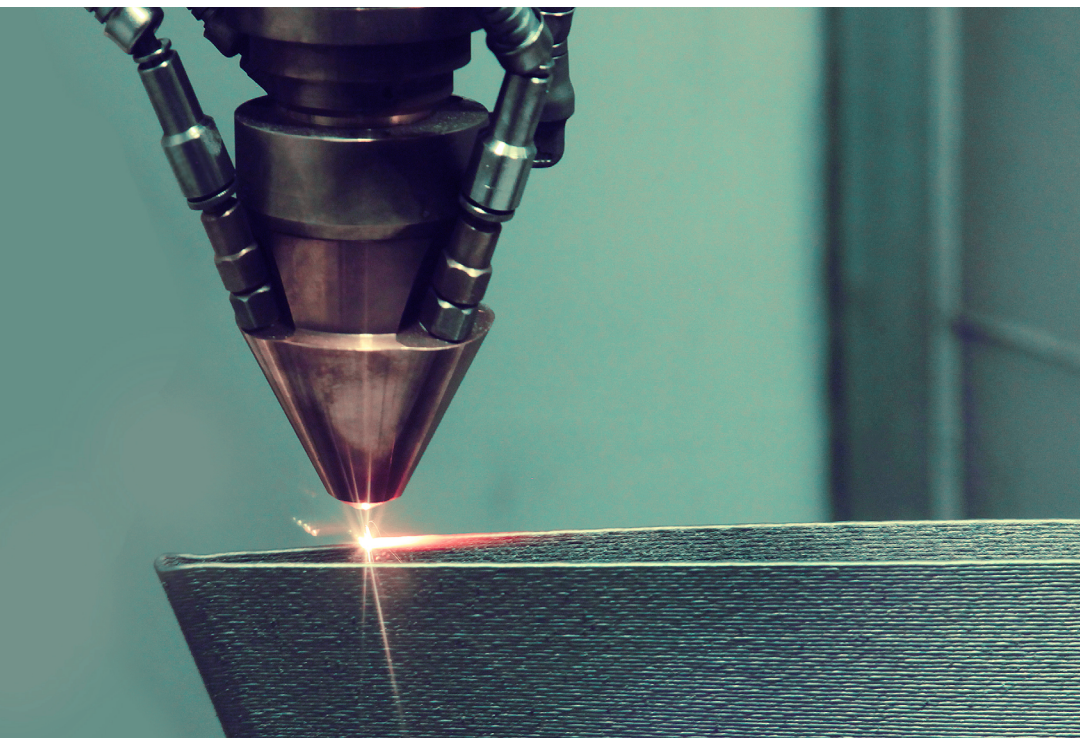




VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 35

Ressourceneffizienz durch additive Fertigung



VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 35: Ressourceneffizienz durch additive Fertigung

Autor:

Jakob Rothmeier, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken Herrn Kevin Popp, Senior Scientist im Bereich Forschung Additive Fertigung am SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / spopov (bearbeitet)

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 35

**Ressourceneffizienz durch additive
Fertigung**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG	7
2 GRUNDLAGEN UND INNOVATIONEN DER ADDITIVEN FERTIGUNG	9
2.1 Innovationen bei Laserauftragschweißen	12
2.2 Innovationen im Binder Jetting	16
2.3 Innovationen im Selektiven Laserschmelzen	18
2.4 Innovationen bei der Schmelzschichtung	20
2.5 Multimateriallösungen	22
3 POTENZIALE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ	25
3.1 Geschäftsmodelle	28
3.2 Produktentwicklung	33
3.3 Produktion	37
4 ADDITIVE FERTIGUNG IM BAUWESEN	50
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	62
LITERATURVERZEICHNIS	64

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Marktentwicklung der industriellen additiven Fertigung zwischen 2020 und 2035 (geschätzt)	10
Abbildung 2:	Übersicht wichtiger Verfahren der additiven Fertigung, den unterschiedlichen Arten des Materialauftrags zugeordnet	11
Abbildung 3:	Schematische Dartstellung des sog. LMD-Verfahrens, das dem Laserauftrag-schweißen zuzuordnen ist	12
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Binder Jettings	16
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des SLM-Verfahrens	18
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Fused Deposition Modeling-Prinzips	21
Abbildung 7:	Ziele der ressourceneffizienten additiven Fertigung in verschiedenen Unternehmensebenen	28
Abbildung 8:	Prinzipien des Ecodesigns	36
Abbildung 9:	Serienproduktion mittels additiver Fertigung je Branche	38
Abbildung 10:	Anzahl der Patente im Bereich der additiven Fertigung von 2001 bis 2022	40
Abbildung 11:	Systeme für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Bauwesen © Gerrit Placzek/IBB	54

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AKF	ARBURG Kunststoff-Freiformen
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DAP	Digital Additive Production
DLP	Digital Light Processing
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EHLA	Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweiß-Verfahren
EW2C	Express Wire Coil Cladding
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HAF	High Absorbing Fluid
HSS	High-Speed-Sintering
IHK	Industrie- und Handelskammer
ISO	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LMD	Laser Metal Deposition
LSD	Layerwise Slurry Disposition

MBJ	Metal Binder Jetting
MJF	Multi Jet Fusion
PBS	Polybutylsuccinat
PCM	Phase-Change-Material
PEEK	Polyetheretherketon
PLA	Polyactide
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
SAF	Selective-Absorption-Fusion
SKZ	Das Kunststoff-Zentrum
SLM	Selective Laser Melting (dt. Selektives Laserschmelzen)
SLS	Selektives Lasersintern
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI TZ	VDI Technologiezentrum GmbH
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke e. V.

1 EINLEITUNG

Additive Fertigungsverfahren, auch bekannt unter der Bezeichnung 3D-Druck¹, sind Verfahren zur Herstellung dreidimensionaler Bauteile. Im Gegensatz zur subtraktiven Fertigung, bei der Material abgetragen wird, um die gewünschte Form zu erreichen, wird hierbei Material in der Regel Schicht für Schicht aufgebaut.

Additive Fertigungstechnologien haben in den letzten Jahren deutlich an Stellenwert in der industriellen Fertigung gewonnen und finden Anwendung in einer Vielzahl an Branchen, unter anderem in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Medizintechnik und im Bauwesen. Diese vielfältigen Einsatzmöglichkeiten führen zu einer hohen Innovationsdynamik in der Forschung und in der industriellen Anwendung, die sowohl ökonomische als auch ökologische Potenziale mit sich bringen. So ist es mittels Einsatz additiver Fertigungstechnologien möglich, komplexe Geometrien mit hoher Genauigkeit herzustellen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren wie dem Spritzguss oder der spanenden Bearbeitung nicht beziehungsweise nur schwer umsetzbar wären. Die präzise Fertigung verspricht außerdem geringe Materialverluste und weniger Ausschuss in der Herstellung. Neben diesen Chancen gelten derzeit die hohen Investitionskosten für Unternehmen und der Energiebedarf je gefertigtem Bauteil als Herausforderungen, die mit dem Einsatz von additiven Fertigungstechnologien einhergehen und bei der Implementierung dieser Technologie zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grund widmet sich die vorliegende Kurzanalyse additiven Fertigungstechnologien insbesondere aus Ressourceneffizienzperspektive.

Mit Ressourceneffizienz ist gemäß der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1 das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen

¹ Gemäß der VDI-Richtlinie 3405 wird unter dem Begriff „3D-Druck“ lediglich das additive Verfahren „Binder Jetting“ (vgl. Kapitel 2.2) verstanden. Da jedoch sowohl in der in der Forschung als auch im umgangssprachlichen Gebrauch keine einheitliche Trennung erfolgt, werden die Begriffe „additive Fertigung“ und „3D-Druck“ in der vorliegenden Kurzanalyse synonym verwendet.

Ressourceneinsatz gemeint.² (Additive) Fertigungsverfahren sind also dann ressourceneffizient, wenn zum Beispiel Materialien oder Energie bei der Herstellung eingespart werden oder der Nutzen im Verhältnis zum Einsatz gesteigert werden kann. Da die Inanspruchnahme von Ressourcen immer auch mit Treibhausgasemissionen verbunden ist, leisten Maßnahmen zur Ressourceneffizienz zudem einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.

Um die Chancen und Herausforderungen der additiven Fertigung für die Ressourceneffizienz in der industriellen Fertigung genauer zu verstehen, werden in Kapitel 2 wichtige Grundlagen und Einsatzgebiete beschrieben. Zudem werden Innovationen der vergangenen Jahre vorgestellt. Kapitel 3 beleuchtet anschließend die Chancen und Herausforderungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von additiven Verfahren einerseits im Kontext von Geschäftsmodellen, andererseits mit Blick auf die Produktentwicklung sowie die Produktion. Da die additive Fertigung neben der klassischen Industrie zudem vermehrten Einsatz in der Baubranche findet, werden in Kapitel 4 in Form eines Exkurs die Potenziale für die Ressourceneffizienz im Bauwesen vorgestellt.

² Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

2 GRUNDLAGEN UND INNOVATIONEN DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Die Ursprünge der modernen additiven Fertigung finden sich in den 1980er Jahren mit der Patentierung der Stereolithografie (1984) und dem Selektiven Lasersintern (1988).³ Seitdem wurden eine Vielzahl neuer Verfahren entwickelt, wobei die Nutzung sowie die Einsatzgebiete der additiven Fertigungsverfahren insbesondere im Zuge der Digitalisierung deutlich zugenommen haben. In einer 2019 vom VDI e.V. und der RWTH Aachen durchgeführten Studie wurden 527 Personen aus der Industrie u. a. dazu befragt, inwiefern additive Fertigungsverfahren im Unternehmen bereits eingesetzt werden oder zukünftig eingesetzt werden sollen. Dabei wurde deutlich, dass in allen Bereichen – vom Prototyping bis zur Fertigung – mit einem vermehrten Einsatz zu rechnen ist⁴.

Das weiterhin zunehmende Interesse an additiven Fertigungsverfahren spiegelt sich auch im prognostizierten Wachstum der Branche wider. Laut einer Studie des Beratungsinstituts Ampower wuchs der globale Markt für Metall- und Polymer-3D-Druck von 2020 auf 2021 trotz Coronakrise um 16,2 % von 7,17 Mrd. Euro auf 8,33 Mrd. Euro. Für das Jahr 2035 wird ein Gesamtvolumen von über 90 Mrd. Euro prognostiziert (vgl. Abbildung 1).⁵

Neben der zunehmenden Akzeptanz in der Industrie und den hohen Wachstumsprognosen steigt auch die Vielfalt der unterschiedlichen Technologien. Gründe hierfür lassen sich vor allem in der verstärkten Nachfrage nach maßgeschneiderten Produkten finden, die wiederum angepasste Verfahren oder spezielle Materialien erfordern.

³ Vgl. Guggenberger, S. (2020).

⁴ Vgl. Van Bracht, R.; Pollok, P.; Piller, F. T. und Marquardt, E. (2019), S. 9.

⁵ Vgl. Quitter, D. (2022b).

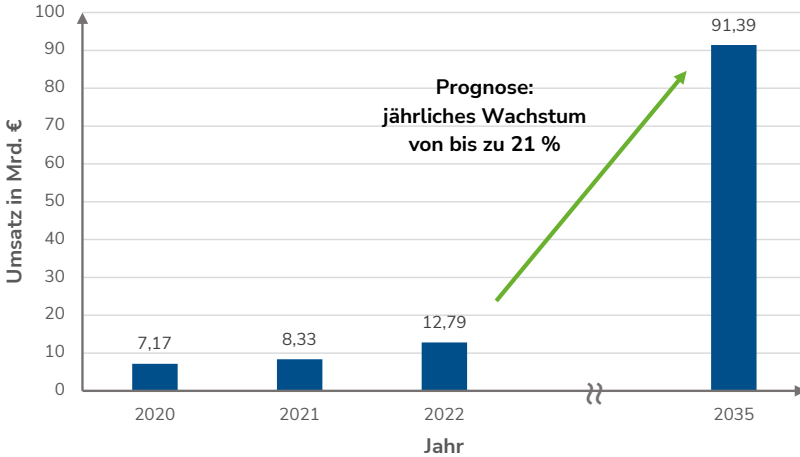


Abbildung 1: Marktentwicklung der industriellen additiven Fertigung zwischen 2020 und 2035 (geschätzt)⁶

Hinzu kommt außerdem, dass viele Fertigungsverfahren geschützte Bezeichnungen besitzen, die zum Teil durch weitere Bezeichnungen (für ähnliche Technologien) umgangen werden.⁷ All diese Umstände machen eine Klassifizierung der additiven Fertigung schwierig. Ein Überblick wichtiger Technologien ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Wachstumsprognosen, vielfältigen Einsatzgebiete und individuellen Ansprüche sowie die daraus resultierende Technologievielfalt zeugen von einer hohen Entwicklungsdynamik bei additiven Fertigungsverfahren. Eine Einordnung aller Technologien nach Normen wie der ISO 52900 „Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie“ aus dem Jahr 2015 bzw. 2018 oder der VDI-Richtlinie 3405 „Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen“ aus dem Jahr 2014 ist deshalb nur bedingt möglich.

⁶ Eigene Darstellung auf Basis von Ampower (2022) und Research Nester (2022).

⁷ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 117.

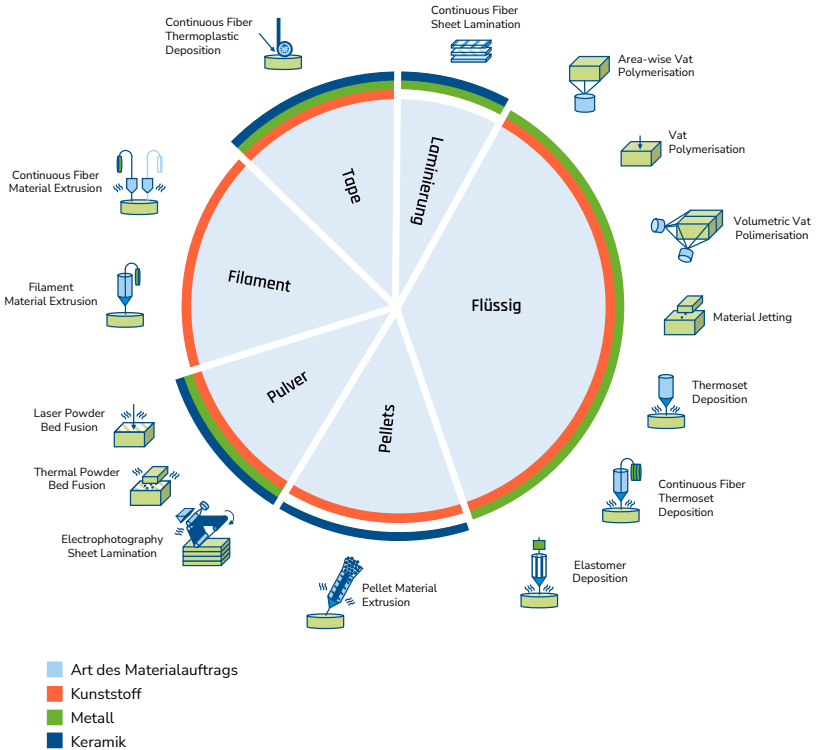


Abbildung 2: Übersicht wichtiger Verfahren der additiven Fertigung, den unterschiedlichen Arten des Materialauftrags zugeordnet⁸

Die nachfolgend vorgestellten Innovationen basieren deshalb auf den Technologien, die 2022 am häufigsten im industriellen Kontext verwendet wurden.⁹ Außerdem sollen wichtige Fortschritte im Bereich der Multimateriallösungen vorgestellt werden. Inwiefern diese und weitere Technologien auch zu mehr Ressourceneffizienz beitragen können, wird in Kapitel 3 genauer beleuchtet.

⁸ Eigene Darstellung auf Basis von SKZ – Das Kunststoffzentrum (2023) und Ampower (2022).

⁹ Vgl. Statista GmbH (2022).

2.1 Innovationen bei Laserauftragschweißen

Als Laserauftragschweißen (engl. Laser Metal Deposition – LMD) werden additive Fertigungsprozesse verstanden, bei denen Metalle in Form von Pulver oder Draht durch eine Düse oder einen Laserstrahl aufgetragen werden (vgl. Abbildung 3). Traditionell wird das Laserauftragschweißen vor allem für Reparaturmaßnahmen bereits seit längerer Zeit eingesetzt, es kann aber auch genutzt werden, um 3D-Bauteile flexibel zu beschichten oder additive Modifikationen vorzunehmen. Im Gegensatz zu anderen Verfahren benötigen LMD-Verfahren keine Prozesskammer und können daher ebenso bei großen Bauteilen angewendet werden. Die aufgetragenen Schichten sind schmelzmetallurgisch mit dem Substrat verbunden, was zu einer hohen Festigkeit führt, die oft mit Standardgütern vergleichbar ist.¹⁰

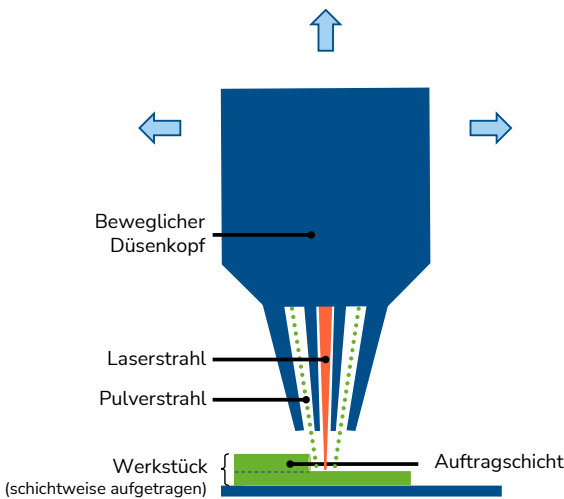


Abbildung 3: Detaildarstellung des Laserkopfes beim sog. LMD-Verfahren, das dem Laserauftragschweißen zuzuordnen ist¹¹

Da die Bauteilerstellung komplett an im Raum beweglichen Druckköpfen entsteht, können die Bauteilgrößen und auch das Einsatzgebiet sehr

¹⁰ Vgl. Fastermann, P. (2012), S. 120 – 121.

