfalls die vor-und nachgelagerten Bereiche der Produktion beeinflusst werden, sei es durch die Veränderung der eingesetzten Materialien (Umstellung auf biogene Stoffe usw.), die Umstrukturierung der Herstellungsprozesse oder andere Nebeneffekte auf die jeweiligen Wertschöpfungssysteme.

Im Fall der generativen Fertigungsverfahren treffen all diese Aspekte zu. Wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, ist der damit verbundene Hype gegenwärtig überwiegend mit positiven Konnotationen verbunden, die sich neben deren „revolutionärem“ Einfluss auf Produktionsmuster und Wertschöpfungsketten insbesondere auch auf die vermeintlichen sozialökologischen Potenziale der 3D-Drucker beziehen. Dies zeigt nicht nur, dass mit generativen Verfahren multireferenzielle Effekte auf das Spannungsfeld von Produktion und Konsum verknüpft werden, sondern auch, dass diverse Interessengruppen ihre Leitbilder für zukünftige (gesellschaftliche) Entwicklungspfade an der neuen Technologie orientieren. In diesem Zusammenhang weisen beispielsweise einige gesellschaftskritische Akteure auf die Möglichkeit einer „Demokratisierung“ von Produktion und Arbeit hin, die durch eine nachhaltigkeitsorientierte Technologieentwicklung im Bereich generativer Verfahren umsetzbar erscheint (Gershenfeld 2005). Andere verbinden damit u.a. auch Optionen für die Regionalisierung der Produktion sowie eine wirtschaftliche Umgestaltung durch die Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe (Bergmann 2004). Aber auch aus einer industrie- und wirtschaftspolitischen Perspektive wird auf Szenarien verwiesen, in denen prinzipiell dezentrale, generative Fertigungstechnologien das „Reshoring“ von Produktion ermöglichen – dies würde nicht nur dazu führen, dass sich verarbeitendes Gewerbe wieder verstärkt in westlichen Hochlohnländern ansiedelt, sondern auch die generelle Tendenz der Abkehr von einer „einfachen“ Massenproduktion hin zur adaptiven Anpassung auf aktuelle Nachfragetrends stützen (vgl. Kapitel 2.2).

4.1 Umweltwirkungen generativer Fertigungsverfahren: Stand der Forschung

Ein weiterer positiv konnotierter Aspekt dieser, auf die Potenziale von 3D-Druck bezogener Leitbilder und Visionen bildet der „Nebeneffekt“, dass die Umweltbelastungen im Kontext von Herstellung, Transport und Nutzung generativ gefertigter Produkte signifikant gemindert werden können. Und in der Tat erscheinen entsprechende Verfahren hier durchaus vorteilhaft, da sie beispielsweise als sehr materialeffizient gelten: so wird dem generativen Produktionsprozess

– *erstens* zugeschrieben, quasi keinen Abfall zu generieren, da nur das tatsächlich benötigte Rohmaterial verarbeitet wird;
– *zweitens* können in dreidimensionalen Produktionsprozessen besonders komplexe Leichtbaustrukturen realisiert werden, die sich im Lebenszyklus entsprechender Bauteile positiv auswirken;

– *drittens* sollen energetische Mehraufwände beispielsweise durch den Bedarf zusätzlicher Werkzeugmaschinen oder den Transport zwischen verschiedenen Produktionsschritten im Fall generativer Fertigung weitestgehend ausgeschlossen werden (vgl. Woodcock 2011: 33; Huang et al. 2012).
– Dass *viertens* in dezentralisierten Wertschöpfungssystemen darüber hinaus der Aufwand für Transport und Logistik deutlich gemindert werden kann, trägt als weiteres positives Argument zur Nachhaltigkeitsdiskussion generativer Verfahren bei.

Gemessen am aktuellen Entwicklungsstand gilt es diese Behauptungen jedoch zu hinterfragen, da die Diskussionen um die vermeintlichen ökologischen Vorteile von 3D-Druckprozessen zumeist verkürzt dargestellt werden. Insbesondere deren Vorbedingungen werden nur unzureichend thematisiert, obwohl beispielsweise die pulverförmigen Ausgangsmaterialen generativer Verfahren teilweise aufwendige Herstellungsprozesse erfordern. Des Weiteren stellt sich vor allem im Kontext der personalisierten Verwendung von 3D-Druckern die Frage nach der Qualität und Sinnhaftigkeit der produzierten Objekte. Diesbezüglich ist ein relativ hoher Anteil an so genannten „Crapjects“ („Crappy Objects“, Institute for the future 2011: 7) im Rahmen von Laienanwendungen durchaus wahrscheinlich, was zumindest im Hinblick auf deren Nachhaltigkeit ein Problem darstellen wird. Hier ist zu vermuten, dass es zu Reboundeffekten kommt, da durch die Ermöglichung der personalisierten Verwendung von 3D-Druckern im privaten Kontext Bedürfnisse produziert werden, welche vorher so nicht vorhanden waren. Die nachfolgende Tabelle fasst einen Überblick über jene Unklarheiten bzw. Mehrdeutigkeiten, die sich hinsichtlich der ökologischen Effekte des 3D-Drucks aus dem Stand der Forschung ergeben, zusammen:

Tab. 4.1: Überblick über vermeintliche Vor- bzw. Nachteile von 3D-Druck gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren

Vermeintliche Vorteile des 3D-Drucks ggü. herkömmlichen (subtraktiven) Verfahren	**Vermeintliche Nachteile des 3D-Drucks ggü. herkömmlichen (subtraktiven) Verfahren**
Reduzierter Abfall im Herstellungsprozess bzw. Möglichkeit abfallfreier Produktion (Lipson / Kurmann 2013, Bühner 2013) Verwendung gesundheitlich problematischer Stoffe wie Schneidflüssigkeiten wird hinfällig) Erschließung von Leichtbaupotenzialen und damit potenzielle Reduktion des Energiebedarfs in der Nutzungsphase entsprechender Bauteile. Kosteneffiziente Herstellung seltener bzw. zuvor nicht erwerbbarer Ersatzteile (Woodcock 2011: 33) bzw. Aufarbeitung oder Wiederherstellung von Ersatzteilen und Produkten Verringerung des Transportbedarfs durch potenzielle Verkürzung globaler Herstellungsketten (Kurman / Lipson) bzw. Produktion vor Ort	Abfälle können u.a. durch Nacharbeiten der generativ gefertigten Bauteile anfallen (Woodcock 2011: 33) Energieverbrauch pro Einheit im unmittelbaren Produktionsprozess tendenziell höher als bei herkömmliche Verfahren (Huang u. a. 2012) Recyclebarkeit der verwendeten Materialien noch weitgehend unklar bzw. unerforscht (Bourell, Leu, und Rosen 2009: 29) relativ einfache Herstellung von Produkten durch 3D-Druck kann zu Mehrproduktion führen Erschließung von 3D-Druck durch Laien erhöht Wahrscheinlichkeit der Herstellung fehlerhafter Bauteile oder „Crapjects“ (Institute for the future 2011: 7)

Diese Ambivalenz zwischen Nachhaltigkeitsversprechen und -bedenken resultiert im Wesentlichen aus diversen Forschungs- und Entwicklungsbedarfen, die im Umfeld generativer Fertigung entweder kurz- bis mittelfristig adressiert werden müssten oder aber bereits auf der Agenda der beteiligten Stakeholder stehen. So wird es zukünftig vor allem auf die folgenden Punkte ankommen (vgl. Woodcock 2011; Huang et al. 2012; Bühner 2013):

– Stärkere Erschließung der potenziellen Materialeffizienz: Obwohl generative Verfahren idealtypisch nur das Material verbrauchen, das tatsächlich zur Herstellung eines Produkts notwendig ist, fallen in vielen Anwendungen aktuell noch Abfälle durch nachträgliches Bearbeiten oder die begrenzte Wiederverwendbarkeit des nicht genutzten Rohmaterials an. Letzteres betrifft insbesondere Prozesse wie Laser Sintering oder Electronic Beam Melting, bei denen pulverförmige Ausgangsmaterialien zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 4.2.3).

– Erhöhung der Energieeffizienz: Bisher ist der Energieaufwand zur Herstellung generativ gefertigter Produkte allgemein als hoch zu bewerten, da er bezogen auf die verwendete Energie pro Produktionseinheit jenen subtraktiver Prozesse meist übersteigt. Zwar ist dieser Vergleich gegenüber generativen Verfahren nicht ganz gerecht, da die spezifischen Potenziale der Produktgestaltung (Leichtbau, Modularität usw.) dabei unberücksichtigt bleiben, jedoch erscheinen abgesehen davon vor allem die häufig verwendeten Lasertechnologien bisher energetisch besonders ineffizient.

– Ausdehnung von Wiedernutzungs- und Recyclingpraxis: Obwohl generative Verfahren eine Vielzahl neuer Recycling- und Reparaturpraktiken ermöglichen, Reparaturteile leichter herstellbar machen und die Reparaturfreundlichkeit von Produkten erhöhen können, fehlen bislang noch Erkenntnisse, inwiefern diese Potenziale in der Nutzungspraxis der 3D-Drucker tatsächlich Anwendung finden. Darüber hinaus mangelt es derzeit an Prozessen, die komplementär zur dezentralen Produktion auch das Recycling generativ gefertigter Produkte dezentralisieren. Dies wäre insbesondere für die personalisierten und nicht-professionellen Anwendungskontexte der Technologie wichtig, um Nachhaltigkeitspotenziale tatsächlich zu erschließen.

Dass diese qualitativen Befunde zu den Umwelteffekten generativer Fertigungsverfahren größtenteils auf Vermutungen und Einschätzungen basieren, liegt vor allem auch daran, dass quantitative Studien in diesem Bereich noch sehr rar sind und bisher nur vereinzelt systematische Daten zu den Umweltwirkungen erhoben wurden. Neben der ohnehin begrenzten Anzahl an quantitativen Studien unterscheiden sich diese zusätzlich deutlich in ihren jeweiligen Fragestellungen und Forschungsdesigns, was einen Vergleich grundsätzlich erschwert. Vor diesem in vielerlei Hinsicht unbefriedigenden Stand der Forschung vergleichen Huang et al. (2013) in ihrer Überblicksstudie die Ergebnisse jener Analysen, die die umweltorientierte Vorteilhaftigkeit generativer Verfahren zu belegen scheinen. Obwohl sie auf Basis dieses Vergleichs zeigen können, dass sich beispielsweise der Verzicht auf Schneidflüssigkeiten als prinzipiell kritische Gefahrenstoffe für Mensch und Natur positiv auf die Reduktion der Umwelteffekte generativer Verfahren auswirkt und so hergestellte Produkte durchschnittlich tatsächlich leichter sind als ihre subtraktiv gefertigten Pendants, stellen die Autoren zusammenfassend doch die grundlegenden Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten bezüglich einer abschließenden Bewertung der neuen Produktionstechnologien heraus.

Auch wenn sich viele Versprechungen der generativen Technologien derzeit noch nicht hinreichend belegen lassen, liegen die Entwicklungspotentiale entsprechender Produktionsverfahren gleichwohl auf der Hand. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass sich mit Hilfe der generativen Verfahren bereits heute Produkte so herstellen lassen, dass sie aus einer geringeren Anzahl von Teilen bestehen und/oder Formen des Leichtbaus integrieren, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht umsetzbar wären. Darüber hinaus ermöglichen die neuen Technologien prinzipiell eine

Produktion in der Nähe der Absatzgebiete, die weitestgehend unabhängig von industriellen Infrastrukturen ist, einen relativ niedrigschwelligen Zugang zulässt und den ressourcenintensiven Aufwand für Lagerhaltung, Transport und Verpackung senken kann. Komplementär dazu legen die dargestellten qualitativen Befunde nahe, dass im Sinne einer nachhaltigen Umgangsweise mit den neuen Produktionstechnologien vor allem eine lokale und kollaborative Nutzung von 3D-Druckern, (z.B. in Form partizipativer Werkstätten) zu einer ressourcensparenden Wirkungsweise führen könnte.

Um das Versprechen nachhaltiger Produktion einzulösen, wird es mittelfristig auch darauf ankommen, den Lebenszyklus von dreidimensional gedruckten Objekten um wirksame Recyclingverfahren zu ergänzen. Kommt es bei industriellen Anwendungen primär darauf an, die in Sinterprozessen nicht verwendeten Rohmaterialien ohne Qualitätsverlust zur Wiederverwendung aufzubereiten, gilt es im personalisierten Anwendungskontext von 3D-Druckern, praktikable Lösungen zum Recycling von „Crapjects“, Fehldrucken usw. zu entwickeln, um diese als Ausgangsmaterialien für erneute Druckprozesse nutzbar zu machen.

4.2 Eigene Fallstudien

Ergänzend zur Erhebung des aktuellen Forschungsstandes wurden zwei eigene Fallstudien erhoben, in denen jeweils die logistischen sowie ökobilanziellen Aspekte einer durch generative Verfahren dezentralisierten Produktion modelliert wurden. Um im Rahmen des Vergleichs orientierende und belastbare Aussagen zu generieren, wurden solche Produkte ausgewählt, die sowohl generativ als auch konventionell hergestellt werden können. Für die Auswahl der Fallstudien war es ferner wichtig, dass unterschiedliche Szenarien berücksichtigt werden können, die typisierend für den Übergang von der zentralen zur dezentralen Produktion stehen und dabei die ganze Bandbreite von Dezentralisierungspotenzialen erfassen. Dabei sollten:

– auf bereits heute verfügbare Technologien Bezug genommen werden
– bestehende Wertschöpfungsketten in den Blick genommen werden
– darauf aufbauend die Dezentralisierungspotenziale sowohl unter logistischen, ökobilanziellen und ökonomischen Aspekten die ausgelotet werden

Ausgangspunkt unserer Fallstudien waren zwei unterschiedliche Anwendungskontexte, in denen zum Einen die Herstellung von Handyschalen und zum anderen die Produktion eines Flugzeugersatzteils unter der Berücksichtigung verschiedener Dezentralisierungsgrade vergleichend gegenübergestellt wurden. Die Beispiele wurden so gewählt, dass sie sowohl die räumliche Dimension dezentraler Fertigung unterstreichen als auch die Potenziale akteursbezogener Dezentralität in den Blick nehmen. Mit dieser Vorgehensweise soll sichergestellt werden, dass die ganze Bandbreite von Dezentralisierungspotenzialen erfasst und dargestellt werden kann. Bezogen auf das Fallbeispiel „Handyschale“ wurden die Produktionsmöglichkeiten in einer zentralen Fabrik ,zentralisierten sowie dezentralen Druckzentren und schließlich der radikal dezentralisierten Produktion zu Hause unterschieden (siehe Kapitel 4.2.1). Mit Blick auf das Flugzeugersatzteil wurden kontrastierend zwei Optionen logistisch und ökobilanziell abgebildet, die einerseits die zentralisierte Herstellung mittels konventioneller Produktionstechnologie und anderseits dezentrale Produktion über generative Fertigungsverfahren in den Fokus rücken (Kapitel 4.2.2)

Um mögliche Änderungen in den *logistischen Prozessen* durch den Einsatz von generativen Fertigungsverfahren untersuchen zu können, ist zunächst ein analytisch-konzeptioneller Rahmen zu entwickeln, der den Zusammenhang von Wettbewerbsstrategie, Fertigungsverfahren, Steuerungs-

ansatz und transportlogistischem System umfasst (Chopra und Meindl 2010, Flämig 2010). Die Herstellung von Produkten erfolgt heute typischerweise in unternehmensübergreifenden, räumlich verteilten Wertschöpfungsketten und -netzwerken und stellt hohe Anforderungen an die drei logistischen Grundfunktionen Transport, Umschlag und Lagerung, die folgende Aufgaben in der Wertschöpfungskette übernehmen:

– Der Transport dient der Raumüberwindung und definiert die raum-zeitliche Kopplung zwischen Sender und Empfänger von Gütern.
– Der Umschlag dient dem Mengenausgleich und ermöglicht das Aufbrechen von großen Mengen (Disaggregationsfunktion) oder das Zusammenführen von kleinen Mengen (Aggregationsfunktion) im Produktionsprozess und zwischen den Wertschöpfungsstufen in einem logistischen Knoten (Hafen, Distributionscenter, Rangierbahnhof usw.).
– Diese Knoten dienen teilweise auch zur Lagerhaltung, also zur Zeitüberbrückung zwischen dem Zeitpunkt der Fertigstellung bzw. Beschaffung eines Produktes und dem Zeitpunkt des Bedarfs bzw. der Distribution eines Produktes.

