

## *3D-Druck und Additive Fertigung:*

*Unterschätztes Potential zur  
Transformation wichtiger Zukunftstrends*

*„Die Additive Fertigung ist schon jetzt ein integraler Bestandteil unseres weltweiten Produktionssystems und in unserer Digitalisierungsstrategie fest verankert. Neue Technologien wie diese können künftig die Produktionszeiten zusätzlich verkürzen und das Potential werkzeugloser Fertigungsmethoden weiter ausschöpfen.“*

Dr. Milan Nedeljković, Mitglied des Vorstands, Produktion, *BMW Group* (2020, Campus)

*„3D-Druck wird nicht nur die Machtverhältnisse in der industriellen Fertigung neu definieren, sondern die Wirtschaftswelt als Ganzes erschüttern.“*

Prof. Dr. Neil Gershenfeld, *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*,  
zitiert nach: Welt (2014, Revolution)

*„Wir arbeiten intensiv daran, die Additive Fertigung vollständig auszureifen und einen maximalen Nutzen über den gesamten Produktlebenszyklus – von der Konzeptidee eines Fahrzeugs und der Produktion bis hin zum Aftersales-Bereich und dem Einsatz in klassischen Fahrzeugen – zu generieren.“*

Dr. Jens Ertel, Leiter Additive Manufacturing Center,  
*BMW Group* (2020, Campus)

Bad Homburg/Winterthur, Februar 2024

## Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

in der Welt technologischen Fortschritts sticht derzeit eine Innovation besonders hervor:

- ▶ Der sogenannte „3D-Druck“, der auch als Additive Fertigung bezeichnet wird, und sich durch entscheidende Vorteile auszeichnet: Beispiellose Individualisierung, zusatzkostenfreie Fertigungskomplexität, schnelle Prototyping-Möglichkeiten, nachhaltige Herstellungspraktiken und enorme Vielseitigkeit bei der Materialverwendung.

Diese Technologie hebt sich durch höchste Flexibilität bei der Produktion von Werkstücken aller Art hervor und bietet dabei zugleich völlig neue, oftmals sehr effiziente und hochgradig kreative Gestaltungsmöglichkeiten – für so unterschiedliche Dinge wie medizinische Implantate, hochentwickelte Turbinen, innovative Raumfahrzeuge oder anspruchsvolle Gebäudekonstruktionen.

Das Konzept der Additiven Fertigung ist zwar bereits seit den 1980er-Jahren bekannt, hat sich zuletzt aber sukzessive zu einem echten „Gamechanger“ entwickelt. Es durchbricht konventionelle Fertigungsmethoden und strahlt in unterschiedlichste Branchen aus, darunter Gesundheits- und Medizintechnik, Bauwesen, Luft- und Raumfahrt, Automobilwirtschaft oder Konsumgüterindustrie. Von besonderem Interesse ist derzeit auch der Bereich alternativer Nahrungsmittel – speziell das hochpräzise „Drucken“ synthetischer Fleischersatzprodukte und andere innovative Prozesse.

Renommierete Branchenexperten entwickelten daraus schon früh die Einschätzung:

- ▶ **„3D-Druck wird nicht nur die Machtverhältnisse in der industriellen Fertigung neu definieren, sondern die Wirtschaftswelt als Ganzes erschüttern.“**

Neil Gershenfeld, Professor am *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*

Die jüngsten Fortschritte der Additiven Fertigung spiegeln somit nicht nur einen vorübergehenden Trend, sondern verändern tiefgreifend die Logik und das Verständnis, wie zukünftig unterschiedlichste Objekte immer komplexer konzipiert und effizienter produziert werden können.

Im Fokus der vorliegenden Analyse stehen deshalb die möglichen Anwendungsbereiche für 3D-Druck, die schon heute weit in die Zukunft reichen. Nach einer längeren Phase gebremster Hoffnungen sind inzwischen neue Treiber wirksam, die den Ausblick für diese Technologie deutlich verändern.

Damit ist klar: 3D-Druck wird künftig in vielen Wirtschaftsbereichen zu transformativen – und oftmals auch disruptiven – Veränderungen führen. Unternehmer und Investoren sollten diese spannende Entwicklung deshalb sehr genau im Blick behalten.

Wir wünschen eine erkenntnisreiche Lektüre!