¹¹ Eigene Darstellung auf Basis von Laserline GmbH (2024) und Trumpf Lasertechnik (2024).

unterschiedlich sein. Eine Umsetzungsmöglichkeit stellen beispielsweise ortsungebundene Roboterzellen dar. Als Herausforderung beim LMD gilt die verhältnismäßig hohe Oberflächenrauheit der bearbeiteten bzw. hergestellten Teile. Sie ist dementsprechend auch Teil vieler Forschungsvorhaben. Neben der Verbesserung der Produktqualität werden die Reduzierung der Fertigungszeiten sowie die Erhöhung der Oberflächenqualität angestrebt.¹²

Dank der flexiblen Einsatzmöglichkeiten sind in den letzten Jahren viele Innovationen entstanden. Auffallend ist, dass besonders anwendungsorientierte Forschungsinstitute in erheblichem Maße zur Fortentwicklung der additiven Fertigungsverfahren beitragen. Nachfolgend sollen einige Innovationen vorgestellt werden.

Hybrides LMD

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT hat gemeinsam mit internationalen Partnern ein Verfahren entwickelt, das metallisches Pulver und Draht kombiniert, indem Hartstoffpartikel in Pulverform zum Drahtwerkstoff hinzugegeben werden. Dadurch gelingt es, wichtige Materialeigenschaften wie Härte oder Zähigkeit zu garantieren. Darüber hinaus können im Vergleich zu reinen Pulverprozessen auch Kosten eingespart werden. Die Forschenden haben für ihre Versuche einen Warmarbeitsstahl und einen niedrig legierten Stahl als Drahtmaterialien verwendet. Als Pulverwerkstoffe wurde Chrom und Titancarbid eingesetzt, um die Werkstoffzusammensetzung je nach Anwendung anzupassen. Durch die Zugabe von Titancarbid konnten die Mikrostruktur der Werkzeugstähle gezielt verändert sowie die Härte der aufgetragenen Schichten um bis zu 30 % gesteigert werden. Das hybride Verfahren soll zukünftig für die Bearbeitung von Umformwerkzeugen oder als Anwendung bei Reibverschleißschichten von Hydraulikkomponenten eingesetzt werden.¹³

¹² Vgl. Ahn, D. G. (2021).

¹³ Vgl. Quitter, D. (2021a).

Express Wire Coil Cladding

Ebenfalls vom Fraunhofer IPT stammt ein neues Verfahren namens Express Wire Coil Cladding (EW2C). Dieses Verfahren soll eine schnelle und kostengünstige Fertigung von Wellen ermöglichen. Im Gegensatz zum herkömmlichen Laserauftragschweißen wird der Werkstoff nicht als Draht zugeführt, sondern in Form von Spiralen an die gewünschten Stellen der Welle gebracht und dort mit einem Hochleistungslaser aufgeschweißt. Durch die Spannung der Drahtspiralen verbessert sich die Prozessstabilität im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren um den Faktor Zehn, da lediglich gewollte Bewegungen des Drahts während des Schweißvorgangs ermöglicht werden. Das Verfahren eignet sich sehr gut für den Auftrag großer Schichtstärken, sodass schnell mehrere Millimeter Material aufgetragen werden können. Auch verschiedene Materialkombinationen sind dadurch möglich. Das Fraunhofer-Team arbeitet bereits an einer weiteren Optimierung der Prozessstabilität und Automatisierung des Prozesses. So sind Vorrichtungen zum automatisierten Platzieren der Drahtspiralen auf den Wellen schon in der Erprobung. Durch die Vergrößerung der Brennfleckgeometrie soll die Prozessgeschwindigkeit weiter gesteigert werden, und durch Kombination verschiedener Spirallängen und weiterer Drahtwerkstoffe sollen hochkomplexe Volumenelemente auf die Wellen aufgebracht werden. Mit integrierter Sensorik und künstlicher Intelligenz können Daten erfasst und verarbeitet werden, wodurch der EW2C-Prozess für unterschiedliche Werkstoffe und Prozessparameter modelliert und aktiv geregelt werden kann.¹⁴

Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweiß-Verfahren - EHLA 3D

Das Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweiß-Verfahren – EHLA – ist eine Weiterentwicklung des konventionellen Laserauftragsschweiß-Verfahrens, das stoffschlüssige, angebundene homogene Schichten mit Schichtdicken von 10 bis 350 µm erzeugen kann. Entwickelt wurde das ursprüngliche Verfahren 2013 an dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und dem Lehrstuhl für Digital Additive Production (DAP) der

¹⁴ Vgl. Fraunhofer IPT (2020).

RWTH Aachen. Im Vergleich zum Laserauftragschweißen wird der Hauptanteil der thermischen Energie des Lasers während des EHLA-Verfahrens durch den pulverförmigen Zusatzwerkstoff und nicht durch das Substrat absorbiert. Dadurch wird die thermische Belastung für die Bauteile erheblich reduziert und so sind Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min möglich. Seit 2019 arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer ILT nun an der sog. EHLA-3D-Technologie. Indem sie eine 5-Achs-CNC-Anlage modifizieren, erreichen die Forschenden eine Kombination aus EHLA, Highspeed-3D-Druck, Freiformbeschichtung und Bauteilreparatur. Die CNC-Anlage wurde speziell angepasst, um höchste Präzision und schnelle Vorschubgeschwindigkeiten für die additive Fertigung zu ermöglichen. Durch diese besonderen Charakteristiken soll EHLA 3D als Beschichtungstechnologie wirtschaftliche und ressourcenschonende Vorteile bieten. Es kann z. B. für die Reparatur teurer Bauteile aus der Luftfahrt oder dem Werkzeugbau eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil für die Ressourceneffizienz ist, dass beim Verfahren auch gebrauchtes Pulver zum Einsatz kommen kann.¹⁵

Laseradditive Fertigung von Kupfer und Kupferlegierungen

Durch seine hervorragenden elektrischen und thermischen Eigenschaften ist Kupfer insbesondere für elektrische Antriebe oder als Wärmetauscher auch für Umwelttechnologien von besonderer Bedeutung. Da das vollständige Aufschmelzen mit Infrarotlasern aufgrund der hohen Reflexion nicht möglich ist, hat das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS eine additive Fertigungsanlage entwickelt, die das Metall sowie Kupferlegierungen mit einem kurzwelligen grünen Laser verarbeitet. So können zukünftig auch hochkomplexe Bauteile aus Kupfer hergestellt werden, die speziell vielen Aluminium-Lösungen durch eine höhere volumenspezifische Leitfähigkeit überlegen sind.¹⁶

¹⁵ Vgl. Fraunhofer ILT (2023).

¹⁶ Vgl. Fraunhofer IWS (2020).

2.2 Innovationen im Binder Jetting

Binder-Jetting-Verfahren sind pulverbasierte additive Fertigungsprozesse, die verwendet werden, um dreidimensionale Objekte durch das Schicht-für-Schicht-Aufbringen von Material und selektive Auftragen eines Bindemittels herzustellen. Im Gegensatz zum Selective Laser Melting (SLM, deutsch ‚selektives Laserschmelzen‘) erfolgt die Aushärtung der Bauteile mittels Binder, der in der Regel eingesprüht wird. Die Verfahren gehen auf Entwicklungen des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den 1990er Jahren zurück.¹⁷

Zu Beginn wird eine dünne Schicht des gewünschten Materials auf eine Plattform aufgetragen. Dann wird ein Bindemittel, bspw. ein flüssiger Klebstoff, selektiv auf die Schicht gebracht, um die gewünschte Form zu erzeugen. Die Plattform wird anschließend um eine Schicht abgesenkt, und der Prozess wird wiederholt, bis das Objekt fertiggestellt ist (vgl. Abbildung 4).

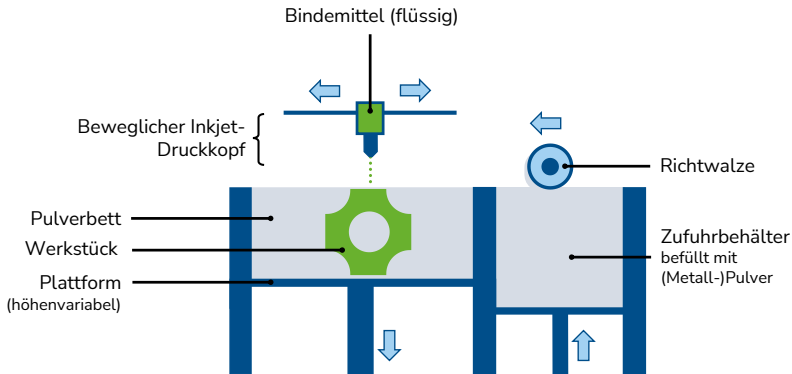


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Binder Jettings¹⁸

Ein besonderes Augenmerk richtet sich bei diesen Verfahren auf die Pulvereigenschaften. So sind u.a. die Fließfähigkeit, Packungsdichte und Sinteraktivität wichtige Parameter, die es zu beachten gilt.¹⁹ In den letzten Jahren

¹⁷ Vgl. Nikolay, D. und Kollenberg, W. (2021).

¹⁸ Eigene Darstellung auf Basis von 3Dnatives (2023b) und AMFG (2019).

¹⁹ Vgl. VDI e.V. (2019), S. 9.

entstanden einige Innovationen, die dem Binder Jetting zuzuordnen sind und auch für die industrielle Fertigung von Bedeutung sein können. Dazu gehören unter anderem:

Metal Binder Jetting

Von Metal Binder Jetting (MBJ) wird gesprochen, wenn das Ausgangspulver ein sinterfähiges Metall ist. Beim Verfahren wird eine Pulverschicht aufgetragen, in die selektiv ein organischer Binder mit einem Inkjet-Druckkopf eingespritzt wird. Danach wird der Binder mittels Wärmelampe getrocknet. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die geforderte Geometrie erreicht ist. Nach der Aushärtung des Binders wird das Grünteil vom überschüssigen Metallpulver gereinigt und dann entbindert, wobei sich der Binder zersetzt. Danach wird das Bauteil gesintert, wodurch es verdichtet und auf das Endmaß schrumpft. Mit dem MBJ-Verfahren können mechanische Eigenschaften wie beim klassischen Sintern erreicht werden. Zwar ist im Vergleich zu anderen metallbasierten Fertigungsverfahren wie dem Laser-Strahlschmelzen und Elektronen-Strahlschmelzen (vgl. Abbildung 5) die Bauteilvorbereitung zur maßhaltigen Fertigung aufwändiger, allerdings lassen sich nach erfolgreicher Einstellung durch das MBJ auch Losgrößen zwischen 10.000 und 100.000 Stück abdecken.²⁰

Binder Jetting mit Keramik

Neben Einsätzen bei elektronischen Anwendungen oder im Hochtemperaturbereich kommen Keramiken ebenso in der Medizintechnik zum Einsatz, wobei letztere besonders häufig individuell gefertigte Bauteile benötigt. Auch in diesem Bereich gab es in den letzten Jahren technische Fortschritte. So hat die Ceraming GmbH, eine Ausgründung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und mittlerweile Teil der Lithoz GmbH, den sog. LSD-Print (Layerwise Slurry Disposition-Print) entwickelt. Laut der BAM wird in diesem Prozess anstelle von trockenem Pulver eine Keramik-Suspension verwendet, die mit einer Klinge gleichmäßig in dünnen

²⁰ Vgl. VDI Statusreport 2019.

Schichten auf die Bauplattform aufgetragen und anschließend getrocknet wird. Diese Methode führt zu einer hohen Dichte des Pulvers und fertigen Bauteils. Außerdem ermöglicht es die Verarbeitung von Pulvern mit verschiedenen Partikelgrößen. Dadurch entstehen wiederum hohe Dichten der gedruckten Keramiken und folglich eine besonders hohe Material- und Produktqualität.²¹

2.3 Innovationen im Selektiven Laserschmelzen

Das Selektive Laserschmelzen (SLM) ist ein 3D-Druckverfahren, um Objekte aus Metall herzustellen. Dabei werden die Teile schichtweise aus Metallpulver aufgebaut und dann an den vorgegebenen Stellen durch einen Laser verschmolzen. Anschließend wird eine neue Pulverschicht aufgetragen und der Prozess wiederholt sich, bis die Objekte fertig gedruckt sind (vgl. Abbildung 5). Danach wird überschüssiges Pulver entfernt, das Teil von der Platte abtrennt und Stützstrukturen werden entfernt. Die Werkstücke können dann einer Wärmebehandlung oder anderweitigen Nachbearbeitung unterzogen werden.²²

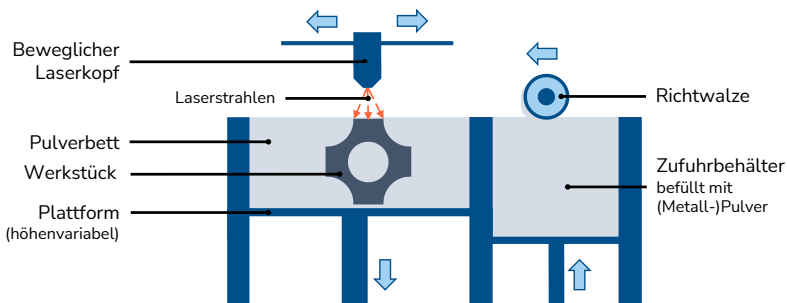


Abbildung 5: Schematische Darstellung des SLM-Verfahrens²³

Ein großer Vorteil des pulverbasierten 3D-Drucks ist das sog. Nesting von Bauteilen. Hierbei erfolgt die optimale Anordnung der Teile in quaderförmigen Behältern, um so die höchstmögliche Produktionsmenge pro

²¹ Vgl. Quitter, D. (2022a).

²² Vgl. Dusold, J. (2020).

²³ Eigene Darstellung auf Basis von 3Dnatives (2023c) und Albtec Prototypen GmbH (2022).

Druckdurchgang zu gewährleisten. Objekte können in jeglicher Komplexität in eine 3D-Druckform platziert und im gesamten Bauraum dreidimensional verschachtelt werden. Das ermöglicht eine flexible und kostengünstige Produktion von Bauteilen, ohne Einschränkungen bezüglich der Mindestmenge.

Dem Bereich des Selektiven Laserschmelzens lassen sich mehrere Technologien zuordnen. Nachfolgend werden einige Innovationen vorgestellt.

Multi Jet Fusion

Das Multi Jet Fusion (MJF) kann hochauflösende sowie präzise 3D-Objekte mit einer hohen Oberflächengüte und geringer Porosität herstellen. Eine wärmeleitende Flüssigkeit wird dabei durch den Druckkopf auf die Pulverpartikel aufgetragen, wobei als Energiequelle eine Infrarot-Lampe dient. Die Partikel verschmelzen durch die von den Lampen erzeugte Wärme miteinander sowie mit der darunterliegenden Schicht. Um ein unerwünschtes Verschmelzen der Partikel über den vorgesehenen Bereich hinaus zu vermeiden, wird eine wärmehemmende Flüssigkeit entlang der Kontur des Bauteils aufgetragen. Somit entstehen 3D-Drucke mit einer glatten und gleichmäßigen Oberfläche.

Der Drucker verwendet eine Matrix von Druckköpfen, die Tausende von Düsen enthalten, um Schichten von Polymerpulver aufzutragen. Dadurch kann mittels MJF sehr schnell gedruckt werden, wodurch es für die Massenproduktion geeignet ist. Das Verfahren ist außerdem in der Lage, Materialien in den Farben Weiß und Grau zu drucken.²⁴

High-Speed-Sintering

High-Speed-Sintering (HSS) ist ein 3D-Druck-Verfahren, das funktionale Prototypen und Endverbraucherteile ohne Werkzeuge fertigen kann. Mögliche Anwendungsbereiche sind Innenbereiche von Automobilen, aber auch Produktverpackungen. Das von der voxeljet AG aus Friedberg entwickelte Verfahren ist ein vollständig offenes und individualisierbares System. Der

²⁴ Vgl. HP Development Company, L.P. (2023).