Dabei sind für die ökologische Bewertung der Änderungen in den logistischen Prozessen durch den Einsatz von generativen Fertigungsverfahren vor allem die Veränderungen in der physischen Wertschöpfungskette von Bedeutung. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Wirkungsket-

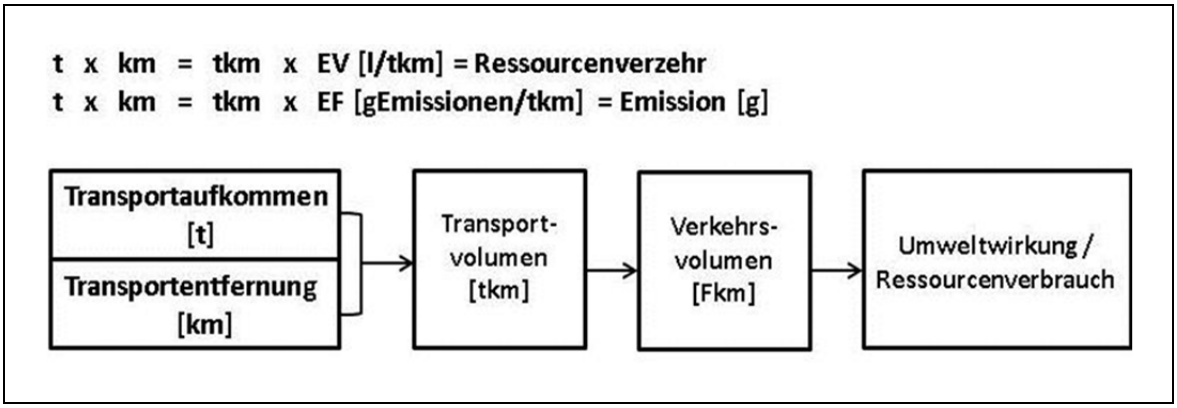


Abb. 4.1: Ansatzpunkte zur Reduzierung der transportbedingten Umweltwirkungen

te von Transportaufkommen und Transportaufkommen über das Verkehrsaufkommen und den damit induzierten Ressourcenverbrauch bzw. die entstehenden Luftemissionen auf:

Die Transportaktivitäten resultieren in der Bewegung von Ladungseinheiten und Transport-mittel zwischen Knoten im Transport- bzw. Güterflusssystem (Ihde 1991, S. 13). Die Knoten im Transportsystem repräsentieren die Funktionen: Wechsel des Verkehrsträgers/ mittels, Transshipment, Sortierung, Konsolidierung und Dekonsolidierung von Sendungen. Gemäß Pfohl (2010) können grundlegend einstufige, mehrstufige und kombinierte Logistiksysteme unterschieden werden (vgl. Abbildung 5).

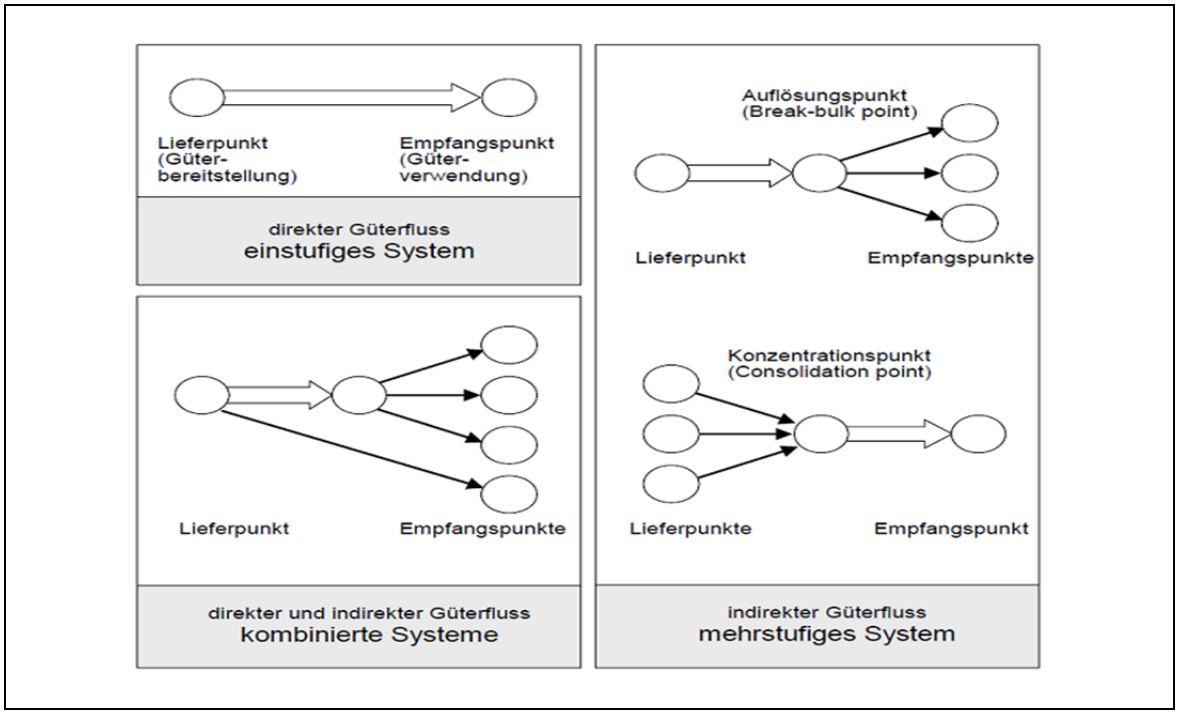


Abb. 4.2: Grundlegende Struktur von Logistik- bzw. Güterflusssystemen
(Quelle: Pfohl 2010, S. 6)

Im einstufigen Güterflusssystem erfolgt der Transport von Sachgütern durch einen Direkttransport zwischen Lieferpunkt (Quelle) und Empfangspunkt (Senke). Dabei wird der kürzeste Weg zwischen einer Quelle und eine Senke gewählt und es finden keine zusätzlichen Lager- bzw. Umschlagsaktivitäten statt. Beim mehrstufigen System wird der Güterfluss an mindestens einem Punkt unterbrochen, um eine Konsolidierung oder Auflösung von großen Sendungen in kleinere Sendungen durchzuführen. Durch Konsolidierung werden eine höhere Auslastung und der Einsatz von großvolumigen Verkehrsmitteln ermöglicht. Die Auflösungspunkte erlauben eine Sendungszusammenstellung entsprechend der Anforderungen der einzelnen Empfangspunkte. Die einstufigen und mehrstufigen Güterflusssysteme treten überwiegend in Kombination auf und werden folglich als kombinierte Systeme bezeichnet (Pfohl 2010, S. 6f.). Dieser analytische Ansatz bildet den Ausgangspunkt der Logistikbetrachtung der beiden Fallstudien in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2.

Komplementär zu der kontrastierenden Analyse der Transportwege stellen *Ökobilanzen* die am weitesten entwickelte und normierte Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potenziellen Umweltwirkungen dar. In den folgenden Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf den potenziellen Umweltauswirkungen durch die Anwendung der 3D-Druck-Technologie im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren. Die Modellierung der betrachteten Szenarien, deren Berechnung und Auswertung nach geeigneten Umweltwirkungen, erfolgte mit der Ökobilanzsoftware Umberto. Die Wirkungsabschätzung und Auswertung der ökobilanziellen Betrachtungen basiert auf der teilaggregierten Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“ (CML 2001), in der verschiedenste Umweltwirkungen quantitativ ermittelt werden. Folgende Wirkungskategorien werden für die Wirkungsabschätzung aggregiert:

– Treibhauseffekt: Das implementierte Charakterisierungsmodell dieser Wirkungskategorie wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt. Die Charakterisie-

rungsfaktoren werden als Global Warming Potential (GWP) für einen Zeitraum von 100 Jahren in kg CO_2-Äquivalente berechnet.

– Abiotischer Ressourcenverbrauch: Der Wirkungskategorieindikator bezieht sich auf die Extraktion von Mineralien und fossilen Brennstoffen in Bezug auf den Input in das System. Der Wert des abiotischen Ressourcenverbrauchs einer Substanz ist ein Maß für die Knappheit einer Substanz und der Entnahmerate. Das Potential wird berechnet für jede Extraktion von Mineralien und fossilen Brennstoffen (kg Antimon / kg Extrahierung) basierend auf der Konzentration von Reserven und der Rate der Wiederanhäufung. Es werden Antimonäquivalente berechnet.

– Humantoxizität: Das Humantoxizitätspotenzial (HTP) erfasst die Wirkung der in der Sachbilanz erfassten toxischen Stoffe auf die menschliche Gesundheit. Gemäß ihrer toxischen Wirkung werden die Stoffe umgerechnet und für einen Zeitraum von 100 Jahren in kg 1,4-Dichlorbenzol-Äquivalente dargestellt.

– Versauerung: Das Versauerungspotenzial beschreibt die Wirkung versauernder Emissionen und wird generisch in massebezogenen SO_2-Äquivalente ausgedrückt.

Nachfolgend werden zunächst die Erkenntnisse beider Fallstudien separat dargestellt, bevor abschließend allgemeine Ergebnisse und Schlussfolgerungen zusammenfassend betrachtet werden.

4.2.1 Fallbeispiel Handyschale

4.2.1.1 Logistikbetrachtung

Als Ausgangspunkt für die Bewertung wurden fünf mögliche Szenarien ermittelt, die graduelle Unterschiede in der Dezentralität der implizierten Produktionskonstellationen akzentuieren und vergleichend gegenüberstellen. Den vielfältigen Kombinationen der Verortung von Produktion, die sich aus der potenziellen Dezentralisierung durch neue Technologien umsetzen lassen, werden im Zuge der Fallstudien erstmals auch in Bezug auf deren Umwelteffekte diskutiert. Die fünf betrachteten Szenarien umfassen:

– Szenario 1. „klassische Massenproduktion“

– Szenario 2: Mass Customization- Produktion

– Szenario 3: Produktion in einem 3D-Druckzentrum („Factory shop“)

– Szenario 4: Produktion in einem dezentralisierten 3D-Druckzentrum

– Szenario 5: Produktion im heimischen 3D-Drucker.

Die Informationen zur Ermittlung der Szenarien wurden durch Interviews und eine Auswertung von Unternehmensberichten gewonnen und spiegeln damit reale Unternehmensstandorte und logistische Knoten wieder.

Das *Szenario 1* stellt die klassische Massenproduktion für das Produkt Handyschale dar. Die Handyschalen werden in einer begrenzten Variantenanzahl auf Basis von Vorhersagen über die Kundenanfrage durch einen Produzenten in Shenzhen (China) auf Lager vorgefertigt (make-to-stock). Damit liegt der Kundenkopplungspunkt nah am Rohstofflieferanten. Die Versorgung mit Rohstoffen erfolgt durch einen lokalen Lieferanten, der in 200 km Entfernung zum Produktionsstandort ansässig ist. Die fertigen Handyschalen werden beim Produzenten gelagert. Die Distribution erfolgt aus einem Produktionslager in China, sodass ein geografisches Postponement vorliegt. Nach Eingang der Kundenbestellung wird die Handyschale mit dem KEP-Dienstleister DHL an den Endkunden in

Berlin versendet. Dazu wird die Handyschale zunächst zu einem regionalen Distributionszentrum (DC) in Shenzhen in 10 km Entfernung transportiert. Dort findet eine Bündelung mit anderen Sendungen statt. Die gebündelten Sendungen werden zum 48 Kilometer entfernt liegenden Flughafen in Hongkong transportiert. Hier werden die Sendungen von mehreren DC gebündelt und per Luftfracht zum ca. 9.000 Kilometer entfernt liegenden Flughafen Schkeuditz in Leipzig transportiert. Der Leipziger Flughafen dient als erster Auflösungspunkt, da von hier die Waren auf mehrere DC in Deutschland verteilt werden. Die Handyschale für den Endkunden in Berlin wird per Schwer-LKW zu einem DC in Berlin transportiert. Dort wird die Ladung des Schwer-LKW erneut aufgebrochen und die Handyschale mit einem Kleinlaster an den Endkunden in Berlin ausgeliefert. Die gesamte Transportentfernung ist hoch, wobei der Pull-Anteil der Transportkette im Vergleich zum Push-Anteil relativ hoch ist. Das zentrale Ziel der Steuerung der Transportkette ist daher die Reduktion der Durchlaufzeit, wodurch der Flugtransport dem Schiffstransport vorgezogen wird. Damit steigt der Transportkostenanteil an den Gesamtherstellungskosten. Der Güterfluss ist indirekt und wird über zwei Stufen konsolidiert, sodass die Transportmittelauslastung hoch ist. Die Anzahl der Wertschöpfungsstufen ist relativ gering, was ein Aufschaukeln von Beständen durch falsche Vorhersagen über die Kundennachfrage (Bullwhip-Effekt) eher unwahrscheinlich macht. Allerdings erfolgt die Produktion für einen anonymen Markt, sodass die Gefahr von Über- und Unterproduktion sowie von obsoleten Beständen in der Kette relativ hoch ist. Dies kann zu hohen Rücklaufquoten und einer Zunahme von Transporten führen.

Das *Szenario 2* stellt eine sogenannte Mass Customization-Produktion für eine Handyschale dar, wobei die Produktion und die Transporte im europäischen Raum stattfinden und die Transportkette im Vergleich zum Szenario 1 kürzer ist. Standardisierte Handyschalen werden als Halbwaren in einer Massenproduktion durch einen Produzenten in Frankreich gefertigt und an einen Customizer in Frankreich verschickt. Nach Eingang einer Endkundenbestellung wird die standardisierte Handyschale durch den Customizer individuell bedruckt und an den Kunden in Berlin verschickt. Der Kundenkopplungspunkt liegt somit bei dem Customizer. Es wird sowohl ein geografisches als auch ein fertigungstechnisches Postponement genutzt. Damit kann im Vergleich zu Szenario 1 einerseits eine höhere Variantenanzahl realisiert werden und andererseits die Mengenkostenvorteile einer Massenproduktion generiert werden. Der Rohstoff wird von der Firma Bayer von Antwerpen zum 850 Kilometer entfernt ansässigen Handyschalenproduzenten durch Direkttransporte mit einem Schwer-LKW geliefert. Der Transport zwischen den Handyschalenproduzenten und dem Customizer sowie zwischen dem Customizer und dem Endkunden in Berlin wird durch indirekte Transporte durch den KEP-Dienstleister DHL bewerkstelligt. Dadurch werden die Halb- und Fertigwarentransporte konsolidiert, wodurch aufgrund der Gütermengen im DHL-System von einer hohen durchschnittlichen Transportmittelauslastung ausgegangen werden kann. Es wird hauptsächlich der LKW als Transportmittel genutzt, da die Geschwindigkeit und Flexibilität des Transportmittels entscheidend für die Reduzierung der Durchlaufzeit ist. Gleichzeitig ist zwischen dem Rohstofflieferanten und dem Schalenproduzenten aufgrund der Pushsteuerung sowie der hohen Transportentfernung auch der Einsatz von Bahntransporten mit entsprechenden Konsolidierungs- und Auflösungspunkten in der Transportkette denkbar. Die Anzahl der Wertschöpfungsstufen ist höher als im Szenario 1. Somit ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Bullwhip-Effekts relativ größer als im Szenario 1. Zudem werden zu einem frühen Zeitpunkt in der Wertschöpfungskette Halbwaren (standardisierte Handyschale) für einen anonymen Markt produziert und zwischengepuffert. Damit steigt die Gefahr einer Unter- bzw. Überproduktion.

Das *Szenario 3* beschreibt eine zentralisierte Produktion der Handyschale in einem 3D-Druckzentrum („Factory Shop“). Die Firma Shapeways NL betreibt ein Druckzentrum in Eindhoven, von wo aus der europäische Markt für 3D-gedruckte Teile bedient wird. Die Herstellung erfolgt über professionelle 3D-Drucker, die nach dem Laser Sintering Prinzip auf Basis polymerer Rohstoffe

funktionieren[1] - die Rohstoffversorgung für den 3D-Druck erfolgt durch das Produktionswerk der Firma BASF in Ludwigshafen. Den Vertrieb des Rohstoffs übernimmt die nylon polymers Vertriebsges. mbH, die auf Basis der Kundennachfrage größere Mengen des Rohstoffs einkauft und zwischenlagert. Für Transport-, Umschlag- und Lagerungsaufgaben wird das Logistikunternehmen Oetjen Logistik von der nylon polymers Vertiebsges. mbH beauftragt. Shapeways NL bestellt den Rohstoff für den 3D-Druck auf Basis einer Vorhersage über die Endkundennachfrage und puffert diesen am Produktionsstandort. Die Lieferung erfolgt im Direkttransport durch Oetjen Logistik. Nach Eingang einer Bestellung durch den Endkunden wird die Handyschale individuell gedruckt und mit dem KEP-Dienstleister UPS verschickt. Die Handyschale wird zusammen mit anderen Sendungen im DC in Eindhoven gebündelt und per Schwer-LKW an das DC Berlin-Süd transportiert. Dort wird die Sendung aufgebrochen und per Kleinlaster an den Endkunden in Berlin ausgeliefert.

Das *Szenario 4* stellt eine dezentralisierte Produktion der Handyschale in einem regionalen 3D-Druckzentrum dar.[2] Das Druckerzentrum befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Endkunden in Berlin. Die Versorgung des 3D-Druckzentrums mit Rohstoffen erfolgt wie im Szenario 3 durch das Logistikunternehmen Oetjen Logistik im Auftrag der nylon polymers Vertriebsges. mbH. Nach Eingang der Endkundenbestellung wird die Handyschale individuell gefertigt und anschließend durch den Endkunden abgeholt.

Im *Szenario 5* erfolgt die Produktion der Handyschale durch die Endnutzer/in (0) mit eigenen 3D-Druckern zu Hause. Im Unterschied zu industriellen 3D-Druckern wird Filament anstatt von Granulat für den 3D-Druck genutzt, wobei unterschiedliche Filamentfarben beim Drucken kombiniert werden können. Der Rohstoff für die Herstellung des Filaments wird in den USA durch Cargill Dow im Bundestatt Nebraska (3) hergestellt und anschließend mit der Bahn zum Hafen in New York transportiert. Hier wird die Ladung zusammen mit anderen Transportgütern gebündelt und nach Amsterdam verschifft. In Amsterdam wird die Schiffsladung aufgebrochen und der Rohstoff für die Filamentproduktion mit einem Schwer-LKW an die Pedex GmbH aus Wald-Michelbach (2) transportiert. Die Filamentproduktion erfolgt für einen anonymen Markt auf Basis von Nachfragevorhersagen. Den Filamentvertrieb an Endkunden übernimmt die German RepRap GmbH aus Feldkirchen (1), die das Filament auf Basis von Nachfragevorhersagen einkauft und zwischenlagert. Der Transport zwischen der Filamentproduktion und der German RepRap GmbH erfolgt direkt durch einen mittelschweren LKW. Nach dem Eingang von Endkundenbestellungen werden die bestellten Filamentrollen kundenindividuell kommissioniert und mit dem KEP Dienstleister GLS verschickt. Hierzu wird die Sendung zusammen mit anderen Sendungen im DC in Erding gebündelt und mit einem Schwer-LKW zum DC in Großbeeren transportiert. Dort wird die Ladung aufgebrochen und an die Endkunden in Berlin ausgeliefert.[3]

---

1 Konkret gehen wir von der Verwendung des EOSINT P 390 3D-Druckers aus. In der Literatur wird für dieses Gerät eine Bandbreite von 30-60% Abfall (Verhältnis von pulverförmigen Ausgangsmaterial zu nutzbarem Bauteil, im folgenden PA) beschrieben, die insbesondere auch von der Kompliziertheit des herzustellenden Teils abhängt. Wie bei den anderen Szenarien auch, wurde dieser Anteil in der Ökobilanzierung als Abfall behandelt – um der großen Bandbreite Rechnung zu tragen wurde Szenario 3 in der bilanzierenden Betrachtung jedoch in zwei Fälle aufgeteilt, wovon der eine von 30% und der andere von 60% Abfall ausgeht.

2 Wie im vorherigen Szenario, gehen wir auch hier von der Verwendung des EOSINT P 390 3D-Druckers inkl. entsprechender Grundannahmen aus.

3 In der Ökobilanzierung wird das Szenario 5 und zwei Fälle unterteilt: Fall A folgt der Grundannahme, dass bereits verarbeitetes PLA Filament nicht recyclebar ist und entsprechend keine Wiederverwendung finden kann. Fall B geht im Gegensatz dazu von einer 50%igen Recyclingfähigkeit aus und schließt so aktuelle Entwicklungstendenzen mit diesem Ziel mit ein (im Folgenden „PLA Rec“).

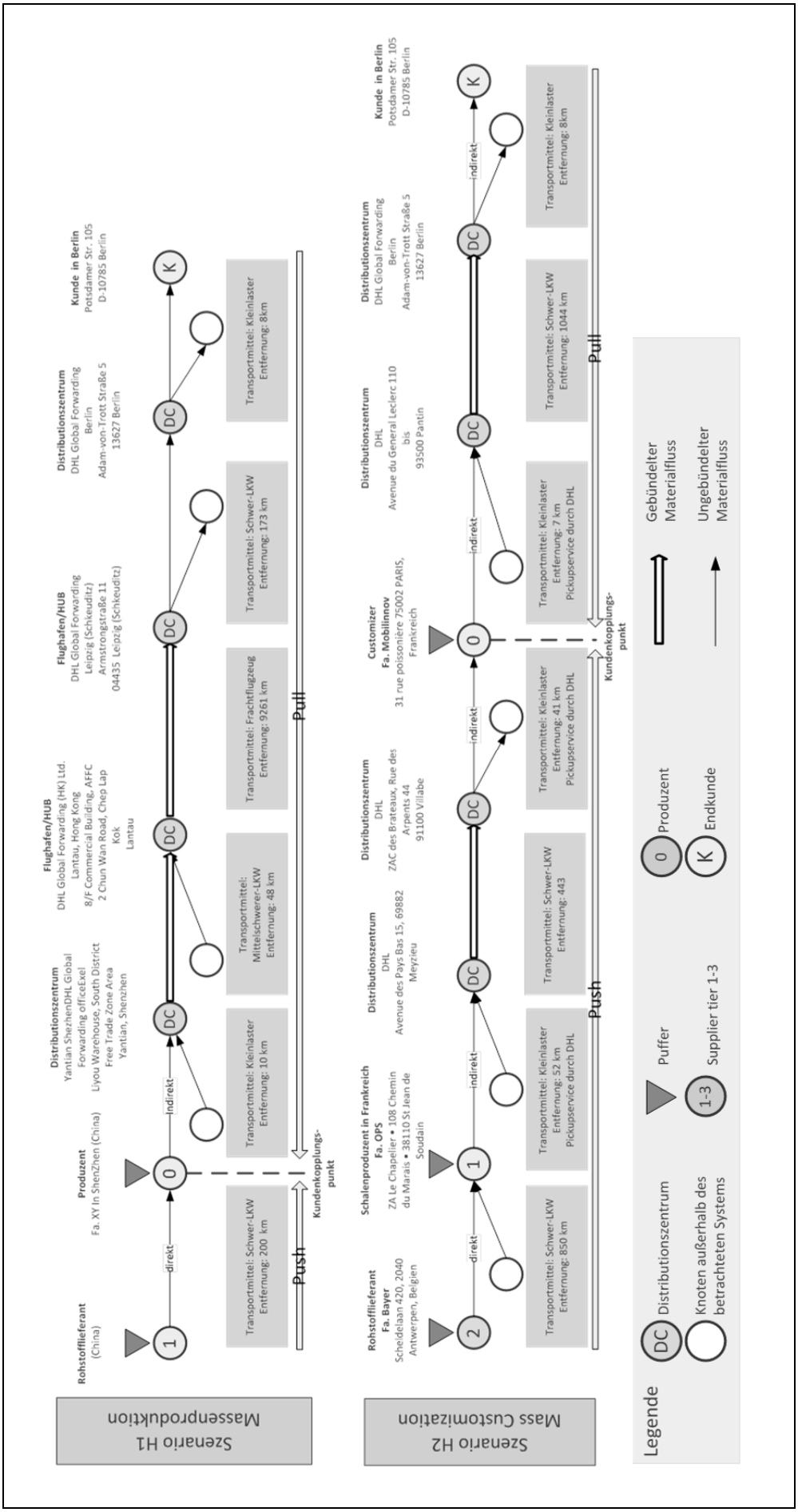


Abb. 4.3: Szenario 1: Massenproduktion und Szenario 2: Mass Customization

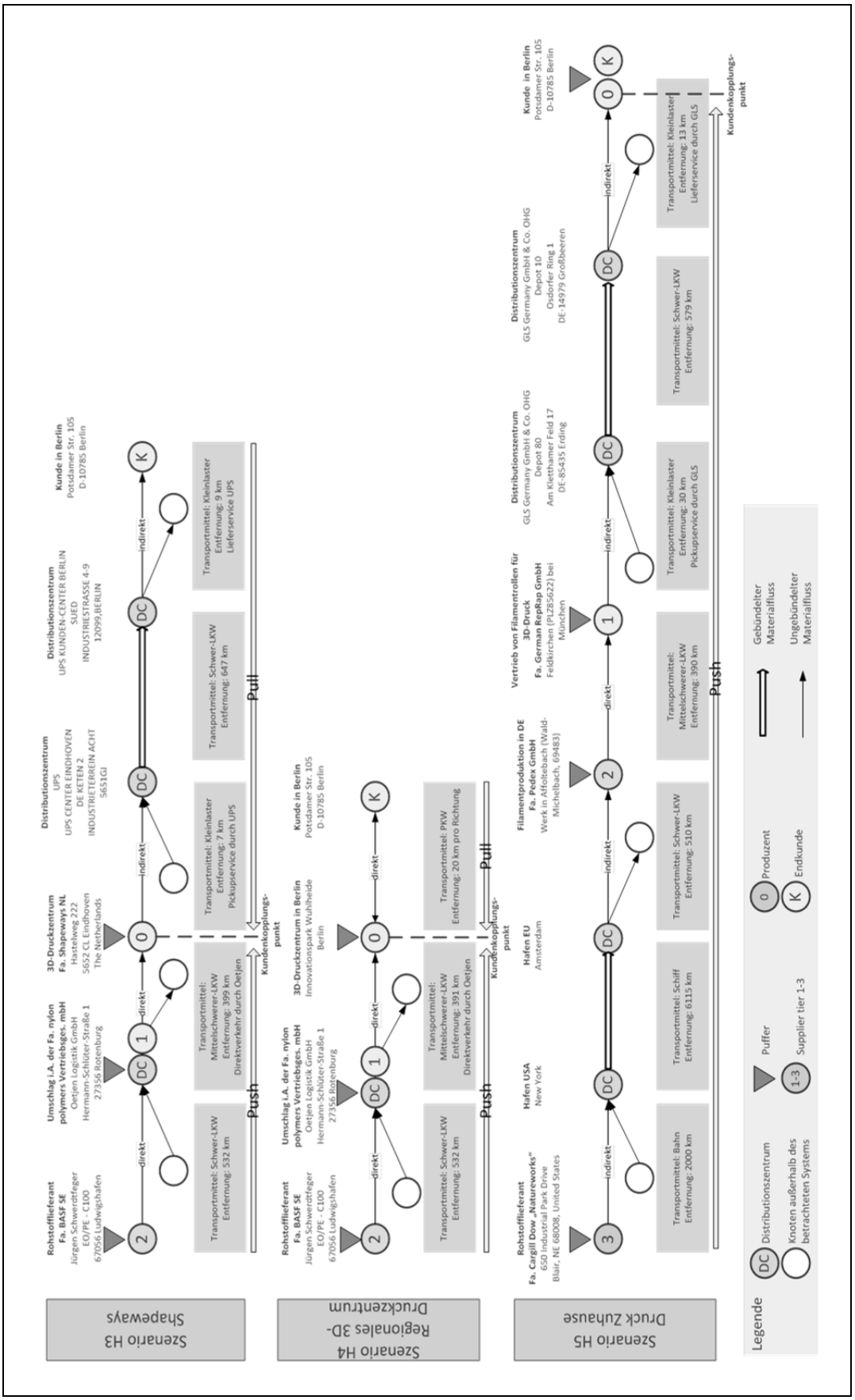


Abb. 4.4: Szenario 3-5: 3D-Druck

Die folgende Tabelle fasst die transportkettenrelevanten Eigenschaften der vorgestellten Szenarien für die Handyschalenproduktion zusammen. Die dargestellten Szenarien gliedern sich nach der dominierenden Produktionsstrategie in Make-to-Stock (Szenario 1), Customize-to-Order (Szenario 2) sowie Make-to-Order (Szenarien 3-5). Dabei lassen sich die folgenden Veränderungen der Wertschöpfungs- bzw. Transportkette beim Übergang von Szenario 1 zu den Szenarien 3 bis 5 feststellen:

– Der Kundenkopplungspunkt verschiebt sich in Richtung Endkunde.
– Das geografische Postponement verliert an Bedeutung.
– Das Ziel der Kapazitätsauslastung in der Transportkette gewinnt an Bedeutung.
– Die durchschnittliche Anzahl von Rücktransporten sinkt.