Prozess kombiniert die Vorteile des Selektiven Lasersinterns und des Binder Jettings, um spritzgussähnliche Materialeigenschaften in 3D drucken zu können. Mittels Infrarot-Absorber und Infrarotlicht werden die bedruckten Bereiche auf der beheizten Bauplattform dann gesintert. Im Gegensatz zu anderen laserbasierten Verfahren kann das gesamte Baufeld in nur einem Durchgang bedruckt werden. Die Technologie bietet besondere Open-Source-Möglichkeiten, da sie eine kundenspezifische Makro-Programmierung ermöglicht und die Verwendung eigener Materialsets und Parameter erlaubt.²⁵

Selective-Absorption-Fusion

Die Selective-Absorption-Fusion-Technologie (SAF-Technologie) von Stratasys aus Israel ermöglicht eine präzise und konstante Produktion von Bauteilen bei niedrigen Stückkosten. Die Technologie nutzt ein infrarotempfindliches Fluid (High Absorbing Fluid, HAF), um Polymerpulverpartikel in diskreten Schichten miteinander zu verschmelzen. Das patentierte Pulvermanagement gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung des Pulvers auf einer Oberfläche. Dabei werden spezielle piezoelektrische Druckköpfe verwendet, um das Bindemittel in vordefinierten Bereichen aufzutragen, wodurch die einzelnen Schichten des Objekts entstehen. Danach wird diese Schicht einer Infrarotenergie ausgesetzt und die Bereiche werden mittels HAF miteinander verschmolzen.²⁶

2.4 Innovationen bei der Schmelzschichtung

Schmelzschichtungsverfahren sind auch unter der englischen Bezeichnung FDM (Fused Deposition Modeling) oder MBJ (Fused Filament Fabrication) bekannt. FDM wird häufig als einfachste Technologie der additiven Fertigung beschrieben und umfasst grundsätzlich drei Komponenten: ein Druckbett oder eine Bauplattform, auf dem das Objekt gedruckt wird, eine Spule mit Filament als Druckmaterial und einen Druckkopf (Extruder). Das

²⁵ Vgl. [Additive-Fertigung.com](https://www.additive-fertigung.com) (2018).

²⁶ Vgl. [3DDrucker.de](https://www.3ddrucker.de) (2021).

Filament wird abgerollt und geschmolzen, bevor es schichtweise auf das Druckbett aufgetragen wird (vgl. Abbildung 6).

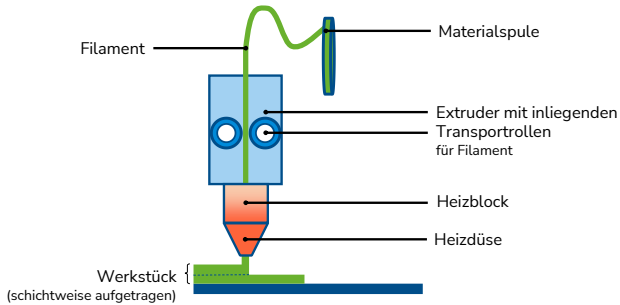


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Fused Deposition Modeling-Prinzips²⁷

Durch den einfachen Aufbau eignen sich die Verfahren für ein breites Anwenderfeld, einschließlich privater Haushalte und Bildungseinrichtungen sowie für den Einstieg in die additive Fertigung in der Industrie.²⁸ Schmelzbeschichtungsverfahren wurden in den letzten Jahren sukzessive weiterentwickelt. Nachfolgend werden einige zugehörige Entwicklungen vorgestellt.

Stabile Bauteile dank Plasmaquelle

Bei Bauteilen, die durch schichtweisen 3D-Druck wie das FDM hergestellt werden, ist die Schichthftung eine potenzielle Schwachstelle. Forschende am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST arbeiten deshalb an einer verbesserten Haftung zwischen den Schichten, wodurch sich die Stabilität deutlich erhöhen lässt. Um dies zu erreichen, erzeugen sie eine beabsichtigte chemische Modifikation der Oberfläche anhand von Atmosphärendruckplasma. Dabei haben die Forschenden eine spezielle Plasmaquelle entwickelt, die in bestehende 3D-Drucker integriert werden kann. So ergibt sich die Option, während des Druckprozesses einzelne Schichten zu behandeln, selbst wenn diese später nicht mehr zugänglich sind. Auf

²⁷ Eigene Darstellung auf Basis von 3Dnatives (2023a), 3D-Druck-Recherche.de (2024) und Protec3D (2024).

²⁸ Vgl. Torke, N. (2020).

diese Weise können integrierte Oberflächenmodifikationen durchgeführt werden, was die Herstellung belastbarer Bauteile auch unter Verwendung kosteneffizienter Verfahren ermöglicht.²⁹

Leitfaden zur Qualitätssicherung

FDM-Verfahren und additive Materialextrusion im Allgemeinen haben das Problem, dass es an standardisierten Qualitätssicherungsverfahren für Materialien, Prozesse und Bauteile sowie dem Verständnis für die wichtigsten Qualitätsmerkmale und Prüfverfahren fehlt. Zusätzlich herrscht keine Einigkeit darüber, welche Prüfverfahren am besten geeignet sind, um diese Merkmale zu messen. Einen Lösungsvorschlag haben das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) und der Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth entwickelt und einen kostenlosen Anwenderleitfaden zur Qualitätssicherung in der additiven Materialextrusion veröffentlicht. Der Leitfaden bietet Handlungsempfehlungen für die Planung, Fertigung und Kontrolle von additiv gefertigten Bauteilen, beschreibt die Teilprozesse, die die Bauteilqualität und Reproduzierbarkeit beeinflussen, und enthält ein Güteklassensystem zur objektiven Quantifizierung der Bauteilqualität. Der Fokus liegt dabei auf den Qualitätsmerkmalen Zugfestigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Form-/Maßhaltigkeit. Zudem werden bereits existierende Normen und Richtlinien der additiven Fertigung herangezogen. Der Leitfaden kann über die Website des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA heruntergeladen werden.³⁰

2.5 Multimateriallösungen

Der Einsatz unterschiedlicher Materialien war für 3D-Druckverfahren lange Zeit ökonomisch und technisch nicht interessant, da der Materialwechsel und der Reinigungsaufwand mit hohen Kosten verbunden waren. Durch Verbesserungen bei der Prozesssteuerung ist es mittlerweile möglich, mehrere Austrageinheiten in einen Produktionsschritt zu integrieren oder

²⁹ Vgl. Fraunhofer IST (2022).

³⁰ Vgl. Fraunhofer IPA (2022).

additive Fertigungsverfahren mit konventionellen Verfahren zu kombinieren. So sind in den letzten Jahren Verfahren entstanden, die unterschiedliche Kunststoffe oder Metalle in einem Prozessschritt kombinieren. Auch hybride Bauteile aus Kunststoffen mit Metallen oder faserverstärkte Materialien können mittlerweile durch additive Fertigungsverfahren hergestellt werden. Einige Technologien werden nachfolgend vorgestellt:

Kunststoff

Ein Beispiel für die additive Verarbeitung unterschiedlicher Kunststoffe ist das „Arburg Kunststoff-Freiformal“ (AKF). Damit wird eine Lösung für das Prototyping und die Serienfertigung von Funktionsbauteilen geboten. Das offene Fertigungssystem erlaubt dabei Anpassungen, um z.B. auch mechanische und geometrische Eigenschaften zu erzeugen, die Zugfestigkeiten und Bauteildichten erreichen, welche bisher lediglich mit Spritzgussverfahren umsetzbar waren. Mehrere Austrageinheiten ermöglichen es außerdem, auch Kunststoffe beispielsweise mit harten und weichen Eigenschaften zu kombinieren.³¹

Kunststoff-Metall

Die meist großen technischen und mechanischen Unterschiede zwischen vielen Metallen und Kunststoffen führen dazu, dass sich diese Werkstoffe in ihren Eigenschaften ideal ergänzen können. Eine Möglichkeit, additive Bauteile aus beiden Materialbereichen herzustellen, bieten Verfahren, bei denen der Kunststoff direkt auf den metallischen Rohling gedruckt wird. So können die technischen Vorteile hybrider Bauteile erzielt und gleichzeitig Probleme wie die Schwierigkeiten von additiv gefertigten, flächigen Metallbauteilen umgangen werden. Erste Einsatzgebiete gibt es z. B. bei der Herstellung von Fahrradrahmen, wobei auf ein Metallblech direkt ein faserverstärkter Kunststoff gedruckt wird.³²

³¹ Vgl. Kloke, A. (2018).

³² Vgl. Stier, T., Rieck, M. und Lammert, N. (2020).

Keramik-Metall

Das Zusammenspiel von isolierenden keramischen Werkstoffen und elektrisch leitenden Metallen ist insbesondere im Bereich der Elektrotechnik essenziell. Kombiniert man beide Werkstoffe in einem additiven Herstellungsverfahren, können z. B. Statorspulen oder Permanentmagneten mit deutlich höheren Designfreiheiten und besseren technischen Eigenschaften entwickelt werden. Ein US-Unternehmen nutzt ein Druckverfahren, bei dem drei oder mehr Pulverschichten auf ein Substrat aufgetragen werden. Die Maschine kann dabei unterschiedliche Metalle und Keramiken miteinander kombinieren. Nach dem Drucken wird das Werkstück in einem Ofen gesintert, wodurch das fertige Teil entsteht. Im Gegensatz zum Metall Binder Jetting (vgl. Kapitel 2.2) wird hier kein Binder verwendet. Stattdessen werden die Metallpartikel auf einem Trägermaterial aus Zirkon aufgetragen und anschließend zusammengesintert. Das System arbeitet darüber hinaus ohne Tintenstrahlköpfe, Walzen, Recoater oder Laser.³³

Faserverstärkte Bauteile

Auch der hybride Leichtbau ist mit 3D-Druckverfahren möglich. Kurzfaserige Verstärkungsfasern können beispielsweise eingebracht werden, indem die für einige additive Fertigungsverfahren eingesetzten Filamente mit Fasern verstärkt werden. Verfahren wie das sog. Fused Layer Modeling machen es außerdem möglich, auch Endlosfasern einzubringen und hierbei einen besonders hohen Faservolumengehalt zu erreichen, wodurch in Kombination mit einer geringen Bauteilporosität hohe Steifigkeiten und Festigkeiten in der generativen Faserverbundstruktur geboten werden. Durch die lokale Positionierung der Endlosfasern können lastpfadgerechte Substrukturen abgelegt werden, was den Leichtbaugrad eines Bauteils wesentlich steigert. Eine optimale Verteilung von Belastungen auf angrenzende Verbundpartner erhöht außerdem die Langlebigkeit und Qualität der Gesamtstruktur.³⁴

³³ Vgl. Korner, R. (2022b).

³⁴ Vgl. TU Dresden (2019).

3 POTENZIALE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCEN-EFFIZIENZ

Aufgrund sehr unterschiedlicher Anwendungsfälle ist es grundsätzlich schwierig zu bewerten, ob und wie sich 3D-Druckverfahren positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken. Offensichtlichen Vorteilen wie der Möglichkeit, den Materialeinsatz für das gewünschte Bauteil zu minimieren, stehen Nachteile wie der hohe Energiebedarf je gefertigtem Bauteil gegenüber.³⁵ Für eine klare Bewertung müssen die jeweils verwendeten Technologien und die gefertigten Objekte gesondert und im jeweiligen Anwendungsfall betrachtet werden.

Produktionskonzepte, ob konventionell oder additiv, haben in den letzten Jahren weitere Verbesserungen wie eine höhere Energieeffizienz oder Verbesserungen bei der Prozesssicherheit erfahren, die sich allgemein positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken. Zukünftig wird erwartet, dass neben weiteren Bestrebungen zur Produktivitätssteigerung auch die Angebote für mehr Flexibilität und Qualität verbessert werden. Entscheidend werden deshalb Maßnahmen zur Reduktion der Fertigungsschritte sein.³⁶ Prognosen aus der Fertigungstechnik zeigen, dass neben Flexibilitätsanforderungen auch ökologische Gesichtspunkte eine größere Rolle spielen werden. Dies ist sowohl auf allgemeine gesellschaftliche Forderungen nach ökologischen Produkten und Produktionswegen zurückzuführen, aber auch darauf, dass strengere Umweltgesetze sowie hochvolatile Rohstoff- und Energiepreise den Innovationsdruck verschärfen.³⁷ Angesichts der wachsenden Trends in Richtung Flexibilität und Umweltverträglichkeit haben 3D-Druckverfahren deshalb das Potenzial, einen bedeutenden Beitrag zu leisten und die Entstehung neuer wettbewerbsfähiger Produktionskonzepte zu fördern.

Das Dilemma in Bezug auf die Umweltverträglichkeit und damit auf die Ressourceneffizienz sowie weitere Anforderungen wettbewerbsfähiger

³⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2018), S. 22.

³⁶ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 2.

³⁷ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 3.

Produktionskonzepte wird jedoch am Beispiel der additiven Fertigung mit Multimateriallösungen (vgl. Kapitel 2.5) deutlich. Hybride Werkstoffe bieten in der Nutzungsphase häufig eine höhere Effizienz im Vergleich zu homogen gefertigten Bauteilen, da diese in der Regel Gewicht und Material einsparen können. Allerdings stellen die richtige Entsorgung und Aufbereitung einige ökologische Herausforderungen dar. Die Trennung der hybriden Bauteile ist durch den starken Verbund der unterschiedlichen Werkstoffe meist nicht rentabel, weshalb diese Bauteile in der Regel einem Downcycling oder einer thermischen Verwertung unterliegen.

Die additive Fertigung verspricht nun den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe ohne größere Rüstzeiten, was einerseits zu Effizienzsteigerungen bei der Produktion und in der Nutzungsphase führen kann, andererseits aber auch den Einsatz hybrider Bauteile vorantreiben könnte. Erst über den gesamten Lebensweg, mit den erheblichen Problemen bei der Entsorgung, sind die Herausforderungen für die Ressourceneffizienz zu erkennen. Es muss jedoch betont werden, dass bei der Entscheidung für hybride Bauteile der ökonomische Aspekt in der Regel vor dem ökologischen Aspekt stehen wird.

Ein weitaus positiveres Bild in Bezug auf Ressourceneffizienz ergibt sich, wenn die Vorteile der individuellen additiven Fertigung für die Reparatur- und Ersatzteilfertigung genutzt werden. Flexible Reparaturzellen können beispielsweise mit Technologien wie dem LMD (vgl. Kapitel 2.1) Bauteile vor Ort reparieren und anpassen, wodurch sich die Lebensdauer von Objekten verlängert und Ressourcen geschont werden. Technologien der additiven Fertigung ermöglichen außerdem eine schnelle und teilweise ortsunabhängige Herstellung von Ersatzteilen, was zur Erhöhung der Lebensdauer von Objekten und zur Reduzierung von Transportwegen sowie Lagerkosten beitragen kann und somit die Ressourceneffizienz erhöht.

Wo sich Potenziale, aber auch Grenzen der additiven Fertigung aus Sicht der Ressourceneffizienz finden, war Teil einer 2019 vom VDI ZRE veröffentlichten Studie. Dort konnte gezeigt werden, dass der ökonomische und ökologische Einsatz durch unterschiedliche Faktoren begrenzt wird. Diese werden wie folgt beschrieben:

- Die Produktart, die Menge sowie die Werkstoffauswahl bestimmen die ökologische Sinnhaftigkeit der additiven Fertigung.
- Um die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit von 3D-Verfahren steigern zu können, empfiehlt es sich, die komplexen Designmöglichkeiten, die mit additiven Fertigungsverfahren einhergehen, zu nutzen.
- Verbesserungsmaßnahmen wie optimale Bauraumauslastungen oder technische Optimierungsmaßnahmen wie die Reduktion des Energieverbrauchs der 3D-Druckanlagen können ebenfalls dazu beitragen, die Verfahren für weitere Produktionsschritte zu etablieren.³⁸
- Die in der Studie präsentierten Erkenntnisse zur Ressourceneffizienz in der additiven Fertigung zeigen, dass die tatsächlichen Vorteile einer ökologisch sinnvollen Implementierung von vielen Faktoren abhängig sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, verschiedene Ebenen von Unternehmen im Hinblick auf die Umsetzung von tatsächlich ressourceneffizienten 3D-Druckverfahren zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 7).

In den nachfolgenden Abschnitten sollen deshalb die Chancen für die Ressourceneffizienz für die Bereiche der Geschäftsmodelle, der Produktentwicklung und Produktion genauer vorgestellt werden.

³⁸ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019), S. 16.

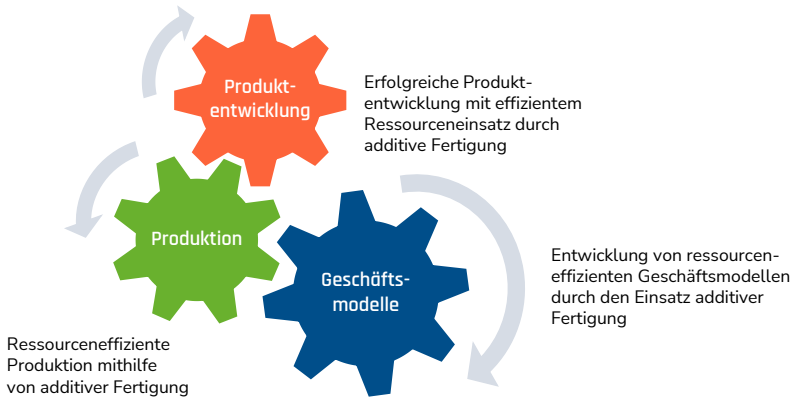


Abbildung 7: Ziele der ressourceneffizienten additiven Fertigung in verschiedenen Unternehmensebenen³⁹

3.1 Geschäftsmodelle

Der Begriff „Geschäftsmodell“ ist nicht klar definiert, kann aber als „[...] Grundprinzip, nach dem eine Organisation Werte schafft, vermittelt und erfasst“⁴⁰ werden. Sollen Geschäftsmodelle auf Basis additiver Fertigungsverfahren entwickelt werden, so empfiehlt es sich, in einem ersten Schritt wichtige Fragen zu Kundinnen und Kunden, Lieferantinnen und Lieferanten und internen Abläufen zu stellen. Dafür wurden in den letzten Jahren diverse Vorlagen wie das Business Model Canvas entwickelt.⁴¹

Die konkrete Umsetzung bzw. Implementierung der additiven Fertigung in neue Geschäftsmodelle ist von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich und hängt u. a. von dem vorhandenen Know-how und der Infrastruktur

³⁹ Eigene Darstellung.