Tab. 4.2: Zusammenfassung ausgewählter Eigenschaften der Szenarien für die Handyschalenproduktion

	Massen-produktion (H1)	Mass-Customization (H2)	3D-Druck Shapeways (H3)	3D-Druck Regionales Druckzentrum (H4)	3D-Druck zu Hause (H5)
Produktions-strategie	Make to Stock	Customize to Order	Make to Order	Make to Order	Make to Stock / Make to Order
Postponement	geografisch	geografisch und fertigungs-technisch	geografisch und fertigungs-technisch	fertigungs-technisch	fertigungstech-nisch
Ziel der Steuerung in der Transport-kette	Senkung der Durchlaufzeit	Kapazitätsaus-lastung und Senkung der Durchlaufzeit	Kapazitätsaus-lastung und Senkung der Durchlaufzeit	Kapazitäts-auslastung	Kapazitätsaus-lastung
Anzahl Stufen in Supply Chain	2	3	3	3	4
Anzahl logisti-scher Knoten	7	8	6	4	8
Transportorga-nisation	indirekt	indirekt	direkt/indirekt	direkt	Indirekt
Transport-entfernung$_{ges}$	hoch	mittel	mittel	niedrig	Hoch
Ø % Rück-transporte für nicht verkaufte Waren	hoch	mittel	niedrig	niedrig	Keine

Durch 3D-Druckverfahren ist es möglich, den Kundenkopplungspunkt bis zum Kunden selbst zu verschieben (siehe Szenario 5). Damit verliert das geografische Postponement, also das Zurückhalten von Transporten bis zu einem möglichst späten Zeitpunkt, an Relevanz. Das Ziel der Steue-

rung in der Transportkette verschiebt sich in Richtung Ausnutzung von Mengendegressionseffekten bei der Auswahl der Transportmittel sowie einer möglichst hohen Konsolidierung der transportierten Mengen. Zudem werden im Fall von 3D-Druck überwiegend Rohstoffe und nicht wie im Szenario 3 Halbzeuge transportiert, wodurch die Anzahl an Wertschöpfungsstufen tendenziell abnimmt. Dies erhöht den Massenstrom und begünstigt Transporte mit massenleistungsfähigen Transportmitteln wie Bahn und Schiff, wenn entsprechende Infrastruktur wie ein Bahnanschluss gegeben ist. Einen wesentlichen Vorteil der 3D-Drucktechnologie stellt die Minimierung von Rücktransporten dar. Im Fall von Szenario 5 liegt eine Einzelfertigung durch den Endkunden vor, sodass der Bedarf an Rücktransporten gleich null ist. Im Fall der Szenarien 3 und 4 werden die Handyschalen nach dem Eingang der Kundebestellung gedruckt. Damit wird eine Über- bzw. Unterproduktion aufgrund falscher Vorhersagen über die mögliche Endkundennachfrage minimiert.

Weniger eindeutig sind die Aussagen hinsichtlich der folgenden Charakteristika

– Anzahl der Stufen in der Supply Chain
– Anzahl logistischer Knoten in der Transportkette und Transportorganisation
– Transportentfernung

Wie im Szenario 3 und 4 dargestellt, lassen sich durch den Einsatz von 3D-Drucktechnologien sowohl die Anzahl der Stufen in der Supply Chain als auch der logistischer Knoten in der Transportkette reduzieren. Eine Ausnahme stellt das Szenario 5 dar. Dies ist bedingt durch den Einsatz von 3D-Druckern für den Hausgebrauch, die im Gegensatz zu industriellen Maschinen mit Filament anstatt mit Pulver bestückt werden müssen. Damit sind heute noch zusätzliche Wertschöpfungsstufen in der Supply Chain für die Filamentherstellung und -vertrieb notwendig, die einen Einfluss auf die Länge und Komplexität der Transportkette haben. Zudem wird die Wahrscheinlichkeit für das Aufschaukeln von Beständen durch falsche Vorhersagen über die Kundennachfrage (Bullwhip-Effekt) in der Supply Chain erhöht.

Die Transportentfernung ist wiederum zum größten Teil durch den Standort der Rohstoffproduktion determiniert. Hier könnte der Einsatz von 3D-Druck zu einer Verlängerung der Transportentfernung führen, wenn bspw. die Rohstoffe für die Produktion zu Hause direkt angeliefert werden müssten. Wenn sich infolge der zunehmenden Diffusion der Technologie darüber hinaus der Bedarf nach Rohstoffen erhöht und der Markt für Filament entsprechend wächst, würde der Wettbewerb auf dem Rohstoffmarkt vermutlich zunehmend über Kostenvorteile geführt, so dass Skaleneffekte und Produktion in Niedriglohnländern an Bedeutung gewinnen könnten. Alternativ zu diesem Negativszenario lassen sich im Kontext von 3D-Druck allerdings bereits heute Ansätze beobachten, die versuchen dezentrale Rohstoffgewinnung auf regenerativer Basis oder Lösungen zur Wiedernutzung bereits verarbeiteter Rohmaterialien zu erschließen. Wird im Kontext der erstgenannten Entwicklungsoption die Entstehung großer Produktionsstandorte beispielsweise in China und damit die Notwendigkeit von zusätzlicher Überseetransporte wahrscheinlich, ließen sich durch die Stärkung des letztgenannten Pfad mittelfristig sogar positive Umwelteffekte erzielen.

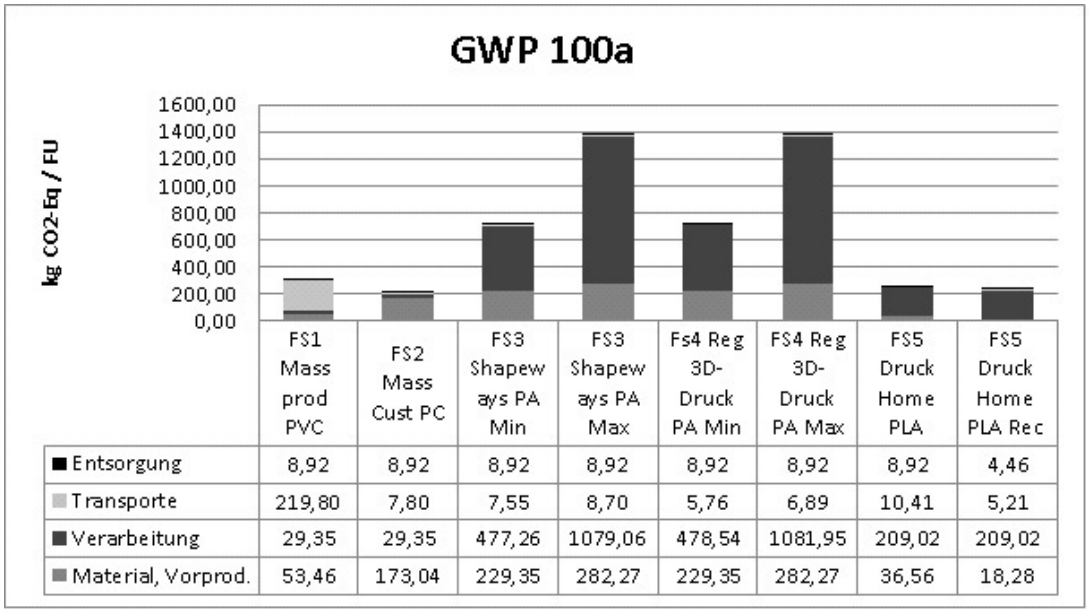
4.2.1.2 Ökobilanzierung

Grundsätzlich erfolgt im Rahmen von Ökobilanzierungen eine vergleichende Betrachtung auf der Ebene der *Nutzengleichheit*.[4] Im Fall der Handyschale geht es somit nicht nur um den Vergleich herkömmlich hergestellter Handyschalen versus durch 3D-Drucktechnologien hergestellte Handyschalen. Um eine funktionale Äquivalenz zu erzielen, muss der Bilanzierungsraum deshalb so gewählt werden, dass zusätzliche Nutzen der individuell durch 3D-Drucktechnologien hergestellten Handyschalen mit einbezogen werden können.

Der Kontrast innerhalb der ökobilanziellen Betrachtung ergibt sich aus den modellierten Produktionskonstellationen: Hier stehen sich analog zur Logistikbetrachtung die Szenarien der Massenproduktion, Mass Customization, personalisierte Produktion im Factory-Shop von „Shapeways“ sowie der individuellen Produktion in regional angesiedelten „Makerspaces“ bzw. zu Hause gegenüber. Annahmen über die jeweils zugeordneten Produktionsverfahren orientieren sich an diesen Konstellationen und basieren für die Szenarien der Massenproduktion und Mass Customization auf konventionellen Spritzgussverfahren, im Fall der personalisierten und regional-individualisierten Produktion auf professionellen Laser-Sinter-Geräten sowie auf handelsüblichen 3D-Druckern im Fall der heimischen Herstellung der Handyschale. Analytische Schärfe gewinnen die Szenarien durch die Variation von Parametern innerhalb der Szenarien, die beispielsweise empirisch beobachtbare Bandbreiten im Herstellungsprozess aufgreifen (vgl. Fußnote 2, 3 und 4).

Bei gleicher funktioneller Einheit für alle Varianten konnte in der ökobilanziellen Betrachtung festgestellt werden, dass die unterschiedlichen Umweltwirkungen zumeist durch den Energiebedarf für die Verarbeitung sowie durch den Aufwand für die Vorproduktionen des eingesetzten Materials gekennzeichnet sind. Transporte sowie Entsorgungsprozesse besitzen nur einen sehr minimalen Einfluss auf die Ökobilanz, außer es handelt sich um Flugtransporte wie beim Szenario der Massenproduktion, in dem sich außerdem die höhere benötigte Materialmenge stark auf die Ökobilanz auswirkt. Als weiterer allgemeiner Befund zeigt sich, dass 3D-Druck in einem professionellen Laser-Sinter-Gerät mit einem bedeutend höheren Energiebedarf verbunden ist als der 3D-Druck im heimischen Kontext. Exemplarisch hierfür wird kann das Treibhauspotenzial der untersuchten Szenarien in der folgenden Abbildung stehen:

[4] Mit Blick auf die Reichweite der Transformation mit Blick auf die Reduktion der Ressourcen- und Energieströme, kann der Bezugspunkt der Ökobilanzierung, also die Nutzengleichheit, nur begrenzt überzeugen.

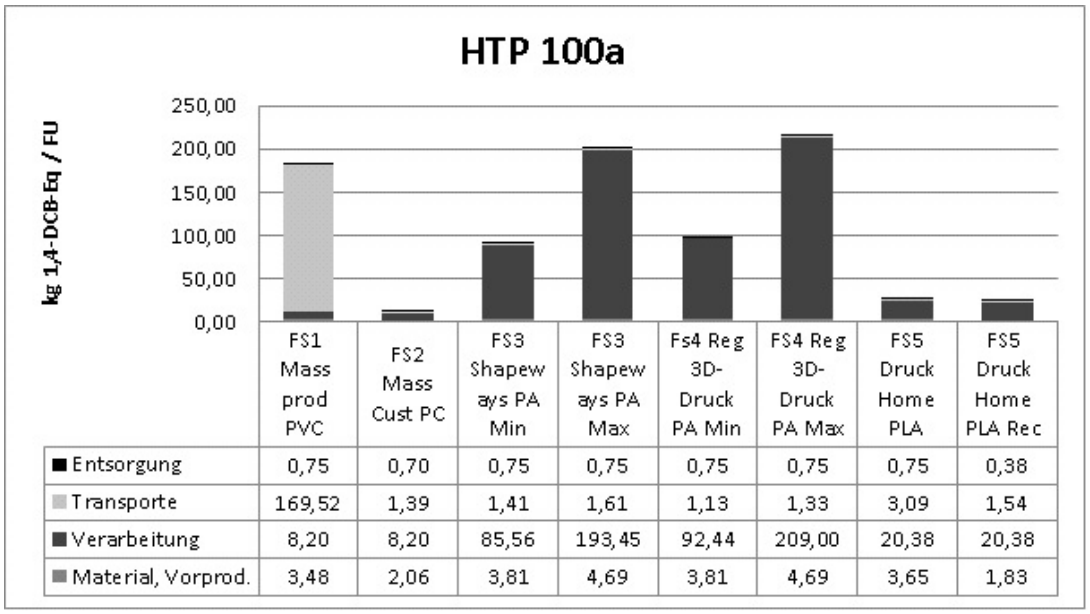


	FS1 Mass prod PVC	FS2 Mass Cust PC	FS3 Shapeways PA Min	FS3 Shapeways PA Max	Fs4 Reg 3D-Druck PA Min	FS4 Reg 3D-Druck PA Max	FS5 Druck Home PLA	FS5 Druck Home PLA Rec
Entsorgung	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	8,92	4,46
Transporte	219,80	7,80	7,55	8,70	5,76	6,89	10,41	5,21
Verarbeitung	29,35	29,35	477,26	1079,06	478,54	1081,95	209,02	209,02
Material, Vorprod.	53,46	173,04	229,35	282,27	229,35	282,27	36,56	18,28

Abb. 4.5: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion

Deutlich wird außerdem, dass sich die erwartbaren Umweltwirkungen der zu Hause gedruckten Handyschale im Vergleich mit der konventionellen Massenfertigung (Massenproduktion/ Mass Customization) in der gleichen Größenordnung bewegen. Die betrachtete Variante der heimischen Produktion zeichnet sich jedoch durch den optionalen Einsatz von regenerativem Kunststoff als Ausgangsmaterial der Herstellung aus. So kann der höhere Herstellungsaufwand des 3D-Drucks in einigen Aspekten durch den geringen Anteil an Umweltwirkungen durch die Vorproduktion des PLA-Materials wettgemacht werden. Diese Tendenz wird noch verstärkt, wenn ein zusätzlich zu realisierendes Materialrecycling unterstellt wird. Kann des Weiteren unterstellt werden, dass durch den 3D-Druck der Produktnutzen gegenüber herkömmlichen Produkte beispielsweise durch eine verlängerte absolute Produktnutzungsdauer verbessert wird, führt dies in der Ökobilanz zu weiteren positiven Effekten. Sollten weiterführende Erfahrungen in der individuellen Nutzung von 3D-Druckern jedoch zeigen, dass Produkte im Gegenteil häufiger gedruckt werden, kehrt sich diese Tendenz natürlich um.

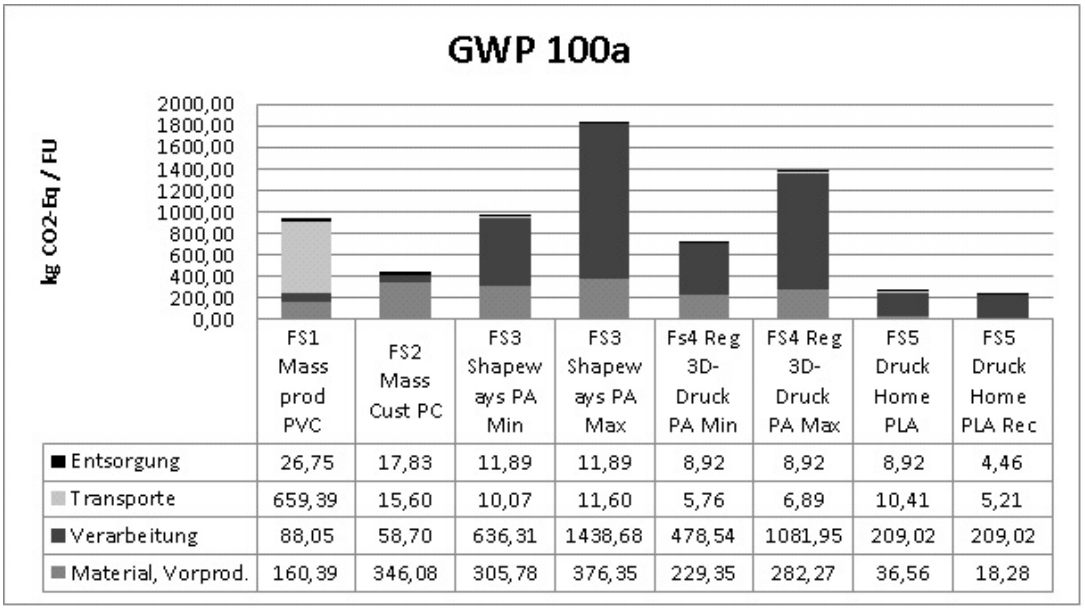
Die dargestellten Verhältnisse zeigen sich in der Tendenz in den meisten der untersuchten Umweltwirkungen. Eine Verschiebung tritt bei den Umweltwirkungen ein, deren Potenziale besonders sensibel auf Flugtransporte und deren Effekte wirken. Bei diesen Umweltwirkungskategorien fällt das Szenario Massenproduktion noch weiter gegenüber anderen zurück. Beispielhaft wird dies für das Humantoxizitätspotenzial dargestellt:



	FS1 Mass prod PVC	FS2 Mass Cust PC	FS3 Shapeways PA Min	FS3 Shapeways PA Max	Fs4 Reg 3D-Druck PA Min	FS4 Reg 3D-Druck PA Max	FS5 Druck Home PLA	FS5 Druck Home PLA Rec
Entsorgung	0,75	0,70	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,38
Transporte	169,52	1,39	1,41	1,61	1,13	1,33	3,09	1,54
Verarbeitung	8,20	8,20	85,56	193,45	92,44	209,00	20,38	20,38
Material, Vorprod.	3,48	2,06	3,81	4,69	3,81	4,69	3,65	1,83

Abb. 4.6: Humantoxizitätspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion

Kann des Weiteren unterstellt werden, dass durch den 3D-Druck der Produktnutzen gegenüber herkömmlichen Produkte beispielsweise durch eine verlängerte absolute Produktnutzungsdauer verbessert wird, führt dies in der Ökobilanz zu weiteren positiven Effekten (exemplarisch für diesen Sachverhalt soll wieder die Darstellung des Treibhauspotenzials stehen, siehe Abb. 5.5). Sollten weiterführende Erfahrungen in der individuellen Nutzung von 3D-Druckern jedoch zeigen, dass Produkte im Gegenteil häufiger gedruckt werden, kehrt sich diese Tendenz natürlich um.



	FS1 Mass prod PVC	FS2 Mass Cust PC	FS3 Shapeways PA Min	FS3 Shapeways PA Max	Fs4 Reg 3D-Druck PA Min	FS4 Reg 3D-Druck PA Max	FS5 Druck Home PLA	FS5 Druck Home PLA Rec
Entsorgung	26,75	17,83	11,89	11,89	8,92	8,92	8,92	4,46
Transporte	659,39	15,60	10,07	11,60	5,76	6,89	10,41	5,21
Verarbeitung	88,05	58,70	636,31	1438,68	478,54	1081,95	209,02	209,02
Material, Vorprod.	160,39	346,08	305,78	376,35	229,35	282,27	36,56	18,28

Abb. 4.7: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion bei verlängerter Produktnutzungsdauer

In der Summe wird deutlich, dass die Dezentralisierung der Produktion am Beispiel der Handyschale keineswegs per se zu einer Verminderung der Ressourcenverbräuche und der Umweltbelastungen beiträgt, dies unabhängig von der jeweiligen Dezentralisierungsform. Wesentlichen Einfluss haben hingegen die eingesetzten Technologien (die je nach Verwendungszweck nicht beliebig sind) und die Art des Transportes, also insbesondere des Lufttransportes. Dies bedeutet letztlich auch, dass Ansätze wie die von shapeways mit Blick auf die Umweltwirkungen keineswegs vorteilhaft sein müssen. Die Vorteilhaftigkeit der Produktion zu Hause mit dem 3D-Drucker ist nur dann realisierbar, wenn einerseits bestimmte, bio-basierte Inputmaterialien genutzt werden und wenn zugleich eine längere Produktnutzungsdauer realisiert werden kann. Mithin wird deutlich, dass Entlastungspotenziale weniger in der Technik selbst begründet liegen, als in dem individuellen Verhalten der Nutzer der produzierten Güter.

4.2.2 Fallbeispiel: Flugzeugersatzteil

4.2.2.1 Logistikbetrachtung

Im Kontext um die Potenziale des 3D-Drucks werden gerade auch Anwendungen im Bereich der Raum- und Luftfahrt dargestellt. Herausgestellt werden dabei in der Regel zwei Aspekte: Auf der einen Seite ermöglicht 3D-Druck, dass Komponenten der Luftfahrzeuge (Ersatzteile u. a.) vor-Ort produziert werden können und sich im Falle eines Defekts die Reparaturkosten durch verkürzte Standzeiten und die unmittelbare Verfügbarkeit spezialisierten Teile deutlich reduziert lassen. Auf der anderen Seite ermöglichen es die neuen Produktionsformen bisher nicht realisierbare Optionen für Leichtbau, indem Strukturen geschaffen werden können, die bei gleicher und höherer Qualität weniger Material bedürfen und insbesondere in der Nutzungsphase zu einer Senkung des Energie- bzw. Treibstoffverbrauchs führen. Dies einbeziehend, wurden im Fallbeispiel für das Produkt

„Flugzeugersatzteil“ in Abhängigkeit von der raum-zeitlichen Organisation der Transportkette zwei Szenarien dargestellt:

Szenario 1 stellt eine zentralisierte Produktionsform von Ersatzteilen für die Flugindustrie dar. Die Teile werden wahlweise in Klein- oder Großserien für einen anonymen Markt (make-to-stock) von der Firma MIT Engineering in Ohio, USA (0), hergestellt und an ein zentrales Logistikzentrum in Hamburg, Deutschland, verschickt. Von dem Zentrallager in Hamburg wird die weltweite Versorgung mit Ersatzteilen sichergestellt. Der Kundenkopplungspunkt befindet sich im Zentrallager. Damit liegt ein geografisches Postponement vor. Im Zentrallager werden die Teile zwischengepuffert und im Bedarfsfall an den jeweiligen Standort verschickt. Das Ziel der Steuerung der Transportkette ist die Reduzierung der Durchlaufzeiten, dadurch kommt das Flugzeug als Transportmittel zum Einsatz. Die Transportentfernung ist relativ zum Szenario 2 hoch. Der Transport erfolgt sowohl indirekt auf der Pushseite als auch direkt auf der Pullseite. Die Auslastung der Transportmittel wird durch die Bündelung auf der Push-Seite gefördert. Demgegenüber stehen die Direkttransporte auf der Pull-Seite der Transportkette.

Im *Szenario 2* ist eine dezentrale Form der Produktion des Flugzeugersatzteils dargestellt. Ein lokaler Rohstofflieferant in Shenzhen (1) versorgt die Lufthansa Technik Shenzhen (0) mit den nötigen Rohstoffen für die Ersatzteilproduktion. Die Flugzeugersatzteile werden überwiegend im Bedarfsfall (Make-to-Order) produziert, um die Lagerungskosten für kostenintensive Ersatzteile mit einer stark schwankenden Nachfrage zu reduzieren. Damit liegt ein fertigungstechnisches Postponement vor. Der Kundenkopplungspunkt befindet sich beim Endkunden (0). Das zentrale Ziel der Steuerung der Transportkette ist die Kapazitätsauslastung. Der Transport erfolgt ausschließlich direkt und die Transportentfernung ist relativ kurz im Vergleich zum Szenario 1.

In Abbildung 5.8 sind zwei Szenarien für das Produkt „Flugzeugersatzteil“ in Abhängigkeit von der raum-zeitlichen Organisation der Transportkette dargestellt.

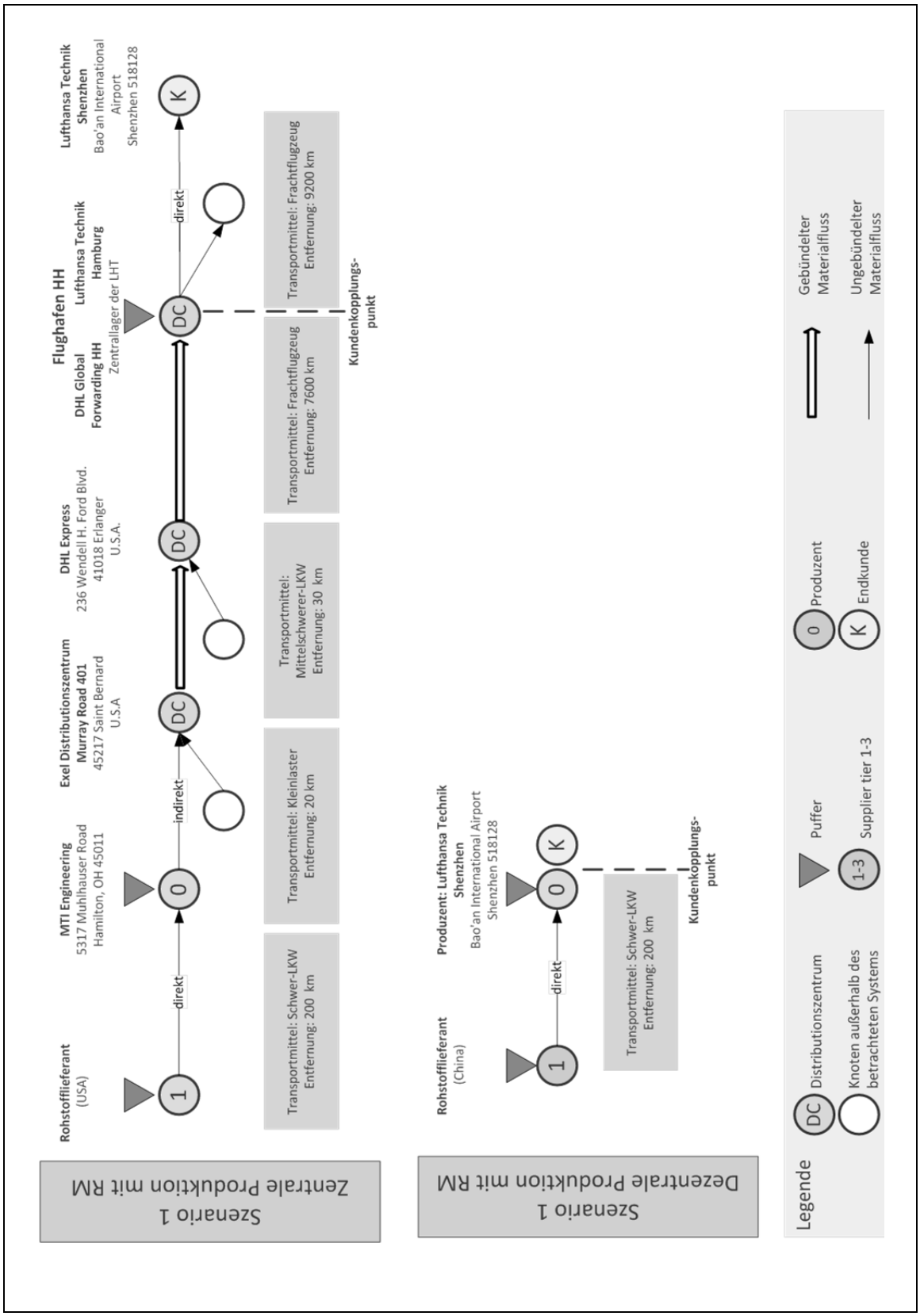


Abb. 4.8: Szenarien für das Produkt „Flugzeugersatzteil" in Abhängigkeit der raum-zeitlichen Organisation der Transportkette

In der nachfolgenden Tabelle sind die logistisch relevanten Ausprägungen der vorgestellten Szenarien für das „Flugzeugersatzteil“ zusammengefasst.