⁴⁰ Osterwalder, A. und Pigneur, Y. (2011), S. 11.

⁴¹ Weiterführende Informationen zur Geschäftsmodellentwicklung können der VDI ZRE-Kurzanalyse Nr. 29 „Neue Geschäftsmodelle und Ressourceneffizienz“ entnommen werden: www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-29-geschaeftsmodelle/

ab. Wichtig ist, zu beachten, dass neue Geschäftsmodelle primär ökonomisch getrieben sind. So kann die Implementierung additiver Fertigungsverfahren auch zu einem höheren Ressourcenverbrauch führen, da beispielsweise der Energieverbrauch je Bauteil höher ausfallen kann als bei konventionellen Herstellungsverfahren.

Im Einzelfall müssen deshalb ökonomische und ökologische Kosten sowie Einsparungen genau gegenübergestellt werden. Im Einklang mit Aspekten der Ressourceneffizienz kann die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle mit 3D-Druckverfahren wie folgt erfolgreich umgesetzt werden:

Additive Teileherstellung

Mittels 3D-Drucker ist es möglich, (Ersatz-)Teile bereits ab Losgröße 1 wirtschaftlich herzustellen. Neben technischen Verbesserungen der Maschinen spielt dabei auch die Digitalisierung eine wichtige Rolle. So können die gewünschten Objekte bereits von den Kundinnen und Kunden selbst in Form von CAD-Dateien erstellt und den 3D-Druckunternehmen zugesandt werden. Dies kann sich positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken, da Überproduktionen und hohe Lagerkapazitäten vermieden werden können und insbesondere die Erstellung kostengünstiger und passgenauer Ersatzteile ermöglicht wird.

Die Fertigung erschwinglicher individueller Bauteile, hergestellt durch 3D-Druckverfahren, begünstigt wiederum Reparaturen und kann so auch zur Verlängerung der Produktlebensdauer und damit zur Ressourceneffizienz beitragen.

Service-basierte Geschäftsmodelle

Auch in diesem Fall liegen die Potenziale nicht allein in den Technologien der additiven Fertigung, sondern in der Kombination mit digitalen Technologien. Speziell für Kleinserien und Einzelteile ist die Anschaffung ganzer Maschinen häufig nicht rentabel. Herstellende von 3D-Druckmaschinen können neben der Fertigung auch Dienstleistungen wie die Entwicklung der Bauteile oder Designobjekte sowie notwendige Bauteil- und Produktions-

berechnungen übernehmen. Umgekehrt ist es ebenso möglich, dass Unternehmen für einzelne Vorhaben Drucker leasen und so einen vereinfachten Markteintritt erhalten. Neben den bereits bei der Teileherstellung genannten Vorteilen für die Ressourceneffizienz liegen die Chancen durch den Fokus auf Dienstleistungen insbesondere bei den niedrigeren Eintrittsbarrieren und den gezielteren Angeboten aufgrund der Spezialisierung einzelner Unternehmen.

So ist es möglich, dass auf additive Fertigungsverfahren spezialisierte Unternehmen das notwendige Know-how und die Infrastruktur mitbringen, um die Potenziale wie eine optimale Bauteilauslegung oder den optimalen Materialeinsatz gänzlich auszuschöpfen, womit auch eine höhere Ressourceneffizienz einhergeht.

Lizenzierungs- und softwarebasierte Geschäftsmodelle

Patente und geistiges Eigentum für additiv produzierte Teile, Designs und Software nach ökologischen Standards können ebenfalls die Basis neuer Geschäftsmodelle bilden. Neben der Hardware der 3D-Drucker spielt auch die Software bei der (ökologischen) Verbesserung eine wichtige Rolle. Die Steigerung der Ressourceneffizienz kann beispielweise durch Optimierungsoftware erfolgen, wenn bisherige Fertigungsprozesse analysiert und hinsichtlich der Möglichkeiten zur Reduzierung der Lieferzeiten und CO₂-Emissionen sowie Steigerung der Komponentenqualität und Liefersicherheit verbessert werden.

Spezielle Software kann auch dabei helfen, den Druckbereich des jeweiligen 3D-Druckers mit verschiedenen Baugruppen optimal auszulasten, wodurch sich beispielsweise der Energieverbrauch je gefertigtem Bauteil reduziert.

Schulungsangebote

Mittlerweile gibt es einige Unternehmen, die bereits mehrjährige Erfahrungen mit der additiven industriellen Fertigung vorweisen können. Diese Unternehmen können ihre Erfahrungen und Kenntnisse nutzen, um interessierte Unternehmen bei der Implementierung von 3D-Druckverfahren, zum

Beispiel durch Seminare oder Beratungen, zu unterstützen. Dabei ist zu erwarten, dass mit der passenden Schulung die Fehlerquote bei der Nutzung sinkt. Werden außerdem Informationen zu Energieeinsparungen oder zur optimalen Bauraumausnutzung geteilt, trägt dies ebenfalls zu mehr Ressourceneffizienz bei.

Nachhaltigkeit in das Geschäftsmodell integrieren

Die Rapidobject GmbH aus Leipzig bietet verschiedene Lösungen im Bereich des 3D-Drucks wie maßgeschneiderte Anwendungen und Bauteilkonstruktionen an. Darüber hinaus nutzt sie die jahrelange Erfahrung im Bereich der additiven Fertigung für Webinare und um Unternehmen bei der Implementierung ganzer 3D-Druck-Abteilungen zu beraten. Dabei spielen auch ökologische Aspekte eine immer wichtigere Rolle.

Neben den internen Maßnahmen wie der Reduktion des Energieverbrauchs durch Frischluftnutzung bei den Maschinen oder vielfältige Qualitätsmanagement-Maßnahmen zur Reduktion von Fehldrucken⁴² können Unternehmen bei Teilebestellungen außerdem entscheiden, ob diese gebündelt mit anderen Bestellungen verschickt werden, um Transportwege und damit Ressourcen einzusparen.

Obendrein schult das Unternehmen Interessierte bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten in der additiven Fertigung. Neben der Beratung zur Vermeidung von Konstruktionsfehlern gibt es beispielsweise ein Angebot zur kostenlosen Datenreparatur, Beratungen zur bionischen Bauteilerstellung und zur Bauteilkonsolidierung.⁴³

⁴² Vgl. Rapidobject GmbH (2022b).

⁴³ Vgl. Rapidobject GmbH (2022a).

Ersatzteillieferung mit niedrigen Lagerhaltungskosten

Die EvoBus GmbH, Tochter des Daimlerkonzerns, stellt Omnibusse in der Gewichtsklasse über acht Tonnen her. Aufgrund des breiter werdenden Produktportfolios und der Notwendigkeit, Kundinnen und Kunden über mehr als 15 Jahre hinweg Ersatzteile zur Verfügung zu stellen, steht das Unternehmen vor der Herausforderung steigender Lagerungskosten und langer Lieferzeiten. So mussten 2019 etwa 300.000 Ersatzteile verwaltet und ein erheblicher Anteil auch durchgehend gelagert werden. Oftmals kommt es aufgrund von Mindestabnahmemengen zur Überproduktion, da es erforderlich ist, 15, 20 oder sogar 100 Teile abzunehmen, obwohl nur ein einziges benötigt wird.

Um diese Probleme zu lösen, setzt EvoBus auf die Implementierung der additiven Fertigung. So konnten bereits über 7.000 Teile identifiziert werden, die sich für den 3D-Druck eignen, und die Beschaffungszeit für die Bauteile konnte um bis zu 80 % gekürzt werden.

Mittlerweile bietet EvoBus im neu gegründeten Bereich „Additive Manufacturing Solutions“ Dienstleistungen über die komplette Wertschöpfungskette der additiven Fertigung an: von der Auswahl additiv herstellbarer Bauteile über die Aufbereitung von Bauteildaten sowie Fertigung der Bauteile bis hin zur Speicherung der Daten in einem digitalen Lager.⁴⁴

Hilfe bei der Fertigungsentscheidung

Die Part-Screening-Software vom Hamburger Unternehmen 3D-Spark GmbH ermöglicht es, Bauteile zu identifizieren, bei denen sich eine Umstellung auf additive Fertigung ökonomisch und ökologisch lohnt. Nach dem Einpflegen der eigenen Bauteil-Datenbank analysiert die Software automatisch alle Teile.

⁴⁴ Vgl. EvoBus GmbH (2022).

Neben der Identifikation der ökonomischen Potenziale durch 3D-Druck kann durch die Software außerdem identifiziert werden, bei welchen Teilen eine Umstellung grundsätzlich möglich ist, bei welchen Objekten die Lieferzeit und wo die CO₂-Emissionen gesenkt werden können.

Mit Hilfe der Screening-Software wurden zum Beispiel das Türgelenk eines Kleinserien-Sportwagens analysiert und Verbesserungspotenziale abgeleitet. Anhand der Optimierungsmaßnahmen konnten im Forschungsrahmen die Produktionskosten gegenüber konventioneller Fertigung um 50 % gesenkt und gleichzeitig die Funktionen verbessert werden.^{45,46}

3.2 Produktentwicklung

Der spätere Ressourceneinsatz in der Produktion, Nutzungs- und Entsorgungsphase wird maßgeblich von der Produktentwicklung beeinflusst. Es wird davon ausgegangen, dass in der frühen Phase der Produktentwicklung insgesamt etwa 80 % der späteren Umweltauswirkungen des Produkts festgelegt werden.⁴⁷

Additive Fertigungsverfahren werden mittlerweile immer öfter bei der Produktentwicklung eingesetzt. So gaben von etwa 1.900 weltweit befragten Unternehmen 54 % an, 3D-Druckverfahren in der Forschung und Entwicklung einzusetzen.⁴⁸ Die schnelle Entwicklung von physischen Konzepten und Modellen kann dabei als Innovationsschub dienen und so auch ökologische Ideen vorantreiben. Sinnvoll ist hierbei z. B. die Zusammenarbeit der Industrie mit der praxisnahen Forschung. Die Potenziale für die Steigerung der Ressourceneffizienz, die durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren während der Produktentwicklungsphase entstehen, können wie folgt beschrieben werden:

⁴⁵ Vgl. 3D Spark GmbH (2022).

⁴⁶ Vgl. Korner, R. (2022a).

⁴⁷ Vgl. McAlone, T. C. und Pigosso, D. C. (2021), S. 986.

⁴⁸ Vgl. Sculpteo (2021), S. 6.

Rapid Prototyping und Rapid Tooling

Eine Möglichkeit, die Produktentwicklung in verschiedene Phasen einzuteilen, ist die Kategorisierung in „Klären der Aufgabe“, „Konzeptphase“, „Entwurfsphase“ und „Ausarbeitungsphase“.⁴⁹ Bereits frühzeitig können dabei 3D-Druckverfahren zum Einsatz kommen: Das sog. „Rapid Prototyping“ dient insbesondere der Herstellung von Konzept-, Design-, Geometrie- und Funktionsmodellen.⁵⁰ In diesem Fall sind additive Fertigungsverfahren dafür geeignet, kostengünstig und schnell zum gewünschten Ergebnis zu kommen oder um erste Konzepte oder Entwürfe auch in physischer Form vorliegen zu haben. Entwicklerteams können so mit geringem Material- und Energieaufwand zukünftige Funktionsweisen oder Verfahren physisch testen, ohne dass hierfür große Mengen an Material und Energie, beispielsweise für den Werkzeugbau, aufgewendet werden müssen.

Das sog. „Rapid Tooling“ beschreibt die generative Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen.⁵¹ Auch hier kann es im Sinne der Ressourceneffizienz sein, wenn gewünschte Vorrichtungen und Werkzeuge in-house und ohne Transport gefertigt werden können. Im Vergleich zum herkömmlichen energieintensiven Werkzeugbauverfahren lassen sich mittels additiver Fertigung die gewünschten Objekte außerdem ohne Werkzeuge herstellen, wodurch ebenfalls Ressourcen geschont werden.

Gestaltungsfreiräume

Mit Hilfe der additiven Fertigung können komplexe Bauteile hergestellt werden, die mit konventionellen Verfahren technisch nicht oder schwer umsetzbar wären. Dank dieser Teilekonsolidierung ist es für Produktentwicklungsteams möglich, Objekte so zu optimieren, dass eine Materialverschwendung vermieden wird, was zu einer Reduzierung des Material- und Energiebedarfs führt. Die vielfältigen Gestaltungsräume gestatten außerdem, den Fokus deutlich mehr auf die Bauteilperformance zu legen, wodurch

⁴⁹ Vgl. McAloone, T. C. und Pigosso, D. C. (2021), S. 986.

⁵⁰ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 118.

⁵¹ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 118.

Effizienzpotenziale ebenfalls optimal ausgenutzt werden können. Die Gestaltungsfreiräume helfen auch dabei, sich an Baustrukturen der Natur zu orientieren und diese umzusetzen. Diese sog. bionischen Strukturen sind nicht nur bei der Identifikation von Materialeinsparungen von Nutzen, sondern können dadurch ebenso die Druckzeit reduzieren, wodurch gleichfalls Ressourcen geschont werden.⁵²

Reparatur- und recyclinggerechte Bauteile

Die genannten Gestaltungsfreiräume, welche mit der additiven Fertigung einhergehen, bergen aus Sicht der Ressourceneffizienz auch einige Herausforderungen. Häufig liegt der Fokus bei dem Produktdesign und der -entwicklung auf einer effizienten Herstellung sowie auf der Nutzungsphase. Die im Vergleich zu konventionellen Verfahren einfache Erzeugung komplexer Geometrien kann allerdings bei der Entsorgung, Aufbereitung und Reparatur der Bauteile problematisch sein. So sind Hinterschneidungen oder später unzugängliche Hohlräume mit Hilfe der additiven Fertigung technisch umsetzbar und teilweise auch in der Nutzungsphase gewünscht, allerdings für die Reparatur und Entsorgung herausfordernd.

Aus diesem Grund sollten Entwicklerteams insbesondere bei komplexen Geometrien auch die Reparierbarkeit und die Möglichkeiten der richtigen Wiederaufbereitung der Materialien nach der Nutzungsphase berücksichtigen. Hilfreich sind hierbei die Prinzipien des Ecodesigns (vgl. Abbildung 8).

⁵² Weiterführende Informationen zur Bionik können der VDI ZRE-Kurzanalyse Nr. 19 „Ressourceneffizienz durch Bionik“ entnommen werden: www.ressourcendeutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-19-bionik/

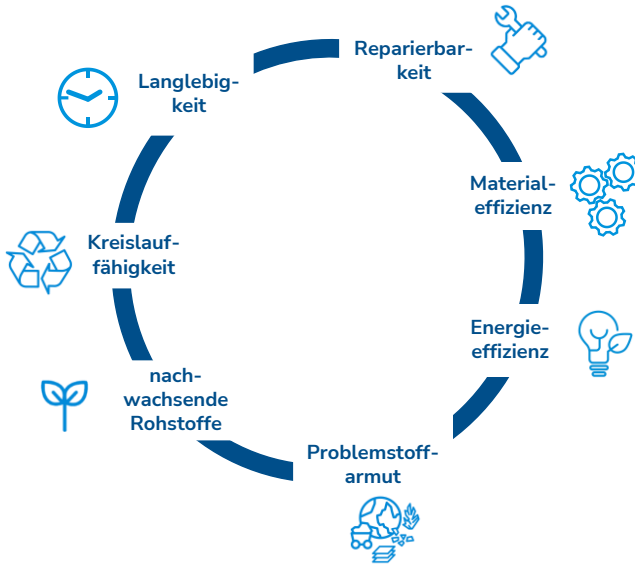


Abbildung 8: Prinzipien des Ecodesigns⁵³

Schneller zum ressourceneffizienten Ergebnis

SSI Schäfer nutzte bei der Herstellung der Lager-, Kommissionier- und Transportbehälter lange Zeit ein universell einsetzbares Greifsystem aus Aluminium. Mehrmalige Produktionsausfälle durch falsches Greifen sowie der hohe wiederkehrende Umrüstungsaufwand von etwa zehn Minuten haben das Unternehmen dazu veranlasst, einen neuen Greifer zu entwickeln.

Die Entwicklung des neuen Greifers wurde mit Hilfe der additiven Fertigung durchgeführt. Dabei war das Ziel, die Bauteile so zu konstruieren, dass Stabilität und Funktionalität durch die kompakte Baugröße und ein niedriges Eigengewicht des Greifers miteinander harmonieren.