Tab. 4.3: Logistisch relevante Ausprägungen der Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion

	Szenario 1 Zentrale Produktion mit RM	Szenario 2 Dezentrale Produktion mit RM
Produktionsstrategie	Make to Stock	Make to Order
Postponement	Geografisch	Fertigungstechnisch
Ziel der Steuerung in der Transportkette	Senkung der Durchlaufzeit	Erhöhung der Kapazitätsauslastung
Anzahl Stufen in Supply Chain	2	2
Anzahl logistischer Knoten	6	2
Transportorganisation	indirekt/ direkt	direkt
Transportentfernung ges.	hoch	niedrig
Ø % Rücktransporte für nicht verkaufte Waren	mittel	gering

Auf Basis der obigen Tabelle sind eindeutige logistische Auswirkungen beim Übergang von einer zentralen Produktion (Szenario 1) zu einer dezentralen Produktion (Szenario 2) erkennbar:

– Das geografische Postponement verliert an Bedeutung.
– Die Zielstellung bei der Steuerung der Transportkette verschiebt sich in Richtung Kapazitätsauslastung.
– Die Anzahl logistischer Knoten nimmt bei gleichbleibender Anzahl von Wertschöpfungsstufen ab.
– Die Transportorganisation ist eher direkt.
– Die Transportentfernung sinkt deutlich.
– Die Anzahl von Rücktransporten nimmt ab.

Im Szenario 2 kommt es im Vergleich zu Szenario 1 zu einer starken Verkürzung der Transportkette auf der Relation zwischen dem Rohstofflieferanten und dem Produzenten. Das geografische Postponement aus dem Szenario 1 wird im Szenario 2 durch ein fertigungstechnisches Postponement ersetzt. Es werden keine fertigen Komponenten mit schnellen Transportmitteln über hohe Entfernungen transportiert. Der Transport im Szenario 2 ist zeitunkritisch, da dieser vor dem Kundenkopplungspunkt angesiedelt ist. Zudem können größere Losgrößen transportiert und zwischengepuffert werden, da die Kapitalbindungskosten des Rohstoffs niedrig sind. Zudem wird die

Gefahr von Rücktransporten im Szenario 2 aufgrund der Make-to-Order-Produktionsstrategie auf ein Minimum reduziert.

4.2.2.2 Ökobilanzierung

Wie in der logistischen Betrachtung gezeigt wurde, besitzt die Minimierung der Standzeiten bei Flugzeugreparaturen aufgrund der hohen Kosten eine hohe Priorität, so dass der Beschaffungslogistik für entsprechende Flugzeugersatzteile eine große Bedeutung zukommt. Anhand der Ersatzteilbeschaffung werden in der ökobilanziellen Bewertung die Umweltwirkungen unterschiedlicher Herstellungstechnologien (herkömmliche Produktionstechnologie versus generative Metal-Laser-Sintering-Technologie (MLS)) unter Einbeziehung von spezifischen Logistikketten untersucht. Der Bilanzierungsraum umfasst dabei die Herstellung eines Flugzeugbauteils aus Aluminium mit einem Gewicht von 1kg (funktionelle Einheit, konventionell) inklusive der Vorketten sowie der notwendigen Transportaufwendungen. Um die Möglichkeiten der MLS-Technologie zur Realisierung von Leichtbaustrukturen (i. S. d. Fertigung eines Bauteils bei gleicher Funktion aber geringerem Gewicht) zu untersuchen, wurde dieser Aspekt in einer Variante zusätzlich berücksichtigt. Da Leichtbauweise insbesondere beim Flugzeug auch zu einem zusätzlichen Nutzen in der *Gebrauchsphase* führt, wurde dieser Sachverhalt in einem zusätzlichen Szenario untersucht. Einen Überblick über die für die Ökobilanzierung modellierten Varianten der Szenarien 1 und 2 zeigt die Folgende Tabelle:

Tab. 4.4: Rahmendaten für die betrachteten Varianten zur Herstellung eines Flugzeugersatzteils

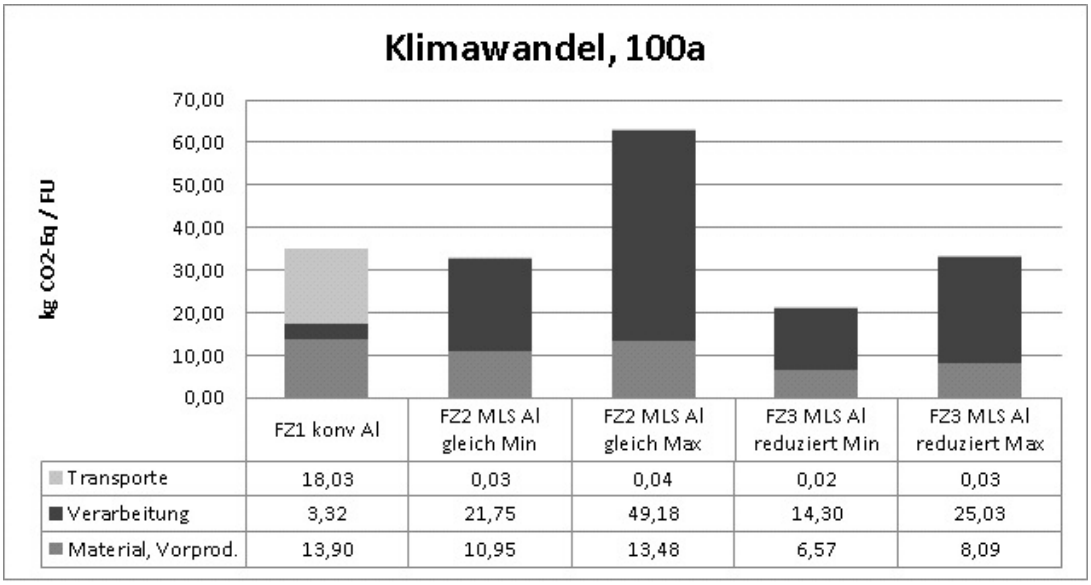
FZ1 konv Al	– Konventionelle Herstellung über Aluminimguss und Metallbearbeitung; – Annahmen: Gussausbeute 66,66%, 10% Bearbeitungsrückstände
FZ2 MLS Al gleich Min	– Herstellung mittels Metall Laser Sintern[5], Optimalvariante: geringer EE-Verbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad
FZ2 MLS Al gleich Max	– Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch und niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad
FZ3 MLS Al red Min	– Bionisches Design / optimiertes Design führt zu einer Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg) – Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Optimalvariante: geringer EE-Verbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad
FZ3 MLS Al red Max	– Bionisches Design / optimiertes Design führt zu einer Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg) – Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch und niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad
FZ4 MSL Al red + Nutzen Min	– Bionisches Design / optimiertes Design führt zu einer Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg); zusätzlich Einbeziehung des Umweltnutzens (Kerosineinsparung, insgesamt 1500kg) in der Gebrauchsphase[6]

[5] Quelle: Atkins 2007

[6] Quelle: Lufthansa 2012; Gmelin et al 2008

	– Herstellung mittels Metall Laser Sintern (Atkins 2007), Optimalvariante: geringer EE-Verbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad
FZ4 MSL Al red + Nutzen Max	– Bionisches Design / optimiertes Design führt zu einer Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg); zusätzlich Einbeziehung des Umweltnutzens (Kerosineinsparung, insgesamt 1500kg) in der Gebrauchsphase – Herstellung mittels Metall Laser Sintern (Atkins 2007), Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch und niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad

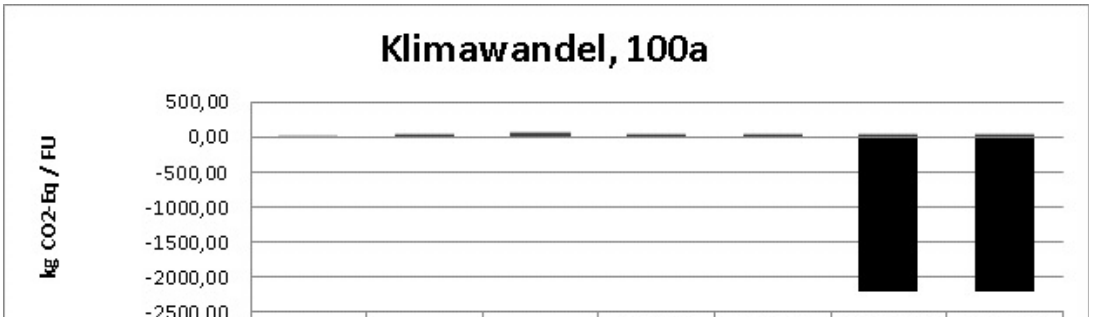
Die Ökobilanz für die Variante der herkömmlichen Fertigung (Aluminiumguss und Metallbearbeitung) sowie die damit verbundenen Umweltwirkungen werden in dieser Fallbetrachtung einerseits durch den Transportaufwand (insbesondere den Flugtransport) und andererseits durch den Aufwand der Vorkette des Aluminiums (d.h. die Aufwendungen zur Herstellung des Aluminiums) bestimmt. Die Verarbeitung zum Flugzeugersatzteil ist demgegenüber kein großer Einflussfaktor. Bei den anderen Szenarien ist die Vor-Ort-Herstellung des Flugzeugersatzteils durch die MLS-Technologie der größte Einflussfaktor auf die Umweltwirkungen. Der Einfluss des Materialtransports ist hingegen bei diesen Varianten vernachlässigbar gering. Die quantitativen Unterschiede zwischen den betrachteten Szenarien, die auch für die anderen untersuchten Umweltwirkungen gelten, werden exemplarisch beim Treibhauspotenzial dargestellt:



	FZ1 konv Al	FZ2 MLS Al gleich Min	FZ2 MLS Al gleich Max	FZ3 MLS Al reduziert Min	FZ3 MLS Al reduziert Max
Transporte	18,03	0,03	0,04	0,02	0,03
Verarbeitung	3,32	21,75	49,18	14,30	25,03
Material, Vorprod.	13,90	10,95	13,48	6,57	8,09

Abb. 4.9: Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion

Eine besondere Rolle spielt die Variante, bei der die Gebrauchsphase des generativ gefertigten Leichtbauteils untersucht wurde, da hier die Annahme einer realisierten Gewichtseinsparung von 40% auch als Umweltnutzen in der Gebrauchsphase Berücksichtigung findet. So überwiegt die durch das gewichtsoptimierte Design erzeugte Einsparung von Kerosin die Aufwendungen zur Herstellung des Flugzeugersatzteils um ein Vielfaches.



	FZ1 konv Al	FZ2 MLS Al gleich Min	FZ2 MLS Al gleich Max	FZ3 MLS Al reduziert Min	FZ3 MLS Al reduziert Max	FZ4 MLS Al red + Nutzen Min	FZ4 MLS Al red + Nutzen Max
Nutzen						-2195,34	-2195,34
Transporte	18,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03
Verarbeitung	3,32	21,75	49,18	14,30	25,03	14,30	25,03
Material, Vorprod.	13,90	10,95	13,48	6,57	8,09	6,57	8,09

Abb. 4.10: Einberechnung des Nutzens in der Gebrauchsphase auf die Treibhauspotenziale der verschiedenen Szenarien für die Flugzeugersatzteilproduktion

Unter Einrechnung des Nutzens in der Gebrauchsphase ergibt sich der Faktor von ca. 60 gegenüber den anderen Szenarien. In diesem Kontext ist also höchst relevant, inwiefern es gelingt, die Potenziale generativer Fertigungsverfahren mit Blick auf Materialeinsparung zu erschließen. Je nachdem sind erhebliche Umweltentlastungen zu erwarten, die sich vor allem in den Emissionseinsparungen während der Nutzungszeit des Flugzeugteils begründen, aber auch bereits durch den vermiedenen Lufttransport des Ersatzteils erschlossen werden können.

Aus den Auswertungen zu den Umweltwirkungen der verschiedenen Szenarien lassen sich zusammenfassend folgende Trendaussagen ableiten:

– Werden gleiche funktionelle Einheiten gewählt, ergeben sich keine eindeutigen Vorteile für das Flugzeugersatzteil hergestellt durch MLS-Technologie.
– Aus wirtschaftlichen Gründen ist die dezentrale Produktion des Ersatzteils höchst attraktiv, da einerseits Lagerkosten eingespart und andererseits ggf. Wartezeiten bis zum Eintreffen des Ersatzteils deutlich verkürzt werden können.
– Kann aber durch MLS ein zusätzlicher Nutzen für die Gebrauchsphase durch Minimierung des notwendigen Gewichts realisiert werden, ergibt sich ein großer Hebel für eine verbesserte Ökobilanz.
– Transportaufwendungen (letztlich nur die Flugtransporte) haben nur bei der konventionellen Variante einen großen Einfluss auf die verschiedenen Umweltwirkungen.

4.3 Diskussion: Umweltwirkungen generativer Fertigungsprozesse

Was den Stand der Forschung betrifft, werden dezentrale Produktionsmuster im Allgemeinen sowie die generativen Fertigungsverfahren im Speziellen mit Blick auf die möglichen Umweltentlastungseffekte als Hoffnungsträger für zukunftsfähige Produktionssysteme angesehen. Generelle Aussagen über den tatsächlichen Beitrag dieser Technologien sind allerdings nur sehr begrenzt oder in Form von „Potenzialen“ möglich. Dies liegt zum einen an der technologischen Vielfalt der generativen Verfahren und zum anderen an den vollkommen unterschiedlichen Nutzungskontexten, in denen sich entsprechende Geräte einbetten.

Darüber hinaus ist die Diskussion um die Umweltrelevanz generativer Verfahren bislang überwiegend geprägt von eher abstrakten Analysen, die typisierend aufzeigen, welche Unterschiede in den Produktionsprozessen zwischen den neuen und den herkömmlichen Verfahren identifiziert werden können. Dabei ist vielfach festzustellen, dass die Analysen meist auf Idealtypen basieren und mit der konkreten Nutzungspraxis insofern nur begrenzt übereinstimmen. Wie die Aufarbeitung des Forschungsstandes zeigt, existiert mit Blick auf die Umwelt- und Gesundheitswirkungen der generativen Verfahren nach wie vor ein erheblicher Bedarf an fundierten Studien, die eine Vergleichbarkeit zwischen einzelnen generativen Verfahren sowie zwischen generativen und subtraktiven Verfahren ermöglichen. Dabei sind allgemeinere Herausforderungen wie beispielsweise Reboundeffekte oder auch die Frage, welche Dynamiken sich mit der Möglichkeit der Produktion zu Hause ergeben in gleicher Weise relevant.