⁵³ Eigene Darstellung auf Basis von Ökopool und IDZ (2015) sowie Umweltbundesamt (2019).

Da die Testmodelle schnell hergestellt werden konnten, war es möglich, verschiedene Greifmodelle innerhalb von Tagen zu testen. Das Ergebnis hat sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile: Rüstzeiten konnten um 80 % und die Produktionszeit um etwa 120 Stunden im Jahr reduziert werden. Die Gewichtsersparnis von über 70 % und die gesteigerte Bedienungsfreundlichkeit führen außerdem zu Energieeinsparungen und zur Reduzierung von Produktionsausfällen mit Ausschuss.⁵⁴

3.3 Produktion

Die Neu- und Weiterentwicklung der 3D-Druckverfahren haben dazu geführt, dass neben der Produktentwicklung und Einzelteilerfertigung die additive Fertigung immer häufiger auch in der Serienproduktion zum Einsatz kommt. Wie in Kapitel 2 beschrieben, wurde 2019 etwa bei einem Drittel der befragten Unternehmen die additive Fertigung bereits in Produktionsprozessen herangezogen (vgl. Kapitel 2).

Der Einsatz in der Serienfertigung war unter anderem Teil einer 2021 von der Medienmarke „Industry of Things“ durchgeführten Erhebung. Dabei konnte festgestellt werden, dass von 453 befragten Unternehmen vor allem in der Medizintechnik bereits mehr als 50 % 3D-Druckverfahren in der Serienfertigung verwenden. Auch im Bereich des Maschinenbaus (37 %) und der Automatisierung (26 %) nutzen schon mehr als ein Viertel der Unternehmen die additive Fertigung zur Serienproduktion (vgl. Abbildung 9).

⁵⁴ Vgl. EOS GmbH (2019).

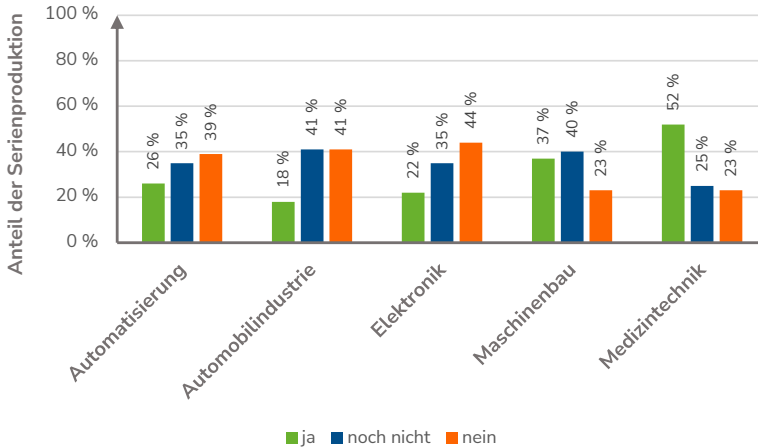


Abbildung 9: Serienproduktion mittels additiver Fertigung je Branche⁵⁵

Um die additive Fertigung in der Produktion erfolgreich einzusetzen und auch ökonomisch mit den konventionellen Fertigungsverfahren konkurrieren zu können, sind insbesondere eine hohe Bauteilqualität, die Produktivität und Prozesssicherheit zu gewährleisten. Entscheidende Einflussgrößen auf die notwendige Ergebnisqualität sind hierfür gemäß der VDI-Richtlinie 3405 die Einflussgrößen der vorher entworfenen CAD-Modelle, die Fertigungsanlagen, die Prozessbedingungen, die eingesetzten Werkstoffe sowie die Bauteileigenschaften⁵⁶.

Leistungsfähige 3D-Modellierungssoftwares garantieren außerdem die schnelle Entwicklung eines fertigungsgerechten Designs. Große Softwareanbieter wie Autodesk bieten dabei mittlerweile Programme für die effiziente Druckvorbereitung und Werkzeuge zur Optimierung von Konstruktionen. Die ideale Anordnung des Bauraums gehört ebenso zur Grundausstattung wie die Konfiguration der Stützstrukturen oder die Belastungssimulation mit unterschiedlichen Werkstoffen.⁵⁷ Genauere Informationen

⁵⁵ Eigene Darstellung auf Basis von Quitter, D. (2021b).

⁵⁶ Vgl. VDI 3405:2014-12.

⁵⁷ Vgl. Autodesk GmbH (2023).

darüber, inwiefern 3D-Druckverfahren zu Fortschritten der ressourceneffizienten Produktentwicklung beitragen können, sind in Kapitel 3.2 zu finden.

Die weiteren in der VDI-Richtlinien 3405 genannten Einflussgrößen haben in den letzten Jahren ebenfalls Verbesserungen erfahren und können neben besseren Ergebnissen der additiv gefertigten Bauteile auch zu mehr Ressourceneffizienz beitragen. Nachfolgend sollen deshalb einige Aspekte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3405 vorgestellt werden:

Verbesserung der Fertigungsanlagen

Die ständige Weiterentwicklung additiver Fertigungsanlagen spiegelt sich unter anderem im massiven Anstieg der Patentanmeldungen zu 3D-Druckverfahren wider (vgl. Abbildung 10). So entsprachen 2018 die jährlichen globalen Patentanmeldungen im Vergleich zu 2007 bereits mehr als dem Zehnfachen. Die Zahlen verdeutlichen einerseits die hohe Innovationsdynamik, machen aber auch ersichtlich, dass die Technologielandschaft immer komplexer wird.

Aufgrund der Innovationsdynamik ist es für Interessierte schwierig, passende Angebote für den jeweiligen Anwendungsfall zu finden. Hilfreich kann es deshalb sein, sich auf Portalen wie 3dnatives.com Vergleichsangebote erstellen zu lassen. So können neben dem 3D-Druck-Typen auch die Technologieart, Materialien sowie Preiskategorien eingestellt werden. Interessierte können anschließend bis zu vier Drucker gleichzeitig kostenlos vergleichen. Mit Hilfe des Vergleichsportals werden auch die mittlerweile hohen technologischen Unterschiede der jeweiligen Anbietenden ersichtlich.⁵⁸

⁵⁸ Weiterführende Informationen unter: <https://www.3dnatives.com/3D-compare/de/3d-drucker/>

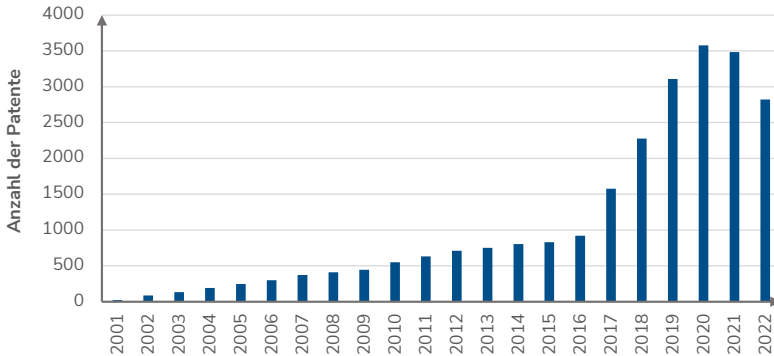


Abbildung 10: Anzahl der Patente im Bereich der additiven Fertigung von 2001 bis 2022⁵⁹

Neben der rasanten Innovationskraft hält in den letzten Jahren ebenso der Anstieg der Rechnerleistung von Computern an. Neue Fertigungsanlagen, zu denen Maschinen der additiven Fertigung durch die hohe Entwicklungsdynamik häufig gehören, verfügen im Zuge der weiteren Digitalisierung bereits über die Schnittstellen, um eine Vernetzung mit der IT-Infrastruktur im Unternehmen zu gewährleisten. Es ist deshalb davon auszugehen, dass Dienstleistungen wie die schnelle und vorausschauende Wartung mittlerweile bei den meisten industriell einsetzbaren 3D-Druckern angeboten werden können. Aus Sicht der Ressourceneffizienz ist zu erwarten, dass so weniger Probleme mit den Maschinen auftreten und eine niedrige Ausschussrate der zu produzierenden Teile garantiert werden kann. Die Verlängerung von Wartungsintervallen reduziert außerdem das energieintensive Neuanfahren der Fertigungsmaschinen.

Mit der Steigerung der Zuverlässigkeit der Maschinen geht ebenso die Gewährleistung der Bauteilqualität einher, was sich positiv auf die Nutzungsbzw. Lebensdauer auswirken kann, wodurch gleichfalls Ressourcen geschont werden.

⁵⁹ Eigene Darstellung auf Basis von Google Patents (2023): Patente zur Additiven Fertigung zwischen 2001 und 2022.

Eine weitere wichtige Rolle bei der Verbesserung der Fertigungsanlagen spielt die Energieeffizienz. Viele Fertigungsarten sind auf spezielle mikroklimatische Bedingungen wie Lufttemperatur oder Feuchtigkeit angewiesen. So gibt es Unternehmen, die Frischluft zur Kühlung der Bauräume verwenden⁶⁰ oder die energieintensive Lufttrocknung durch Wärmerückgewinnungssysteme effizienter gestalten.⁶¹ Auch vorab wichtige Voraussetzungen wie die richtigen Korngrößen der Materialien bei pulverbasierten additiven Fertigungserfahrungen wurden in den letzten Jahren z. B. durch Hochleistungspulvermühlen verbessert.⁶² So kann unter anderem gewährleistet werden, dass recycelte Kunststoffe oder Metalle wieder die richtigen technischen Eigenschaften mitbringen.

Evolution der 3D-Drucker

Neben der weiteren Zunahme der Technologievelfalt gibt es auch in den jeweiligen Technologien Verbesserungen. Deutlich wird dies bei der Firma Arburg aus Loßburg.

AKF steht für Arburg Kunststoff Freiformen. Mit diesem Verfahren ist die additive Fertigung auch mittels Standardgranulaten, beispielsweise aus dem Spritzgussbereich, möglich. Der Bauteilaufbau erfolgt werkzeuglos über einen beweglichen Bauteilträger. Das Granulat wird in einer speziellen Plastifizierschnecke aufgeschmolzen und über einen hochfrequent getakteten Piezo-Düsenverschluss im Millisekundentakt in Tropfenform aufgetragen. Der AKF verfügt über zwei Einheiten, die die Produktion einer harten/weichen Komponente oder eines Aufbaus mit stützendem Material ermöglichen. Dieses Stützmaterial kann nach dem Herstellungsprozess unter Wasser entfernt werden.⁶³

⁶⁰ Vgl. Rapidobject GmbH (2022b).

⁶¹ Vgl. Additive - Die Plattform für industrielle Fertigung (2020a).

⁶² Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2023).

⁶³ Vgl. Arburg GmbH & Co. KG (2022).

Ein Vergleich der unterschiedlichen Freiformer, die das Unternehmen in den letzten Jahren entwickelt hat, zeigt, dass die Produktivität auch ohne spezielle Automatisierungssysteme deutlich gesteigert werden kann. Mit dem Freeformer 750-3X wurden viele Verbesserungen im Detail und der Einsatz neuer, deutlich kompakterer Druckköpfe umgesetzt. Bei gleichen Außenmaßen konnte der Bauteilträger im Vergleich zum bisherigen Modell 250-3X rund 2,5-mal größer gestaltet werden, wodurch deutlich mehr Bauteile auf einen Bauteilträger passen. Gemeinsam mit weiteren Optimierungen konnte Arburg dadurch die Druckzeit für ein Musterteil um 85 % reduzieren.⁶⁴ Diese Umstände sind Hinweise dafür, dass eine Verkürzung der Druckzeit und eine höhere Nutzung der vorhandenen Bauteile zu einer Verbesserung der Ressourceneffizienz führen werden.

Bessere Prozessbedingungen

Die fortschreitende Digitalisierung hat in den letzten Jahren Verbesserungen der Prozessführung bewirkt, sodass die Regelung von Temperatur, Druck und anderen Prozessparametern speziell durch den Einsatz geeigneter Software und die Verknüpfung der Maschinen garantiert werden kann.

Je nach Verfahrens-, Material- und Konstruktionsart sind die zu beachtenden Prozessparameter sehr unterschiedlich. Allgemein sollten deshalb zur Verbesserung der Prozessbedingungen folgende Aspekte beachtet werden:

- Bevor ein Teil gedruckt wird, sollte das Design validiert werden, um sicherzustellen, dass es für die additive Fertigung geeignet ist. Dabei sollten sowohl die geometrischen Anforderungen als auch die mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden.
- Druckparameter wie Druckgeschwindigkeit, Schichthöhe, Drucktemperatur und Materialflussrate sollten durch geeignete Software überwacht werden. Vor Druckstart sollte das Bauteil außerdem so in den Bauraum

⁶⁴ Vgl. Kögel, G. (2022).

„eingelegt“ werden, dass Stützstrukturen möglichst vermieden werden können, wodurch der Einsatz von Ressourcen reduziert werden kann.

- Verunreinigungen oder Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Materialqualität sollten überwacht werden, um sicherzustellen, dass die Qualität des Endergebnisses konsistent bleibt.
- Um zu gewährleisten, dass die verwendete Maschine ordnungsgemäß funktioniert, ist es wichtig, die richtige Konfiguration der Maschineneinstellungen zu überprüfen sowie eine Zustandsüberwachung der Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen durchzuführen und sicherzustellen, dass alle Teile und Komponenten der Maschine in gutem Zustand sind.
- Alle Schritte im Druckprozess sollten dokumentiert und nachverfolgt werden, um zu gewährleisten, dass der Prozess reproduzierbar und rückverfolgbar ist.
- Durchgängige Datenformate für die Entwicklung, Druckvorbereitung, Drucksimulation und Druckbahnenbereitstellung spielen dabei eine wichtige Rolle.⁶⁵ Siemens bietet beispielsweise mit der Software NX eine Konstruktions-, Simulations- und Fertigungslösung, die es ermöglicht, digitale Zwillinge effizient zu realisieren. Mit Hilfe integrierter Tools zur Koordinierung kann so die Datenintegrität über den kompletten Entwicklungsprozess bis hin zur (additiven) Fertigung sichergestellt werden.⁶⁶
- Mitarbeitende, die den Druckprozess durchführen, sollten entsprechend geschult und qualifiziert sein, um den Prozess sicher und zuverlässig umsetzen zu können.

Verbesserte Prozessbedingungen ermöglichen eine höhere Konsistenz und Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses, wodurch insbesondere auch die Herstellgeschwindigkeit, welche lange Zeit einen limitierenden Faktor beim 3D-Druck darstellte, bei einigen Technologien gewährleistet werden kann. Bessere Prozessbedingungen führen außerdem dazu, dass der

⁶⁵ Vgl. Trummer, R. (2022).

⁶⁶ Vgl. Siemens (2022).

Ausschuss minimiert werden kann – u. a. dank effizienter Qualitätssicherung. Positiv für die Ressourceneffizienz kann es sich außerdem auswirken, wenn der Fertigungsraum der 3D-Drucker ideal ausgefüllt ist, beispielsweise durch eine vorher simulierte optimierte Bauteil- oder Baugruppenauslegung.

Verformungen beim Metal Binder Jetting präventiv verhindern

Beim Metal Binder Jetting (MBJ) ist das Sintern im letzten Prozessschritt mit erheblichen Herausforderungen verbunden, da es zu Bauteilverformungen kommen kann, die nur schwer vorhersehbar sind. Das Hamburger Unternehmen Simufact hat die Simulationssoftware „Simufact Additive“ auf den Markt gebracht, die bei diesem Problem Abhilfe schaffen will.

Anwendende können mit der Software bereits in der Konstruktionsphase Bauteilverformungen erkennen und verhindern. Dafür werden die Bauteile virtuell gedruckt und analysiert, wodurch die Schrumpfungsprozesse noch vor dem tatsächlichen Druck erkannt und angepasst werden können. Mittels Python-Skripten ist es möglich, verschiedene Varianten der MBJ-Prozesse automatisiert zu erstellen und zu berechnen. Dabei kann auch ein Versuchsplan genutzt werden. Um sicherzustellen, dass die Sinterkompensation korrekt und die Qualität der Ergebnisse gewährleistet ist, kann die optimierte Geometrie des MBJ-Tools innerhalb der Benutzeroberfläche mit der ursprünglichen Konstruktionsgeometrie (CAD) sowie mit einem Scan eines bereits gefertigten Teils verglichen werden.⁶⁷

Eine Verbesserung des Herstellungsprozesses verhindert nicht nur fehlerhafte Bauteile, sondern reduziert ebenso den energieintensiven Herstellungsprozess und trägt so zur Ressourceneffizienz bei.

⁶⁷ Vgl. Juschkat, K. (2020).

Energieeffiziente Prozessluft-Trocknungsanlage

SLM ist ein Fertigungsprozess, bei dem feines Metallpulver schichtweise aufgetragen und mittels Laser geschmolzen wird. Dieser Prozess ermöglicht die Herstellung hochkomplexer Objektstrukturen mit großer Präzision und geringer Materialverschwendung. Eine zu hohe Luftfeuchtigkeit, die zu ungewollter Oxidation des Metallpulvers führt, kann die Qualität des Endprodukts und die Prozessstabilität gefährden. Dies liegt daran, dass die physikalischen Eigenschaften des gelagerten Werkstoffpulvers beeinträchtigt werden können. Eine weitere Herausforderung besteht darin, den SLM-Prozess effizient zu gestalten.

Für die Trocknung von Prozessluft in Produktionsräumen müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein. Diese umfassen Temperaturen zwischen 19 und 22 °C sowie eine regulierbare relative Luftfeuchtigkeit von 10 bis 40 %, die je nach Art des verwendeten pulverförmigen Metalls konstant gehalten werden muss. Gängige Methoden wie die Kondensation des Wasserdampfs reichen in vielen Fällen deshalb nicht aus.

Eine effektive Methode zur Entfeuchtung der Luft in Produktionsräumen ist die Verwendung von Rotationsentfeuchtern. Diese nutzen ein rotierendes Sorptionsrad, um den feuchten Luftstrom zu trocknen und das Adsorptionsmittel auf der Gegenseite zu regenerieren. Durch die Erweiterung des Sorptionsmoduls mit Vor- und Nachkühlern und einen Nachheizer können Taupunkte von bis zu -65 °C erreicht werden.

Die Prozessluft-Trocknungsanlage des Dresdner Unternehmens ULT Dry-Tec ist ein modulares und energieeffizientes Gerät, das eine hohe Entfeuchtungsleistung bietet und mit regelbaren Ventilatoren und integrierter Wärmerückgewinnung ausgestattet ist. Die Prozessluft-Trocknungsanlage verfügt über ein effektives Wärmerückgewinnungssystem, das bis zu 35 % der Energie einspart, die zur Erhitzung des Luftstroms im Desorptionskreislauf benötigt wird. Dabei wird die Wärme aus dem Abluftstrom und einem Teil der enthaltenen Kondensationswärme gewonnen und direkt in den angesaugten Regenerationsluftstrom geleitet.

Das ULT-Dry-Tec-Modulkonzept ermöglicht es Betreibern, eine auf ihre spezifischen Anforderungen zugeschnittene Anlage aus standardisierten Anlagenteilen zusammenzustellen.⁶⁸

Neue und verbesserte Materialien

Gegenwärtig kommen vor allem bei Einzelteilfertigungen noch viele Materialien zum Einsatz, die ursprünglich nicht ausschließlich für additive Fertigungsverfahren entwickelt wurden, sondern u. a. auch im Kunststoffspritzguss oder beim Sintern Verwendung finden. Unerwünschte Effekte wie Anisotropie oder Eigenspannungen entstehen dabei oft unvorhersehbar. Aus diesem Grund gibt es in den letzten Jahren viele Projekte zur Neu- und Weiterentwicklung der Materialien.⁶⁹

Vor allem im Bereich der Kunststoffe konnten zahlreiche Verbesserungen bei den Werkstoffeigenschaften erreicht werden, wodurch diese für den vermehrten Einsatz additiver Fertigungsverfahren interessant werden. Technische Kunststoffe erreichen mittlerweile die geforderte Marktreife, um auch in serienmäßigen 3D-Druckfertigungen genutzt zu werden. Aber ebenso im Bereich der Hochleistungskunststoffe ist es inzwischen möglich, Bauteile aus Aluminium durch PEEK zu substituieren. Ein weiteres wichtiges Ziel für Herstellende liegt in der Verwendung von Basiskunststoffen, um die Kosten dahingehend zu senken, dass additive Fertigungsverfahren auch wirtschaftlich mit konventionellen Verfahren konkurrieren können.⁷⁰

Nicht immer ist ersichtlich, ob eine Verbesserung oder Erneuerung der Materialien auch zu mehr Ressourceneffizienz beiträgt. Exemplarisch soll die Herausforderung bei neu entwickelten Harzen vorgestellt werden: Kunstharze kommen u. a. bei der Stereolithografie zum Einsatz, wobei die Aushärtung der Harze durch Laser erfolgt. Auch wenn die von Herstellenden ausgegebenen Zahlen zur Verbesserung der Verschleißfähigkeiten neuer Harze

⁶⁸ Vgl. Additive - Die Plattform für industrielle Fertigung (2020a).

⁶⁹ Vgl. Fritz, A. H. und Schmütz, J. (2022), S. 135.

⁷⁰ Vgl. WEKA Business Medien GmbH (2022).

mit Vorsicht zu betrachten sind, zeigen Angaben, die eine Erhöhung der Lebensdauer um den Faktor 30 bis 60 anführen, zumindest die Dimensionen, in denen sich die Verbesserungen der Lebensdauern in den kommenden Jahren bewegen können. Verbesserte Harze eignen sich ebenso für das Digital Light Processing (DLP), welches auch die additive Fertigung sehr kleiner Bauteile mit einer äußerst glatten Oberfläche ermöglicht und keine Nachbearbeitung benötigt. Durch die Integration mikroskopisch kleiner Festschmierstoffe in das Material entfällt der Wartungsaufwand für Schmierarbeiten bei den additiv hergestellten Bauteilen, da sich die Schmierstoffe bei Bewegung selbstständig freisetzen. Die erhöhte Lebensdauer sowie Eigenschaften wie seltenere Wartungsaufwände können sich positiv auf die Ressourceneffizienz auswirken. Gleichwohl ergibt sich bei der Herstellung der Harze die Frage, durch welche Additive die Verbesserungen der Eigenschaften ermöglicht werden und welche Umweltauswirkungen dabei entstehen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, bei der Materialauswahl aus Sicht der Ressourceneffizienz neben Aspekten wie der Langlebigkeit auch ökotoxikologische Punkte zu berücksichtigen.

Es gibt ebenfalls Aspekte, bei denen sich die Chancen für die Ressourceneffizienz eindeutiger zeigen. Hierbei spielt vor allem die Werkstoffforschung eine wichtige Rolle. Folgende Bereiche der Materialverbesserungen sind für die additiven Fertigungsverfahren und aus Sicht der Ressourceneffizienz von besonderer Relevanz:

- **Bessere Wiederaufbereitung eingesetzter Materialien:** Insbesondere bei pulverbasierten 3D-Druckverfahren wird ein erheblicher Anteil des eingesetzten Materials nicht in das tatsächliche Bauteil umgewandelt. Das Pulver kann theoretisch im nächsten Herstellungsprozess wiederverwendet werden. Allerdings führt eine große Hitzeeinwirkung bei der Herstellung dazu, dass auch Pulver, das nicht zum Bauteil wurde, häufig so stark beansprucht wird, dass die Materialeigenschaften wie die Fließfähigkeit, Stabilität oder Alterungsprozesse darunter leiden. Um bei der Rückgewinnung und Aufbereitung der Pulver die notwendige Qualität gewährleisten zu können, werden daher Materialanalysen vorgenommen

und das rezyklierte Pulver wird je nach Bedarf mit neuem Pulver gemischt.

- **Vermehrter Einsatz von Rezyklaten:** Nicht nur die in Herstellungsprozessen der additiven Fertigung anfallenden Produktionsreststoffe werden vermehrt wiederverwendet, sondern auch Rezyklate aus Kunststoffen oder Metallen im Allgemeinen. Wichtige Forschungsschwerpunkte sind dabei häufig, zu ermitteln, wie die Verfahrensschritte so gestaltet werden können, dass die notwendigen Materialeigenschaften und eine konstante Qualität auch im industriellen Format garantiert werden können. Erste Erfolge beim industriellen Einsatz von Rezyklaten gibt es beispielsweise mit rezyklierten Filamenten. Aufgrund der Technologieviefalt der additiven Fertigung entsteht außerdem das Potenzial, ebenso Reststoffe einzusetzen, die bei der industriellen und handwerklichen Fertigung, dem Lebensmittelbereich oder der Landwirtschaft anfallen. Ziel kann es hierbei sein, die Materialien so aufzubereiten, dass diese bei hybriden Werkstoffen als Mikrofasern zum Einsatz kommen. Ein weiteres Forschungsgebiet betrifft die Aufbereitung der Reststoffe zu Pulver, das dann z. B. beim Binder Jetting zum Einsatz kommen soll.

Rezyklat für den 3D-Drucker

Der Hersteller von 3D-Druckmaterialien Polymaker setzt für die Produktion seines Polycarbonat-Filaments für den 3D-Druck auf recyceltes Polycarbonat. Um die geforderte Materialqualität zu gewährleisten, wurde eine eigene Recyclinginfrastruktur aufgebaut.

Die Recyclinginfrastruktur basiert darauf, dass in China in Haushalten und Büros Trinkwasser häufig in großen Kanistern angeboten wird. Nach mehrmaligem Nutzen erfüllen die Wasserbehälter die Qualitätsansprüche nicht mehr und müssen entsorgt bzw. aufbereitet werden. So können diese in ausreichenden Mengen gesammelt werden. Durch Zumischen von Neuware entsteht ein langlebiges Filament, das auch industrielle

Ansprüche erfüllt. Das recycelte Polycarbonat hat eine gute thermische Stabilität sowie Festigkeit und ist leicht zu verarbeiten.

So zeigen Drucktests, dass mit dem Material größere und komplexere Modelle mit einer hohen Druckerfolgsrate gedruckt werden können.⁷¹

Binder Jetting mit Reststoffen

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an den Technischen Universitäten Freiberg, Chemnitz und Dresden haben ein Projekt gestartet, bei dem lokale Reststoffe zu Werk- und Wertstücken weiterverarbeitet werden sollen. Im entwickelten Reallabor ist es für interessierte Unternehmen möglich, die Technologien des Binder Jettings auszuprobieren, ohne in eigene Anlagen investieren zu müssen.

Da das Binder Jetting ein pulverbasiertes 3D-Druckverfahren ist, liegt der Fokus darauf, Pulver aus Reststoffen zu entwickeln, das eine akzeptable Fließfähigkeit für den Schichtauftrag garantiert. Das Verfahren eignet sich für den Einsatz von Reststoffen besonders, weil diese häufig in Form kleiner Partikelgrößen wie Spänen oder Stäuben anfallen und damit leicht in Pulver umgewandelt werden können.

Zu Beginn werden die mitgebrachten Reststoffe hinsichtlich der Verteilung der Partikelgrößen und des Feuchtigkeitsgehalts untersucht. Sofern notwendig, wird das Material anschließend getrocknet und dann durch Mahlen und Sieben aufbereitet. Damit konnten bereits Objekte aus Obstkernen, Papierfasern oder Muschelkalk gedruckt werden. Auch hydrophobe Eigenschaften können beispielsweise durch die Nachbehandlung mit Bienenwachs auf natürliche Weise garantiert werden.⁷²

⁷¹ Vgl. Covestro AG (2021).

⁷² Vgl. Hoher, J. (2022).

Additiv gefertigte biobasierte Flammschutzmittel

Biokunststoffe werden aus pflanzlichen Materialien wie Maisstärke, Zuckerrohr oder Kartoffeln hergestellt. Im Vergleich zu erdölbasierten Kunststoffen haben sie in der Regel eine bessere CO₂-Bilanz, da sie aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Um Biokunststoffe auch in der Elektrotechnik und Elektronik einsetzen zu können, müssen sie dieselben hohen Anforderungen an den Brandschutz erfüllen wie herkömmliche Kunststoffe. Allerdings gibt es derzeit noch kein natürliches Flammschutzmittel, das für die Herstellung von Biokunststoffen geeignet ist.

Ein Forschungsprojekt, an dem das Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI und das Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP sowie Industriepartner beteiligt waren, konzentrierte sich darauf, ein halogenfreies Flammschutzmittel zu entwickeln, das mit geringen Kosten in geringen Mengen eingesetzt werden kann. Zusätzlich wurden vorhandene Flammschutzmittel in Kombination mit unverstärkten Biopolymeren sowie solchen, die mit Holzpartikeln verstärkt sind, untersucht.

Die Herstellung halogenfreier Flammschutzmittel auf der Grundlage biobasierter Alkohole und phosphorhaltiger Verbindungen konzentrierte sich auf die Synthese von vollveresterten Phosphaten. Nach einigen Optimierungsversuchen konnte eine Compoundierung mit PLA durchgeführt werden, was zur Entwicklung einer Rezeptur führte, die flammgeschützte PLA-Compounds herstellen kann. Flammbarkeitstests nach UL94 ergaben eine sehr gute Klassifizierung (V-0) bei einer Prüfkörperdicke von 1,6 Millimetern.

Für die Herstellung von Bauteilen aus PLA ist der Einsatz beheizbarer Werkzeuge notwendig, um eine hohe Kristallinität und damit verbundene hohe Wärmeformbeständigkeiten zu erzielen. Neben einer effektiven Brandschutzwirkung spielt die Wärmeformbeständigkeit eine entscheidende Rolle in der Anwendung.

Das Forschungsteam konnte PLA- und PBS-Formulierungen entwickeln, die die Brandschutzanforderungen in den vorgesehenen Anwendungen weitgehend erfüllen und sowohl im Spritzguss als auch im 3D-Druck verarbeitet werden können.⁷³

Recycling von Titanpulver in der additiven Fertigung

Im Bereich der additiven Fertigung geht nur ein geringer Teil des eingesetzten Titanpulvers in gefertigte Teile (20 – 40 %) ein, bevor es u. a. durch Kontamination an Qualität einbüßt. Es kann somit nur begrenzt wiederverwendet werden, da nicht spezifikationskonformes Titanpulver die Wahrscheinlichkeit von Mängeln erhöht und die strukturelle Integrität additiv gefertigter Komponenten beeinträchtigt. Zudem ist das derzeit in der Regel mittels Kroll-Prozess produzierte Titanmetall sehr energieintensiv, klimaschädlich und teuer. Unternehmen aus dem Verteidigungssektor, der Automobilindustrie, der Unterhaltungselektronik und dem Luxusgütersegment suchen deshalb nach kostengünstigem, CO₂-armem Titan aus nachvollziehbaren recycelten Quellen.

Ein amerikanisches Unternehmen bietet eine Lösung, um die ökologischen und ökonomischen Herausforderungen zu reduzieren. Dabei werden minderwertige Titanschrottmaterialien mit hohem Sauerstoffgehalt aufgewertet. Das ermöglicht die Herstellung von Titanpulvern aus fast jeder Form von Titan oder Titanlegierungsabfall.

Der innovative Prozess weist eine geringe Energieintensität auf und ermöglicht so eine kostengünstige und ressourceneffiziente Produktion von Titanpulvern. Genutzt werden konventionelle Pulvermetallurgie-Verarbeitungsschritte, um die Größe der Partikel zu kontrollieren, Legierungselemente hinzuzufügen und sicherzustellen, dass das Ergebnis

⁷³ Vgl. EU-Recycling.com (2023).

hochwertiges Titanpulver ist. Dabei wird der Sauerstoffgehalt von Titanpulvern auf ein Niveau reduziert, das industriellen Anforderungen entspricht.

Verwendet werden Wasserstoff und Magnesium, um Titan(II)-Oxid zu destabilisieren und die Reduktion von Titan(IV)-Oxid zu begünstigen. Das ermöglicht eine direkte Reduktion und Entfernung von Sauerstoff aus Titan(IV)-Oxid, sodass Titandihydrid gebildet wird. Titandihydrid wird anschließend durch branchenübliche Verfahren zu Titanmetall weiterverarbeitet.⁷⁴

⁷⁴ Vgl. IperionX (2023).

4 ADDITIVE FERTIGUNG IM BAUWESEN

Forschungsvorhaben und Pilotprojekte, die sich mit additiven Fertigungsverfahren im Bauwesen beschäftigen, gibt es bereits seit einigen Jahren. Ein wichtiger Meilenstein ist in Europa allerdings erst 2021 erreicht worden, als im niederländischen Eindhoven das erste additiv gefertigte Haus tatsächlich bezogen wurde.⁷⁵ Additive Fertigungsverfahren sind in der Baubranche aus ähnlichen Gründen wie in der industriellen Fertigung interessant. Dazu gehören neben der Erstellung komplexer Planungs- und Konstruktionsprinzipien bei niedrigerem Materialeinsatz auch neuartige Bauarten ohne hohen Personalaufwand oder ein schneller und präziser Formen- bzw. Schalungsbau.

Wird 3D-Druck für den Gebäudebau eingesetzt, sind Extrusionsprozesse die häufigsten zum Einsatz kommenden additiven Betonfertigungsverfahren im Bereich der In-situ-Produktion. Dabei wird in der Regel ein druckfähiges Material mithilfe einer von einem Roboter gesteuerten Düse entlang einer vordefinierten Route als Strang oder Filament abgelegt. Die Formänderung des Strangs nach dem Austritt aus der Düse hängt davon ab, ob das Material steif oder fließfähig ist.