Im Rahmen der Studie wurden daher konkrete Szenarien aktuell denk- und machbare Anwendungskonstellationen von 3D-Druckern entworfen, die im Vergleich zu etablierten Verfahren hinsichtlich ihrer Umwelteffekte bewertet wurden. Die für die Untersuchungen erhobenen und genutzten Daten sowie deren Datenqualität können als gut eingeschätzt werden. Aus der Konzeption der Untersuchung ergeben sich im Vergleich zum Stand der Forschung robuste Ergebnisse, die wie am Beispiel der Handyschale auch Option des Drucks zu Hause untersuchen. Was die logistische Bewertung betrifft, lassen sich beim Übergang von eher zentralisierten, industriellen zu radikal dezentralisierten Wertschöpfungsmustern im benannten Beispiel die folgenden Veränderungen der Wertschöpfungs- bzw. Transportkette feststellen:

- Der Kundenkopplungspunkt verschiebt sich in Richtung Endkunde.
- Das geografische Postponement verliert an Bedeutung.
- Das Ziel der Kapazitätsauslastung in der Transportkette gewinnt an Bedeutung.
- Die durchschnittliche Anzahl von Rücktransporten sinkt.

Die Ökobilanzierung zeigt am Beispiel der Handyschale, dass die Dezentralisierung der Produktion keineswegs per se zu einer Verminderung der Ressourcenverbräuche und der Umweltbelastungen beiträgt, dies unabhängig von der jeweiligen Dezentralisierungsform. Wesentlichen Einfluss haben hingegen die eingesetzten Technologien (die je nach Verwendungszweck nicht beliebig sind) und die Art des Transportes, also insbesondere des Lufttransportes. Dies bedeutet letztlich auch, dass hybride Ansätze mit Blick auf die Umweltwirkungen keineswegs vorteilhaft sein müssen. Die Vorteilhaftigkeit der Produktion zu Hause mit dem 3D-Drucker ist nur dann realisierbar, wenn einerseits bestimmte, bio-basierte Inputmaterialien genutzt werden und wenn zugleich eine längere Produktnutzungsdauer realisiert werden kann.

Richtet sich das technologisch avancierte Beispiel des Flugzeugersatzteils, werden beim Übergang von einer zentralen Produktion zu einer dezentralen Produktion folgende logistische Auswirkungen erkennbar:

– Das geografische Postponement verliert an Bedeutung.
– Die Zielstellung bei der Steuerung der Transportkette verschiebt sich in Richtung Kapazitätsauslastung.
– Die Anzahl logistischer Knoten nimmt bei gleichbleibender Anzahl von Wertschöpfungsstufen ab.
– Die Transportorganisation ist eher direkt.
– Die Transportentfernung sinkt deutlich.
– Die Anzahl von Rücktransporten nimmt ab.

Aus den ökobilanziellen Auswertungen der verschiedenen Szenarien am Beispiel des Flugzeugersatzteils lassen sich zusammenfassend folgende Trendaussagen ableiten:

– Werden gleiche funktionelle Einheiten gewählt, ergeben sich keine eindeutigen Vorteile für das generativ hergestellte Flugzeugersatzteil.
– Aus wirtschaftlichen Gründen ist die dezentrale Produktion des Ersatzteils höchst attraktiv, da einerseits Lagerkosten eingespart und andererseits ggf. Wartezeiten bis zum Eintreffen des Ersatzteils deutlich verkürzt werden können.
– Kann aber durch generative Fertigung ein zusätzlicher Nutzen für die Gebrauchsphase durch Minimierung des notwendigen Gewichts realisiert werden, ergibt sich ein großer Hebel für eine verbesserte Ökobilanz.
– Transportaufwendungen (letztlich nur die Flugtransporte) haben nur bei der konventionellen Variante einen großen Einfluss auf die verschiedenen Umweltwirkungen

Wie die Fallstudien in unserer eigenen Betrachtung herausstellen, lassen sich durchaus plausible Szenarien identifizieren, in denen die Dezentralisierung der Produktion sowie die spezifischen Charakteristika der generativen Fertigungsverfahren zu erwartbaren Umweltentlastungen führen. Die zentrale Voraussetzung hierfür liegt jedoch in einer bewussten Gestaltung der Rahmenbedingungen einer durch generative Verfahren umgesetzten Produktion. So müssen Variablen wie der Grad der räumlichen Dezentralisierung, die Wahl der Ausgangsmaterialien sowie deren Einbettung in die Wertschöpfungskette neben ihrer jeweiligen Rentabilität insbesondere auch hinsichtlich der daraus resultierenden Umwelteffekte reflektiert werden, um die Nachhaltigkeitspotenziale der generativen Verfahren in konkreten Anwendungskonstellationen auch tatsächlich zu erschließen.

Die analysierten Beispiele machen ebenfalls deutlich, dass Umweltentlastungen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängen. Die generativen Fertigungsverfahren können insbesondere da punkten, wo mit diesen Verfahren Material eingespart werden kann und dies sich bspw. in der Nutzungsphase durch verringerte Verbräuche bemerkbar macht. Das Beispiel Ersatzteil in der Luftfahrt macht dies überdeutlich. In dem Fallbeispiel Handyschale, also einem konsumnahen Produkt, sind mögliche Umweltentlastungen davon abhängig, inwieweit Transporte via Flugzeug eingespart werden können, welche Art des Produktionsverfahrens angewendet werden und mit Blick auf den 3D-Drucker, welche Materialien zum Einsatz kommen. Die durchaus überzeugenden Ergebnisse des Drucks von Handyschalen zu Hause (oder auch im lokalen Druckzentrum) hängen wenig über-

raschend auch davon ab, ob oder inwiefern das individuell gefertigte Produkt, bspw. auf Grund länger genutzt wird als herkömmliche Massenware.

Davon ausgehend wird evident, dass es sowohl gesellschaftlicher Leitbilder für eine nachhaltige Technologieentwicklung und -nutzung als auch konkreter Instrumente bedarf, um diese Leitbilder in Nutzungskontexten handlungsrelevant umzusetzen. Ähnlich wie beispielsweise im Bereich der Chemie, wo Leitbilder der „Green Chemistry“ eine gewisse Orientierungsfunktion haben, erscheint es unabdingbar, relevante Stellschrauben auch im Bereich der neuen Fertigungstechnologien zu justieren. Mit Blick auf die prospektive Entwicklung und Einbettung von generativen Fertigungsverfahren könnte in dieser Hinsicht beispielsweise versucht werden, einen Pfad des „Sustainable Manufacturing“ zu kreieren, an dem sich die Nutzungspraxis der 3D-Drucker zukünftig orientieren kann. Dies erscheint umso wichtiger, da der bisherige Stand der Forschung nicht unbedingt nahelegt, dass entsprechende Technologien ihre nachhaltigkeitsbezogenen Potenziale „von sich aus“ abrufen werden. Aspekte, die in diesem Kontext prospektiver Nutzungspraktiken von hoher Relevanz sind, betreffen insbesondere die stofflichen Grundlagen der Produktion, Fragen der Wiederverwendungsmöglichkeiten und Abbaubarkeit sowie die Entwicklung von Rahmenbedingungen für den sinnvollen Einsatz der Technologie beispielsweise über eine modulare und „reparaturfreundliche“ Produktgestaltung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Wirtschaft ist im Wandel. Informations- und Kommunikationstechnologien bringen weitreichende Veränderungen mit sich, die im Kern auch die Strukturen von Produktion und Konsum betreffen. Es wurde gezeigt, dass die Referenzen für die Gestaltung von Produktionssystemen komplexer werden und neben traditionellen Effizienzkriterien auch Ansprüchen an Adaptivität, Flexibilität, Nachhaltigkeit und Kundennähe gerecht werden müssen. Wesentlich ist dabei, dass die Umsetzung dezentraler Koordinationsmuster zunehmend erleichtert wird und sich in vielfältigen Formen ausprägt. Das relativiert zunächst die Rolle von großen Unternehmen für Innovation, Produktion und Konsum und stellt darüber hinaus auch die konzeptionelle Umsetzung von Wertschöpfungsprozessen vor neue Herausforderungen.

Ausgehend von dem breiten Spektrum neuer Konstellationen wurden im Rahmen der vorliegenden Analyse zwei typisierte Wertschöpfungsmuster kontrastierend gegenüber gestellt. Der unternehmenszentrierte Pfad der „Industrie 4.0“ soll an dieser Stelle nur gestreift werden, da damit zwar auch erhebliche Wandlungsprozesse der Produktion verbunden sind, die Aussichten, Transformationspotenziale und Herausforderungen im Kontext der kollaborativen Gestaltungsoptionen von Produktion und Konsum jedoch weitreichender erscheinen. Es soll jedoch nicht unterschlagen werden, dass die technologischen Weiterentwicklungen der Industrie 4.0, die am Beispiel der dezentralen und generativen Fertigung von Flugzeugersatzteilen im Rahmen unserer Ökobilanzierung berücksichtigt wurden, durchaus dazu beitragen können, positive Umwelteffekte zu erzielen. Im Rahmen der zukünftigen Auseinandersetzung mit dem Thema sollte dieser Pfad also keinesfalls vernachlässigt werden.

Beispielhaft für die Alternativen industrieller, unternehmenszentrierter Wertschöpfung fokussieren die folgenden zusammenfassenden Bemerkungen jedoch auf dezentrale, kollaborative Produktionsmuster, da diese eine Vielzahl transformativer Potenziale in sich vereinen. Getragen werden daran geknüpfte Formen der Wertschöpfung von drei strukturellen Trends, nämlich (1) offenen In-

novationsdynamiken, (2) dezentraler Peer Production im digitalen Raum und (3) einer Renaissance der DIY-Kultur:

(1) Von Unternehmen werden in zunehmender Weise Wissen und Ressourcen von Akteuren außerhalb der eigenen Organisationsgrenzen integriert. Eine solche „Open Innovation" (Chesbrough 2008) meint nicht nur, dass Partner und Zulieferer in einen Prozess der Co-Evolution einsteigen, sondern auch, dass über die Welt und das Internet verstreutes Wissen für die Lösung lokaler Probleme angezapft wird (Tapscott / Williams 2007). Nutzer/innen treten dabei aus ihrer Rolle als Konsument/innen hinaus und werden zu Produzent/innen bzw. zu „Prosumenten" (Hellmann 2010). Soziale Medien und die Emergenz einer kollaborativen Ökonomie stellen neue Chancen und Herausforderungen für Unternehmen dar und provozieren die Veränderung von Geschäftsmodellen – Produktion und Konsum werden persönlicher und community-zentrierter sowie im besten Fall zugleich sozial-ökologisch eingebettet.

(2) Bottom-Up bilden sich heterarchische Netzwerke, in denen Formen kollaborativer Zusammenarbeit von Nutzer/innen untereinander stattfinden (Al-Ani 2013; Benkler 2006; Zuboff 2010). Insbesondere in der digitalen Welt sind Ansätze zu einem neuen Modus der Produktion sichtbar geworden, der als Commons-based Peer Production eine Alternative zu Markt und Hierarchie darstellt und die Bedeutung gemeinschaftlicher Arbeit und offenem Austausch – in Abwesenheit zentraler Steuerungsinstanzen – hervorhebt. Die prominentesten Beispiele dafür sind Wikipedia und Linux (Benkler 2006).

(3) Parallel zu diesen neuen Produktionsmustern im digitalen Raum zeigt sich in vielen selbstorganisierten Initiativgruppen gegenwärtig die Wiederbelebung einer Kultur des Selbermachens. Die DIY-Herstellung und -Reparatur materieller Produkte ist mittlerweile als neuer Trend erkannt worden, der für sozial-ökologische Fragestellungen höchst relevant ist (Aachener Stiftung Kathy Beys 2012). Die kollaborative Innovation und Produktion online und der Trend zum Selbermachen offline beginnen sich nun zu verknüpfen: Zum einen wird das Wissen zur DIY-Fertigung und -Reparatur zunehmend online ausgetauscht und damit global verfügbar gemacht. Zum anderen werden dezentral-digitale Fertigungstechnologien – allen voran 3D-Drucker – für Selbermacher/innen sukzessive erschwinglich. Nutzer/innen können bereits jetzt aus einer Fülle online verfügbarer Designvorlagen (die z.T. auf einem Scan stofflicher Produkte basieren) schöpfen und diese lokal in stoffliche Produkte verwandeln.

Nun ist jedoch weder davon auszugehen, dass die skizzierten Dynamiken kurz- bis mittelfristig zur vollständigen Disruption etablierter Wertschöpfungsmuster führen, noch verlaufen die Grenzen zwischen den beschriebenen Gestaltungsoptionen trennscharf: Zwischen den Polen professioneller Unternehmen bzw. industrieller Fertigung auf der einen, sowie Peer Production und Prosuming auf der anderen Seite werden darüber hinaus eine Reihe hybrider Akteurskonstellationen möglich. Hybridität kann auch bedeuten, dass Top-Down- und Bottom-Up-koordinierte Koordinationsformen ineinandergreifen. Profitorientierte Unternehmens- und Commons-basierte Community-Logiken lassen sich zwar idealtypisch differenzieren, sie bilden letztlich gleichwohl ein Spannungsfeld zwischen denen ein Spielraum für hybride Formen existiert. In der ökonomischen Realität sind in der Tat bereits komplexe Wechselbeziehungen zwischen Unternehmen und dezentralen DIY-Communities zu beobachten.

Dezentralisierung lässt sich dabei als zentrale Trajektorie identifizieren, die sich sowohl hinsichtlich räumlicher Strukturen (also im Sinne der Regionalisierung), als auch bezogen auf die Öffnung für Individuen und Communities (im Sinne einer Personalisierung) vergegenwärtigt. Individuen können sich zunehmend über netzbasierte Plattformen koordinieren und dort Werte generieren. Die Kern-

voraussetzung für die dezentrale Gestaltung von Produktionssystemen liegt somit in einer allgegenwärtigen Vernetzung zwischen Akteuren und technologischen Entitäten. Komplementär dazu werden Netzwerke auch im Kontext von Konsum wichtiger – dies bezieht sich nicht nur auf Interaktionen zwischen Konsument/innen und Produzent/innen, sondern auch auf die Herausbildung gemeinschaftlicher Strukturen, die neuartige Muster kollaborativen Konsums etablieren. Zugleich eröffnen sich Organisationen neue Möglichkeiten, auf Ideen und Arbeitskraft zuzugreifen und Crowd-Prozesse in ihre Wertschöpfung einzubeziehen. Beide Seiten – Individuen wie Organisationen – sind in dem sich abzeichnenden Innovationsregime vermehrt auf Netzwerke angewiesen. Angesichts der Komplexität der Gegenwart und der Unsicherheit der Zukunft sind die Unternehmen geradezu dazu genötigt, eine Vielfalt an Ressourcen und Perspektiven außerhalb ihrer eigenen Grenzen zu integrieren. Wertschöpfung 2.0 ist vernetzte Wertschöpfung.