Bei steifem Material entspricht die endgültige Form der Düsengeometrie, während bei fließfähigem Material leichte Verformungen möglich sind. Im Fertigungsprozess ist es wichtig, dass das Material pumpfähig und extrudierbar bleibt, aber auch eine gewisse Verarbeitbarkeit nach dem Austritt aus der Düse aufweist. Eine kontinuierliche Materialzufuhr, die Einhaltung der Maßgenauigkeit und Formstabilität der Filamente sowie eine präzise Führung der Düse oder des Druckkopfes sind somit entscheidend für den Erfolg des Extrusionsverfahrens. Um sicherzustellen, dass der Beton für den 3D-Druck geeignet ist, muss eine spezielle Rezeptur entwickelt werden, die auf die Anforderungen des 3D-Drucks zugeschnitten ist. Möglich ist dies mit speziellen Additiven und Verstärkungsmaterialien. Darüber hinaus können

⁷⁵ Vgl. Bayern Innovativ GmbH (2021).

auch Parameter wie die Druckgeschwindigkeit, der Druck und die Schichtdicke optimiert werden, um eine optimale Betonzusammensetzung und -qualität zu gewährleisten. Da mit unterschiedlichen Filamentstärken gefertigt werden kann, ist es möglich, unbewehrte Hohlwände herzustellen und durch innere wellenförmige Strukturen auszusteiern. Zusätzlich besteht die Option, die Hohlwände nachträglich zu verstärken, indem sie als „verlorene Schalung“ verwendet werden. Optional können diese mit Schüttdämmung oder Beton gefüllt werden.⁷⁶ Um extrusionsbasierte additive Betonfertigungsverfahren anzuwenden, wird nicht nur Druckmaterial benötigt, sondern auch geeignete Software zur Überwachung und Steuerung (Informations- und Kontrollsysteme) sowie Materialzufuhrsysteme wie Pumpen, Schläuche und gegebenenfalls Silos. Besonders wichtig ist ein automatisiertes robotisches System, dessen Hauptaufgabe darin besteht, den Druckkopf präzise entlang der Druckpfade zu führen, um das Material genau abzulegen.⁷⁷ Folgend sind gängige Robotersysteme und die jeweilige Verfahrensbeschreibung dargestellt (vgl. Abbildung 11).

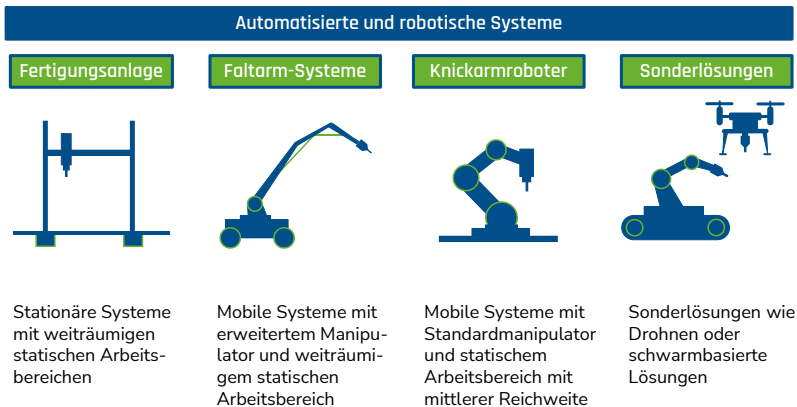


Abbildung 11: Systeme für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Bauwesen

© Gerrit Placzek/IBB⁷⁸

⁷⁶ Vgl. Placzek, G.(2022).

⁷⁷ Vgl. Placzek, G. (2022).

⁷⁸ Vgl. Placzek, G. (2022).

Inwiefern additive Fertigungsverfahren im Bauwesen tatsächlich zur Ressourceneffizienz beitragen können, kann gegenwärtig noch nicht final beantwortet werden. Der Grund ist insbesondere, dass die Ressourceneffizienz (gemäß VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1)⁷⁹ über den gesamten Lebensweg ermittelt werden muss.⁸⁰

Um zukünftig die additive Fertigung im Bauwesen unter den Gesichtspunkten der Ressourceneffizienz adäquat einzusetzen, empfiehlt sich eine konsequente Kombination von additiven und konventionellen Fertigungstechnologien, z. B. mit Planungsprozessen, die auf dem Building Information Modeling (BIM) basieren, sowie der Integration von leistungsstarken Softwaretools⁸¹.

Dazu ist es insbesondere notwendig, sämtliche Bauteile neu zu überdenken und ressourceneffiziente und kreislauffähige Werkstoffverbunde sowie Prozesskombinationen für die additive Fertigung zu entwickeln. Gleichwohl lassen sich bereits heute mögliche Ressourceneffizienzpotenziale der additiven Fertigung im Bauwesen erkennen, die nachfolgend vorgestellt werden:

- **Einsparungen von Schalungen:** Traditionell wird bei der Herstellung von Betonschalungen Sperrholz verwendet, da es einfach zu konstruieren und verarbeiten ist. Allerdings gibt es Nachteile in Bezug auf die Wiederverwendung. Sperrholz hat eine beschränkte Lebensdauer und zersetzt sich im Laufe der Zeit, besonders wenn es mit frischem Beton und Feuchtigkeit in Berührung kommt. Dadurch verringert sich die mögliche Einsatzzeit erheblich. Außerdem kann Sperrholz nur schwer recycelt werden, weil bei der Herstellung Leim und andere chemische Bestandteile eingesetzt

⁷⁹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

⁸⁰ Da aktuell noch nicht absehbar ist, wie die tatsächliche Nutzungsphase (Energiebedarf der Gebäude, Reparaturen etc.) und Nutzungsdauer sowie Fragen zum End-of-Life (beispielsweise Recycling der Baustoffe) im Verhältnis zum tatsächlichen Ressourcenaufwand stehen, wird diese Frage erst in einigen Jahrzehnten mit dem Abriss bzw. der Aufbereitung der Gebäude gänzlich beantwortet werden können.

⁸¹ Weiterführende Informationen können der VDI ZRE-Broschüre „Ressourceneffizienz durch Building Information Modeling (BIM)“ entnommen werden: www.ressourcendeutschland.de/service/publikationen/detailseite/ressourceneffizienz-durch-building-information-modeling/

werden⁸². Deshalb gilt Sperrholz am Ende der Nutzungsphase als Sonderabfall und muss in speziellen Anlagen entsorgt werden⁸³. Wie beschrieben, benötigen additive Fertigungsverfahren im Bauwesen häufig keine Schalung. Die vorgestellten Probleme der Schalungen fallen somit nicht an und Ressourcen können geschont werden.

- **Effizienterer Schalungsbau:** Besonders im konventionellen Hochbau ist der Einsatz von Schalungen allgegenwärtig. Da aus architektonischen Gründen häufig Formen wie spezielle Rundungen verlangt werden, ist der Schalungsbau mit Sonderkonstruktionen meist ressourcenaufwändig. Mit Hilfe der additiven Fertigung ist es möglich, auch komplexe Geometrien mit geringerem Ressourceneinsatz umzusetzen.
- **Reduktion von Transportwegen und Lagerkosten:** Mit Hilfe der additiven Fertigung ist es möglich, vollständige Rohbauten direkt vor Ort zu drucken, wobei der eingesetzte Beton in Tanks gelagert werden kann. Durch die präzise Fertigung des Rohbaus ist außerdem zu erwarten, dass weniger unterschiedliche Arbeitsschritte wie Löcher für Kabel oder Kerben für Rollladenkästen notwendig sind, wodurch auch weniger Maschinen und Materialien zum Einsatz kommen.⁸⁴ Dadurch bietet die additive Fertigung das Potenzial, Transportwege sowie Lagerkosten zu reduzieren und Ressourcen zu schonen.
- **Reduktion des Zementbedarfs:** Wie bei der industriellen Fertigung, verspricht die additive Fertigung, den Materialbedarf für ein gewünschtes Ergebnis bzw. Bauteil erheblich zu reduzieren und komplexe Bauteile umzusetzen. Verfahren wie zum Beispiel das von der TU Braunschweig in einem Verbundvorhaben entwickelte Shotcrete-3D-Druck-Verfahren ermöglichen bei der Herstellung von bewehrten Betonbauteilen Einsparungen von bis zu 60 % des Betons.⁸⁵ Da der Beton bei den Verfahren direkt aus Tanks aufgetragen wird, ist außerdem zu erwarten, dass der

⁸² Vgl. Remondis SE & Co. KG (o.D.)

⁸³ Vgl. Remondis SE & Co. KG (o.D.)

⁸⁴ Vgl. Berger, C. (2021)

⁸⁵ Vgl. SC3DP (TU Braunschweig 2019).

Bedarf genau geplant und Verschwendungen reduziert werden können. Bedenkt man, dass die Herstellung des Ausgangsmaterials (Zement) in Deutschland mit CO₂-Emissionen von rund 600 Kilogramm je Tonne verbunden ist⁸⁶, sind die erheblichen Umweltvorteile klar erkennbar, die durch die Einsparung von Beton bzw. Zement dank additiver Fertigungsverfahren möglich sein können.

- **Besserer Rückbau:** Additiv gefertigte Gebäude können mit hoher Präzision auch Leitungen für Elektronik oder Wasser berücksichtigen. Aus diesem Grund haben diese Gebäude das Potenzial, mit weniger unterschiedlichen Baukomponenten die gleiche Funktionalität zu gewährleisten. Weniger unterschiedliche Bauteile wiederum versprechen einen leichteren Rückbau und eine bessere Aufbereitung der eingesetzten Materialien, da die Komponenten sortenreiner vorliegen.
- **Verwendung von nachhaltigen Materialien:** Da der 3D-Druck eine große Vielfalt an Materialien verarbeiten kann, ist es möglich, recycelte Materialien wie Kunststoffe oder Holzfasern zu verwenden. Dies reduziert den Bedarf an nicht erneuerbaren Materialien und trägt zur Schonung der Ressourcen bei. Durch das präzise Auftragen der Betonschichten mittels 3D-Druck ist es außerdem möglich, längere beigemischte Fasern gerichtet und damit lastengerecht aufzutragen. Dadurch können gewünschte Bauteileigenschaften bei niedrigerem Materialeinsatz erzeugt werden.⁸⁷

⁸⁶ Vgl. Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2023).

⁸⁷ Vgl. Kloft, H. et al. (2021)

Additiv gefertigte Bauelemente aus Naturfasern

Das Projekt 3DNaturDruck ist ein Forschungsprojekt unter der Leitung des Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH). Ziel des Projekts ist die Herstellung von architektonischen Bauteilen wie Fassadenelementen aus naturfaserverstärkten Biopolymeren anstatt aus synthetisch produzierten Fasern mittels additiver Fertigung.

Es ist geplant, Verbundmaterialien aus Biopolymeren in Kombination mit sowohl Naturkurzfasern als auch Naturendlosfasern zu entwickeln. Das Team arbeitet an der Entwicklung neuer Materialprozesse und passt dabei die Werkzeuge sowie Düsengeometrien eines FDM-Druckers an. Als praktische Umsetzung soll ein Pavillon mit 3D-gedruckten Fassadenelementen auf dem Campus der Universität Stuttgart entstehen.

Biopolymere, die durch Naturfasern verstärkt sind, eignen sich besonders gut, um Bauteile mit anspruchsvollen Formen in nur wenigen Schritten und mit minimalem Material- und Kostenaufwand herzustellen. Das Konsortium will erforschen, wie die additive Fertigung Herstellungsverfahren für architektonische Bauteile vereinfachen kann. Dadurch werden völlig neue Voraussetzungen für die Herstellung innovativer architektonischer Bauteile geschaffen. Die Topologieoptimierung von Bauteilen, basierend auf ihren strukturellen Anforderungen, lässt sich dabei effektiv mithilfe des 3D-Drucks umsetzen.⁸⁸

⁸⁸ Vgl. 3Druck.com (2022).

Additiv gefertigte Schalungen für komplexe Geometrien

Architektonisch gewollt, aber mit aufwendigen Schalungskonstruktionen verbunden, sind z.B. geschwungene, aus Beton gegossene Treppen. Die konventionelle handwerkliche Herstellung der notwendigen Schalungen ist mit hohem Ressourcenaufwand verbunden. Es erfordert das Schneiden von Holzleisten, die in Form gebogen, befestigt und verleimt werden müssen. Danach ist es notwendig, die Oberfläche mehrmals zu spachteln und zu schleifen, bevor sie zweimal lackiert wird. Das Ergebnis ist ein geformter Körper, dessen tragende Teile unter Spannung eingefügt wurden und aus organischen Materialien bestehen. Aufgrund der Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sowie der allgemeinen Witterung am Bau kann es schnell zu Rissbildungen kommen, die die Qualität spürbar beeinträchtigen.

Im Vergleich zur herkömmlichen Methode, Betonschalungen aus Holz zu bauen, bietet der Binder-Jetting-3D-Druck Vorteile. Bauteile können schnell und ohne aufwendige Planung direkt aus 3D-Daten hergestellt werden. Die additiv gefertigten Bauteile sind präzise und spannungsfrei gefertigt, was eine hohe Formstabilität gewährleistet und zusätzliche Qualitätssicherheit gegenüber den Witterungseinflüssen bietet. Nach dem Lackieren und Schleifen kann die 3D-gedruckte Schalung unabhängig von ihrer Komplexität problemlos eingesetzt werden. Anwendungen von 3D-gedruckten Schalungen finden sich beispielsweise im Stuttgarter Bahnhof (Stuttgart 21). Im Tiefbahnhof wurden Stützen mit Kelchschultern unter Zuhilfenahme additiv gefertigter Schalungen errichtet.⁸⁹

⁸⁹ Vgl. Voxeljet AG (2020).

Heiz- und Kühlsystem aus dem 3D-Drucker

Heiz- und Kühlsysteme haben einen erheblichen Energiebedarf. Verbesserungen dahingehend können dementsprechend zur Ressourceneffizienz beitragen. Forschende an der Texas A&M Universität haben ein sog. „Phase-Change-Material“ (PCM) entwickelt.

Das PCM kann seine Struktur je nach Temperatur wechseln und sich so in den unterschiedlichen Phasen (fest, flüssig, gasförmig) bewegen. Nimmt es Wärme auf, dann schmilzt es und kühlt dadurch die Umgebung. Bei kühleren Temperaturen verfestigt sich das PCM und gibt vormals gespeicherte Wärme an die Umgebung ab. Zwar wird dieses Phänomen bereits in anderen Gebieten wie bei Kaffeebechern eingesetzt, allerdings ist es den Forschenden nun gelungen, das PCM direkt 3D-gedruckten Baumaterialien einzumischen, indem es mit flüssigem Harz kombiniert und mit UV-Licht bestrahlt wird. Da das PCM vor der UV-Bestrahlung weich und biegsam ist, kann es problemlos in großen tintenartigen Mengen für den 3D-Druck produziert werden.

Die Heiz- und Kühlfähigkeiten wurden von den Forschenden in einem Modellhaus getestet. Dabei war die Temperatur im Modell mit PCM um 40 % geringer. Zukünftig soll es möglich sein, das PCM in den Prozess der 3D-gedruckten Gebäude zu integrieren und so auch einen erheblichen Beitrag zur Energieeffizienz zu leisten.⁹⁰

⁹⁰ Vgl. VDI Verlag GmbH (2021).

Weniger Betonbedarf dank neuem 3D-Druck-Verfahren

In traditionellen Gebäuden werden bis zu 80 % des verwendeten Materials für Deckenkonstruktionen benötigt. Die Firma Eigner Bauunternehmung GmbH hat deshalb in Zusammenarbeit mit dem Institut für Tragwerksentwurf der TU Graz in Nördlingen in die Decke einer Tiefgaragenabfahrt vorgefertigte Beton-Leichtbauelemente eingesetzt.

Eine wichtige Frage war dabei, wie die Bewehrung von Geschossdecken mit integrierten gedruckten Betonelementen funktioniert. Konventionell werden Decken mit geometrisch einfachen Stahlstäben oder -gittern bewehrt, bei gedruckten Leichtbaudecken hingegen kamen kreuzende Rippen zum Einsatz.

Die Erkenntnisse aus der Baustellenpraxis konnten genutzt werden, um ein neues Verfahren zu entwickeln. So ist es den Forschenden gelungen, eine filigrane Stahlbewehrung direkt in einen 3D-gedruckten Betonstrang mit einzuziehen. Dadurch soll es zukünftig möglich sein, gestalterische Freiheiten mit konstruktivem Nutzen zu kombinieren. So wird Beton nur in Bereichen verwendet, in denen es für die Stabilität und Belastbarkeit notwendig ist. Durch den Einsatz von speziell gedruckten Aussparungskörpern können bei Stahlbetondecken bis zu 40 % des Materials eingespart werden, was wiederum einer Reduktion von 50 % der CO₂-Emissionen entspricht.⁹¹

⁹¹ Hochwart, D. (2023)

5 ZUSAMMENFASSUNG

Additive Fertigungsverfahren haben sich mittlerweile in vielen Bereichen der Industrie etabliert und werden auch im Bauwesen, beispielsweise im Schalungsbau, eingesetzt. Die technologischen Fortschritte und die rasante Entwicklung neuer Verfahren haben dazu geführt, dass auch eine Serienproduktion mittels additiver Fertigung wirtschaftlich möglich ist. Zwar ist zu erwarten, dass der Einsatz in der Fertigung weiter zunehmen wird, doch ist davon auszugehen, dass auch mittelfristig betrachtet der Funktionsmuster- und Prototypenbau im Rahmen der Produktentwicklung das häufigste Einsatzgebiet bleiben wird. Aufgrund der hohen Innovationsdynamik und aufgrund unterschiedlicher Markennamen für ähnliche Technologien ist es außerdem mit Herausforderungen verbunden, den Überblick über aktuelle Trends und technologische Durchbrüche zu behalten. Zudem sind Normen und Richtlinien bei dieser rasanten Entwicklungsgeschwindigkeit nur bedingt für einen umfassenden Überblick geeignet.

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und flexiblen Gestaltungsoptionen, die mit additiven Fertigungsverfahren einhergehen, führen zu Chancen hinsichtlich der Ressourceneffizienz. Neben Potenzialen wie Materialeinsparung durch präzise und verlustarme Bauteilfertigung oder eine schnelle Produktentwicklung mit weniger Prototypen können insbesondere die kostengünstige Herstellung von Ersatzteilen und Reparaturangebote dazu beitragen, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern und somit die Ressourceneffizienz zu steigern. In den letzten Jahren haben zudem einige Forschungsprojekte darauf abgezielt, mittels 3D-Druck eine Verwertung von Reststoffen zu ermöglichen und so zur Kreislaufwirtschaft beizutragen. Als Herausforderungen – aus Sicht der Ressourceneffizienz – sind insbesondere der hohe Energiebedarf je gefertigtem Bauteil sowie die teilweise schwere Reparatur von komplexen Geometrien zu nennen.

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und der damit verbundenen Verbesserung der Prozesssicherheit ist davon auszugehen, dass die Produktivität in den letzten Jahren zugenommen und zugleich der Energiebedarf je Bauteil abgenommen hat. Doch braucht es bereits in der Produktentwicklung

bzw. beim Design präzise Vorgaben. Durch die Berücksichtigung von Prinzipien des Ökodesigns, u.a. festgeschrieben in der Ökodesign-Richtlinie, können Aspekte wie die Reparierbarkeit oder die Materialauswahl der Bauteile unter ökologischen Gesichtspunkten von Anfang an mitgedacht werden.

Um Ressourceneffizienz bei der Verwendung additiver Fertigungsverfahren aus unternehmerischer Sicht besser zu berücksichtigen, sollten alle Bereiche des Unternehmens mit einbezogen werden. Erst durch eine bereichsübergreifende Abstimmung der Anforderungen an das Design, die technologischen Eigenschaften sowie die späteren Wartungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten können die Potenziale für die Ressourceneffizienz mittels additiver Fertigungsverfahren gänzlich ausgeschöpft werden.

LITERATURVERZEICHNIS

3D Spark GmbH (2022): Part Screening Software [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.3dspark.de/index.html>

3DDrucker.de (2021): Pulverbasierte additive Fertigung - Was ist die SAF (Selective Absorption Fusion) Technologie? [online][abgerufen am: 12.05.2023], verfügbar unter: <https://3ddrucker.de/3d-drucktechnologien/saf-technologie/>

3Druck.com (2022): Nachhaltiger 3D-Druck: LZH forscht an Bauelementen aus Naturfasern [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://3druck.com/forschung/nachhaltiger-3d-druck-naturfasern-05110608/>

3D-Druck-Recherche.de (2024): Fused Deposition Modeling Drucker [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://3d-druck-recherche.de/kunststoffdruck/fdm-drucker/>

3Dnatives (2023a): Alles, was Sie über 3D-Druck mit Fused Deposition Modelling / FDM wissen müssen [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-schmelzschichtung/>

3Dnatives (2023b): Binder Jetting: Wir erklären Ihnen das 3D-Druckverfahren [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-pulverdruck/#!>

3Dnatives (2023c): Laser-Pulverbett-Schmelzen: Wir erklären Ihnen das 3D-Druckverfahren [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/3ddruck-laserschmelzen/>

Additive - Die Plattform für industrielle Fertigung (2020a): Klimatisierung und Trocknung in der Produktion [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://additive.industrie.de/post-processing/klimatisierung-und-trocknung-in-der-produktion/>

Additive-Fertigung.com (2018): voxeljet VX200HSS: HSS zur flexiblen Produktion von Funktionsbauteilen [online][abgerufen am: 12.05.2023], verfügbar unter: https://www.additive-fertigung.com/bericht/shs---selective-heat-sintering_3238/hss_zur_flexiblen_produktion_von_funktionsbauteilen-2018-03-27

Ahn, D. G. (2021): Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. In: Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech, S. 703 – 742.

Albtec Prototypen GmbH (2022): Selektives Laserschmelzen [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://albtec.de/laserschmelzen/>

AMFG (2019): All You Need to Know About Metal Binder Jetting [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>

Ampower (2022): Additive Manufacturing Report [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://additive-manufacturing-report.com/>

Arburg GmbH & Co. KG (2022): freeformer [online][abgerufen am: 15.05.2023], verfügbar unter: <https://www.arburg.com/de/de/produktwelt/additive-fertigung/freeformer/>

Autodesk GmbH (2023): Fusion 360 mit Netfabb-Funktionen [online] [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/products/netfabb/features>

Bayern Innovativ GmbH (2021): 3D-Druck in der Bauindustrie „Bauen und Wohnen wird vielfältiger“ [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/3d-druck-in-der-bauindustrie>

Berger, C. (2021): Große Potenziale für den 3D-Druck von Beton [online] [abgerufen am: 28.05.2024], verfügbar unter: <https://www.springerprofessionale.de/additive-fertigung/materialentwicklung/grosse-potenziale-fuer-den-3d-druck-von-beton/19673204>

Covestro AG (2021): Recycelter Kunststoff für den 3D-Druck [online] [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.covestro.com/press/de/recycelter-kunststoff-fuer-den-3d-druck/>

Dusold, J. (2020): Das sind die wichtigsten additiven Fertigungsverfahren [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.produktion.de/technik/das-sind-die-wichtigsten-additiven-fertigungsverfahren-264.html>

EOS GmbH (2019): Additive Fertigung für Entnahmegreifer bei SSI Schäfer [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.eos.info/de/innovationen/3d-druck-beispiele/produktion-und-energie/produktion-und-energie/additive-fertigung-greifer-gewichtsreduzierung>

EU-Recycling.com (2023): Biobasierte Flammenschutzmittel für Biokunststoffe in Elektrotechnik und Elektronik [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/39103>

EvoBus GmbH (2022): Die Komplettlösung für die additive Transformation in Ihrem Unternehmen [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://additive-manufacturing-solutions.evobus.com/de/>

Fastermann, P. (2012): 3D-Druck/Rapid Prototyping – Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt, Springer Berlin Heidelberg.

Fraunhofer ILT (2023): Aufbruch in die dritte Dimension [online] [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2023/2-2-ehla-3d-additive-fertigung.html>

Fraunhofer IPA (2022): Leitfaden: Qualitätssicherung in der additiven Materialextrusion [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/leitfaden-qualitaetssicherung-in-der-additiven-materialextrusion.html>

Fraunhofer IPT (2020): Express Wire Coil Cladding: Ressourcenschonende Alternative für die Fertigung von Antriebswellen [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/presse/Pressemitteilungen/201109-express-wire-coil-cladding-ressourcenschonende-alternative-fuer-die-fertigung-von-antriebswellen.html>

Fraunhofer IST (2022): Stabilere 3D-gedruckte Bauteile mithilfe von Atmosphärendruckplasmen [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ist.fraunhofer.de/de/presse-publikationen/2022/stabilere-3d-gedruckte-bauteile-mithilfe-von-atmosphaerendruckplasmen.html>

Fraunhofer IWS (2020): Grüner Laser schmilzt reines Kupfer [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: https://www.iws.fraunhofer.de/de/newsundmedien/presseinformationen/2020/presseinformation_2020-07.html

Fraunhofer UMSICHT (2023): Pulver für die additive Fertigung [online][abgerufen am: 15.05.2023], verfügbar unter: https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/Pulver_fuer_die_additive_Fertigung.html

Fritz, A. H. und Schmütz, J., Hg. (2022): Fertigungstechnik. 13. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, Lehrbuch, ISBN 978-3-662-64875-9.

Google Patents (2023): Additives Fertigungssystem und Verfahren zur additiven Fertigung von Bauteilen [online][abgerufen am 14.03.2024], verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/DE102016203582A1/de>

Guggenberger, S. (2020): Die Geschichte des 3D-Drucks [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/die-geschichte-des-3d-drucks-a-a45f6a709c9b9b7bc48fb85a5c14c5f2/>

Hochwarth, D. (2023): Leichte Betondecke im 3D-Druck spart Beton, Stahl und CO₂ [online][abgerufen am 14.03.2024], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/leichte-betondecke-im-3d-druck-spart-beton-stahl-und-co2/>

Hoher, J. (2022): 3D-Druck als potenzielles Upcycling von Reststoffen [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/3d-druck-als-potenzielles-upcycling-von-reststoffen-a-fa5fb24ed1c3d7a26f54aec282280d4b/>

HP Development Company, L. P. (2023): HP Multi Jet Fusion Technologie [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.hp.com/de-de/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>

IHK Würzburg-Schweinfurt (2022): Geprüfte/r Industrietechniker/in Additive Fertigung [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.wuerzburg.ihk.de/weiterbildungsprogramm/industrietechniker-additive-fertigung-215466/>

IperionX (2023): The Hydrogen Assisted Metallothermic Reduction Process [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://iperionx.com/our-technology/hamr-process/>

Juschkat, K. (2020): Neue Software berechnet Verformung beim Sintern voraus [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/neue-software-berechnet-verformung-beim-sintern-voraus-a-969637/>

Kloft, H.; Hack, N.; Mainka, J.; Brohmann, L.; Herrmann, E.; Ledderose, L.; Lowke, D. (2021): Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP) [online][abgerufen am 28.05.2024], verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_3/ITE/Publikationen_KloftHerald/bate.201900094.pdf&ved=2ahU-KEwjFv4aOnbCGAxXN9rsIHekrAZcQFnoECA4QAQ&usg=AOvVaw

Kloke, A. (2018): Tröpfchen im Millisekundentakt [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: https://www.arburg.com/media/daten/other/fachartikeL_kunststoffe_tr%C3%B6pfchen_im_millisekundentakt_11_2018_de.pdf

Korner, R. (2022a): Fraunhofer IAPT reduziert Kosten von Gelenkarm um 80 % mit 3D-Druck [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/fraunhofer-iapt-gelenkarm-mit-3d-druck-27817273/>

Korner, R. (2022b): US-Start-up Grid Logic stellt Multi-Material-Metall-3D-Druckverfahren vor [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-druckverfahren/grid-logic-multi-material-metall-3d-druckverfahren-27867843/>

Kögel, G. (2022): Automatisierung macht 3D-Druck produktiver [online] [abgerufen am: 15.05.2023], verfügbar unter: <https://www.k-zeitung.de/automatisierung-macht-3d-druck-produktiver>

Laserline GmbH (2024): Laserauftragschweißen heute: Wo steht die Technik? Teil 1: Grundlagen des Laserauftragschweißens [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: <https://www.laserline.com/de-int/laserauftragschweissen-heute-wo-steht-die-technik-teil-1/>

McAloone, T. C. und Pigosso, D. C. (2021): Ökodesign - Entwicklung von Produkten mit verbesserter Ökobilanz. In: Bender, B. und Gericke, K., Hg. Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Auflage 2021. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 986.

Nikolay, D. und Kollenberg, W. (2021): Additive Fertigung von Keramik - Wo stehen wir heute? In: Keramische Zeitschrift Ausgabe 6/2021, S. 30 – 37.

Ökopol und IDZ (2015): Ecodesign Kit [online][abgerufen am: 12.08.2024], verfügbar unter: <https://www.ecodesignkit.de>

Osterwalder, A. und Pigneur, Y. (2011): Business Model Generation – Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer, Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main.

Placzek, G. (2022): Die wichtigsten Beton-3D-Drucksysteme im Vergleich [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/wissen-bauingenieur/die-vier-wichtigsten-beton-3d-druckverfahren-im-vergleich/>

Projekträger Jülich/Forschungszentrum Jülich GmbH (2020): Rekuperatives Brennersystem aus dem 3D-Drucker senkt Emissionsausstoß [online] [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: https://www.industrie-energieforschung.de/news/de/3d_druck_brennersystem

Protec3D (2024): Vor- und Nachteile von 3D-Druck. Schmelzschichtung (Fused deposition modelling – FDM mit einer Düse) [online][abgerufen am: 24.06.24], verfügbar unter: <https://protec3d.de/vor-und-nachteile-von-3d-druck/>

Quitter, D. (2021a): Neues Verfahren verbindet draht- und pulverbasiertes Laserauftragschweiße [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/neues-verfahren-verbindet-draht-und-pulverbasiertes-laserauftragschweissen-a-1038086/>

Quitter, D. (2021b): Wie die deutsche Industrie die additive Fertigung nutzt [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/wie-die-deutsche-industrie-die-additive-fertigung-nutzt-a-1072127/>

Quitter, D. (2022a): 3D-Druck-Spezialist Lithoz erwirbt „CerAMing“ [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/3d-druck-spezialist-lithoz-erwirbt-ceraming-a-c0563d3ed4090b6c6282f853f6f7e6af/>

Quitter, D. (2022b): Ampower Report 2022 - Markt für Additive Fertigung wächst über 16 Prozent [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/markt-fuer-additive-fertigung-waechst-ueber-16-prozent-a-1105224/>

Rapidobject GmbH (2022a): 6 Tipps für mehr Nachhaltigkeit beim 3D-Druck mit Rapidobject[online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.rapidobject.com/was-ist-3d-druck/tipps-fuer-nachhaltigen-3d-druck/>

Rapidobject GmbH (2022b): Unser Beitrag zur Nachhaltigkeit beim 3D-Druck [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.rapidobject.com/ueber-uns/nachhaltigkeit/>

Remondis SE & Co KG (o.D.): Was gehört zur Abfallart Holz, was nicht? [online][abgerufen am: 28.05.2024], verfügbar unter: <https://www.remondis-entsorgung.de/abfallarten/holz/>

Research Nester (2022): Globale Marktgröße und Trendhighlights im Zietraum 2023 -2035 [online][abgerufen am: 14.03.2024], verfügbar unter: <https://www.researchnester.com/de/reports/additive-manufacturing-market/5009>

Sculpteo (2021): The State of 3D Printing Report: 2021 [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>

Siemens (2022): Digitally transform part production using NX for Manufacturing [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/nx/nx-for-manufacturing.html>

SKZ - Das Kunststoff-Zentrum (2023): Überblick der Technologien für additive Fertigungsverfahren [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.skz.de/forschung/prozess/ueberblick-additive-fertigungsverfahren>

Statista GmbH (2022): Meistgenutzte 3D-Druck-Technologien im Jahr 2022 [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/760408/umfrage/meistgenutzte-3d-druck-technologie/>

Stier, T., Rieck, M. und Lammert, N. (2020): 3D-Druck mit Kunststoffgranulat auf Metall [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/article/article-245081>

Torke, N. (2020): Was kann Fused Deposition Modeling (FDM)? [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-kann-fused-deposition-modeling-fdm-a-898b9d14cf61d8d6c5c71e43ebf603a9/>

Trummer, R. (2022): Expertentalk: Additive Fertigung und 3D-Druck Trends [online][abgerufen am: 21.03.023], verfügbar unter: <https://digital-engineering-magazin.de/expertentalk-additive-fertigung-und-3d-druck-trends>

Trumpf Lasertechnik (2024): „LMD reift zum starken generativen Verfahren“ [online][abgerufen am: 24.06.2024], verfügbar unter: https://www.trumpf.com/de_AT/newsroom/stories/lmd-reift-zum-starken-generativen-verfahren/

TU Dresden (2019): Hochleistungs-Faserverbundkunststoff aus dem 3D-Drucker [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilk/das-institut/news/hochleistungs-faserverbundkunststoff-aus-dem-3d-drucker>

Umweltbundesamt (2018): Die Zukunft im Blick: 3D-Druck - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen [online][abgerufen am: 22.03.2023], verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere_3d_barrierefrei_180619.pdf

Umweltbundesamt (2019): Ökodesign [online][abgerufen am: 12.08.2024], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekodesign

Van Bracht, R.; Pollok, P.; Piller, F. T. und Marquardt, E. (2019): Das Potenzial der additiven Fertigung : digitale Technologien im Unternehmenskontext : Auswertung. RWTH Aachen University; VDI e.V. [online] [abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/fachgesellschaften/GPL/dateien/Studie_Die_additive_Fertigung_ist_in_den_Unternehmen_angekommen_.pdf

VDI 3405:2014-12: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI e.V. (2019): VDI-Statusreport – 3-D-Druckverfahren sind Realität in der industriellen Fertigung [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/3-d-druckverfahren-sind-realitaet-in-der-industriellen-fertigung>

VDI Verlag GmbH (2021): Revolution bei der Energieeffizienz: Material aus dem 3D-Drucker kühlt und heizt [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/energieeffizienz-material-aus-dem-3d-drucker-kuehlt-und-heizt/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019): Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI_ZRE_Studie_Additive_Fertigungsverfahren_bf_1_.pdf

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2023): Klimaschutz [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht>

Voxeljet AG (2020): Mit 3D-Druck effizienter zur komplexen Betonschalung [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.voxeljet.de/case-studies/architektur/mit-3d-druck-effizienter-zur-komplexen-betonschalung/>

WEKA Business Medien GmbH (2022): Die Bedeutung von Rezyklaten für AM wird steigen [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.kunststoff-magazin.de/3d-druck/die-bedeutung-von-rezyklaten--fuer-am-wird-steigen.htm>

Zwettler, M. (2022): Umweltauswirkungen kennen und minimieren [online][abgerufen am: 21.03.2023], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/umweltauswirkungen-kennen-und-minimieren-a-41c127bccb43d22d97e4886ca440871e/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)
Bülöwstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