Umweltseitig bieten diese Dezentralisierungstendenzen Chancen, die allerdings nicht überbewertet werden dürfen. Die dezentrale Ebene kommt insbesondere dann relevant ins Spiel, wenn es darum geht einerseits neue und nachhaltigere Formen von Produktion und Konsumtion zu generieren und andererseits diesen Formen zur Diffusion zu verhelfen. Wie in den Analysen deutlich geworden ist, sind es neben den technologischen Entwicklungen vor allem auch die Einbettungsformen dieser Technologien und die erweiterten Handlungsoptionen, die einen Beitrag zu einem Pfadwechsel hin zu einer nachhaltigeren Entwicklung leisten können. Vor dem Hintergrund, dass Globale Governance von Umweltproblemen (u.a. durch globale Konferenzen) zwar nach wie vor relevant bleibt, jedoch die Steuerungsreichweite solcher Top-Down-Ansätze begrenzt ist. Das ist in den letzten Jahren und Jahrzenten mehr als deutlich geworden. Vor diesem Hintergrund hat Ostrom (2009) aus ihren Forschungen für die Weltbank geschlussfolgert, dass Bottom-Up-Lösungen auch und gerade für Umweltfragen außerordentlich vielversprechend sind (z.B. Städtenetzwerke für den Klimaschutz). Auch hier besteht die zukünftige Herausforderung in der Bündelung der Macht der Vielen, um neue Lösungen für zentrale Fragen unserer Zeit wirkmächtig werden zu lassen. Eine besondere Chance besteht darin, diese Dynamiken zu verknüpfen. Wertschöpfung 2.0. kann so zu einer Nachhaltigkeit 2.0. werden. Dazu ist es aber insbesondere notwendig, dass Bottom-Up-Prozesse sich auf die Ebenen von Produktion und Konsum niederschlagen. Ein Hebel dafür könnten Technologien dezentraler Produktion sein, die sich mit einer zunehmend vernetzten Welt verknüpfen. Dass diese allein jedoch nicht ausreichen um eine nachhaltige Transformation der Wertschöpfungssysteme anzustoßen haben unsere Fallstudien exemplarisch gezeigt. Es geht somit nicht nur um einzelne Innovationen, sondern auch um den Umbau von Infrastrukturen und die damit verbundenen Verhaltensänderungen. Diese Gestaltungsaufgabe betrifft ein zunehmend volatiles Umfeld, in welchem die technologischen Potenziale sowohl erschlossen als auch sozial eingebettet werden müssen. Regionalisierung und Personalisierung eröffnen dabei Chancen, stellen allerdings für sich genommen noch keine Lösung dar.

6 Literaturverzeichnis

Aachener Stiftung Kathy Beys; Effizienz-Agentur NRW; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hg.) (2012): Selbermachen. In: factorY. Magazin für nachhaltiges Wirtschaften / Ausgabe 3. Online verfügbar unter: http://www.factory-magazin.de/fileadmin/magazin/media/selbermachen/factory_2012_3_selbermachen_web.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Acatech (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Online verfügbar unter: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Abschlussbericht_Industrie4%200_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Al-Ani, A. (2013): Widerstand in Organisationen. Organisationen im Widerstand. Virtuelle Plattformen, Edupunks und der nachfolgende Staat. Wiesbaden: Springer.

Anderson, C. (2012): Makers. The New Industrial Revolution. New York: Crown Business.

Atkins Project (2007): ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint. Zero Emission Enterprise Feasability Study. Loughborough: Loughborough University.

Baldwin, C.; von Hippel, E. (2010): Modeling a paradigm shift: From producer innovation to user and open collaborative innovation. In: Harvard Business School Finance Working Paper / Ausgabe 10-038. Online verfügbar unter: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1502864, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Bauwens, M.; Iacomella, F.; Mendoza, N.; Burke, J.; Pinchen, C.; Léonard, A.; Mootoosamy, E. (2012): Synthetic Overview of the Collaborative Economy. Orange Labs und P2P Foundation (Hg.). Online verfügbar unter: http://p2p.coop/files/reports/collaborative-economy-2012.pdf, zuletzt geprüft am: 21.05.2014.

Benkler, Y. (2006): The Wealth of Networks. How Social Production Transforms Markets and Freedom. New Haven: Yale University Press. Online verfügbar unter: http://www.benkler.org/Benkler_Wealth_Of_Networks.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Bergmann, F. (2004): Neue Arbeit, neue Kultur. Freiamt im Schwarzwald: Arbor Verlag.

Bourell, D. L.; Leu, M. C.; Rosen, D. W. (2009): Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Fabrication. Roadmap for Additive Manufacturing Workshop. Arlington: University of Texas.

Broy, M. (Hg.) (2010): Cyber Physical Systems – Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Berlin/Heidelberg: Springer.

Bühner, M. (2013): First LCA on 3D Printer Sustainability Green Manufacturing Revolution or Overrated Gadget? Online verfügbar unter: http://www.knowtheflow.com/2013/first-lca-on-3d-printer-sustainability-green-manufacturing-revolution-or-overrated-gadget/, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Castells, M. (2000): The Rise of the Network Society. The Information Age: Economy, Society and Culture. Cambridge: Blackwell Publishers.

Chesbrough, H. (2008): Open Innovation. Researching a new Paradigm. Oxford: Oxford University Press.

Chopra, S.; Meindl, P. (2010): Supply chain management. Strategy, planning, and operation. 4. Aufl. Boston: Pearson.

CML (2001): Dutch Handbook on LCA (CLM). Online verfügbar unter: http://www.cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutch-lca-guide.html, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Coase, R. H. (1937): The Nature of the Firm. In: Economica / Ausgabe 4(16). S. 386-405.

Dickel, S. (2013): Im Netz der Selbstreferenz. Facebook-Kommunikation als Antwort auf die "Katastrophe" des Internet. In: Dolata, U.; Schrape, J.-F. (Hg.): Internet, Mobile Devices und die Transformation der Medien. Radikaler Wandel als schrittweise Rekonfiguration. S. 331-356. Berlin: Edition Sigma.

Dickel, S.; Ferdinand, J.-P.; Petschow, U. (2014): Shared Machine Shops as Real-Life Laboratories. In: Journal of Peer Production (5) (im Erscheinen).

Etsy (2014): Marktplatz für handgefertigte Produkte, Vintage und Material. Online verfügbar unter: www.etsy.com, zuletzt geprüft am 22.07.2014

Flämig, H. (2010): The influence of information and communication systems (ics) on sustainable logistics? Rfid and the 'autonomy' of subjects. CTRS - World Conference of Transport Research Society (Hg.): Selected Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society: Lisbon, Portugal, July 11-15, 2010.

Foresight (2013): The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK. Project Report. London: The Government Office for Science.

Fritz, A. H.; Schulze, G. (2010): Fertigungstechnik. Berlin/Heidelberg: Springer.

Gershenfeld, N. A. (2005): Fab. The coming revolution on your desktop – from personal computers to personal fabrication. New York: Basic Books.

Gilmore, J. H.; Pine, B. J. (2000): Markets of one: creating customer-unique value through mass customization. Boston: Harvard Business School Press.

Gmelin, T.; Hüttig, G.; Lehmann, O. (2008): Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale bei Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Triebwerkstechnik sowie der absehbaren mittelfristigen Entwicklungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/workshop_effizienz_flugverk_studie.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Helfrich, S. (2012): Commons: Für eine neue Politik jenseits von Markt und Staat. Bielefeld: transcript.

Hellmann, K.-U. (2010): Prosumer Revisited: Zur Aktualität einer Debatte. Eine Einführung. In: Blättel-Mink, B.; Hellmann, K.-U. (Hg.): Prosumer revisited. Zur Aktualität einer Debatte. S. 13-48. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Huang, S. H.; Peng, L.; Mokasdar, A.; Hou, L. (2013): Additive Manufacturing and Its Societal Impact: a literature Review. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology / Ausgabe 67. S. 1191-1203.

Huang, S. H.; Peng, L.; Mokasdar, A.; Hou, L. (2012): Additive Manufacturing and Its Societal Impact: a literature Review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology / Ausgabe 62. S. 1-13.

Ihde, G. B. (1991): Transport, Verkehr, Logistik. Gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung. 2., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen.

Institute for the Future (2011): The Future of Open Fabrication – Report. Online verfügbar unter: http://www.iftf.org/uploads/media/SR-1390_FutureOfOpenFab.FINAL_sm.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Kumar, A. (2008): From mass customization to mass personalization: a strategic transformation. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems / Ausgabe 19(4). S. 533-547.

Lakhani, K. R. et al. (2013): Open Innovation and Organizational Boundaries: Task Decomposition, Knowledge Distribution and the Locus of Innovation. In: Grandori, A. (Hg.): Handbook of Economic Organization. Integrating Economic and Organization Theory. S. 355-382. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Ltd.

Lipson, H.; Kurmann, M. (2013): Fabricated the new world printing. Hoboken: Wiley-Blackwell.

Lufthansa Group (2012): Klima- und Umweltverantwortung | Balance 2012. Fuel Efficiency im Lufthansa Konzern – Kosten sparen und die Umwelt schonen. Online verfügbar unter: www.lufthansagroup.com/fileadmin/.../de/LH-Fuel-Efficiency-0612.pdf, zuletzt geprüft am 03.06.2014.

Moilanen, J. (2012): Emerging Commons Design Economy. In: Statistical Studies of Peer Production. Online verfügbar unter: http://surveys.peerproduction.net/2012/12/emerging-commons-design-economy/, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Ostrom, Elinor (2009): A Polycentric Approach for Coping with Climate Change. In: Policy Research Working Paper / Ausgabe 5095. Online verfügbar unter: http://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/1813-9450-5095, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Pfohl, H.-C. (2010): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8., neu bearb. u. aktual. Aufl. Berlin: Springer

Pfister, C. (Hg.) (1995): Das 1950er Syndrom. Der Weg in die Konsumgesellschaft. Bern u.a.: Haupt.

Piller, F.; Ihl, C. (2013): Open Innovation with Customers. Foundations, Competences and International Trends. Online verfügbar unter: http://www.internationalmonitoring.com/fileadmin/Downloads/Trendstudien/Piller-Ihl_Open_Innovation_with_Customers.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Piore, M. J.; Sabel, C. F. (1985): Das Ende der Massenproduktion. Studie über die Requalifizierung der Arbeit und die Rückkehr der Ökonomie in die Gesellschaft. Berlin: Wagenbach.

Rajkumar, R.; Lee, I; Sha, L.; Stankovic, J. (2010): Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: DAC '10 Proceedings of the 47th Design Automation Conference. S. 731–736.

Redlich, T.; Wulfsberg, J. P. (2011): Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie. Heidelberg/New York: Springer.

Rifkin, J. (2011): The Third Industrial Revolution. How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World. Basingstoke: Palgrave Macmillan.

Rockström et al. (2009): Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. Online verfügbar unter: http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2009/2009_Rockstrom_etal_2.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Salvador, F.; de Holan, P. M.; Piller, F. T. (2009): Cracking the Code of Mass Customization. In: MIT Sloan Management Review / Ausgabe 50(3). S. 71-78..

Schreiber, S. (2013): Entwicklung einer Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit von dezentralen Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme. DissertaLipsontion. Fakultät für Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Schumacher, E. F. (1985): Small is beautiful – Die Rückkehr zum menschlichen Maß. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.

Shah, S. K.; Tripsas, M. (2007): The Accidental Entrepreneur: The Emergent and Collective Process of User Entrepreneurship. In: Strategic Entrepreneurship Journal / Ausgabe 1(1). S. 123-140.

Siefkes, C. (2012): Beyond digital plenty. Building blocks for physical peer production. In: Journal of Peer Production / Ausgabe 1. Online verfügbar unter: http://peerproduction.net/issues/issue-1/invited-comments/beyond-digital-plenty/, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

Smith, A.; Seyfang, G. (2013): Constructing grassroots innovations for sustainability. Online verfügbar unter: http://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/123456789/3812/21%20Constructing%20grassroots%20innovations%20for%20sustainability%20pre%20review.pdf?sequence=3, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Smith, A. u.a. (2013): Grassroots Digital Fabrication and Makerspaces. Reconfiguring, Relocating and Recalbirating Innovation? In: SPRU Working Paper Series / Ausgabe 2013-02. Online verfügbar unter: https://www.sussex.ac.uk/webteam/gateway/file.php?name=2013-02-swps-aps-sh-gdf-working-paper.pdf&site=25, zuletzt geprüft am 06.06.2014.

Strambach, S.; Halkier, H. (2013): Reconceptualizing change – Path dependency, path plasticity and knowledge combination. In Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie / Jahrgang 57 / Ausgabe 1-2. S. 1-14.

Strangler, D.; Maxwell, K. (2012): DIY Producer Society. In: Innovations / Ausgabe 7, Nummer 3. S. 11-14.

Tapscott, D.; Williams, A. D. (2007): Wikinomics. How Mass Collaboration Changes Everything. Norwood: Soundview Executive Book Summaries.

The Economist (2012): A third industrial revolution. Special Report Manufacturing and Innovation / 21.04.2012. Online verfügbar unter: http://www.economist.com/node/21552901/print, zuletzt geprüft am 10.06.2013.

Woodcock, J. (2011): Additive Manufacturing and the Environment. In: the tct magazine / Ausgabe 4(18). S. 33-36.

Zuboff, S. (2010): Creating value in the age of distributed capitalism. McKinsey Quarterly. Online verfügbar unter: http://glennas.files.wordpress.com/2010/12/creating-value-in-the-age-of-distributed-capitalism-shoshana-zuboff-september-2010.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

GESCHÄFTSSTELLE BERLIN
MAIN OFFICE
Potsdamer Straße 105
10785 Berlin
Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0
Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG
HEIDELBERG OFFICE
Bergstraße 7
69120 Heidelberg
Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0
Fax: + 49 – 6221 – 270 60

mailbox@ioew.de
www.ioew.de