Dr. Heinz-Werner Rapp  
Gründer & Leiter Steering Board  
FERI Cognitive Finance Institute



Dr. Dominik Kohr  
Director Central  
cross-ING

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Executive Summary .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einführung in die Additive Fertigungstechnologie .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Additive Fertigung im Detail: Eine Übersicht .....</b>	<b>7</b>
3.1	Methoden .....	7
3.2	Anwendungen entlang des Herstellungsprozesses .....	9
3.3	Branchenvielfalt und Schlüsselakteure .....	12
3.4	Vor- und Nachteile .....	25
<b>4</b>	<b>Einflussfaktoren .....</b>	<b>27</b>
4.1	Technologischer Fortschritt und Kostenreduktion .....	27
4.2	Werkstoffinnovationen .....	28
4.3	Industrialisierung .....	29
4.4	Weltpolitische Lage .....	30
4.5	Design, Komplexität, Personalisierung .....	31
4.6	Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft .....	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>In die Zukunft gedruckt: Aussichten der Additiven Fertigung .....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>38</b>
	Erläuterungen .....	44
	Literaturverzeichnis .....	46

## Abbildungsverzeichnis

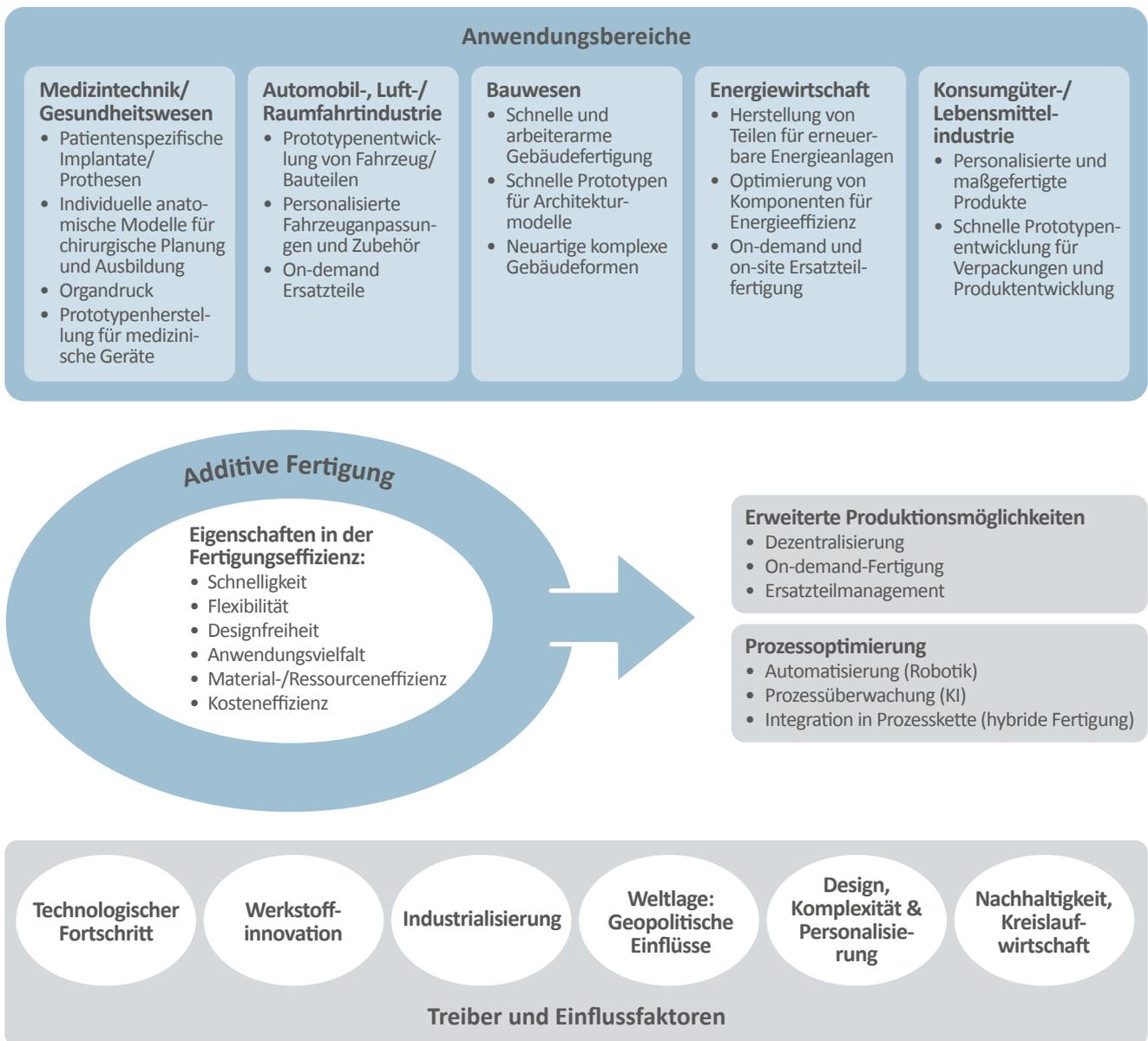
Abb. 1:	Additive Fertigung im kontinuierlichen Entwicklungsprozess .....	3
Abb. 2:	Themeneinordnung im Hype-Zyklus nach Gartner .....	5
Abb. 3:	Die Entwicklung der Additiven Fertigung (Zeitliche Entwicklung mit repräsentativer Erwartungskurve der Technologie) .....	6
Abb. 4:	Übersicht der unterschiedlichen Methoden der Additiven Fertigung .....	8
Abb. 5:	Anwendungsbereiche der Additiven Fertigung .....	9
Abb. 6:	3D-Druck zur Renaturierung von Korallenriffen .....	12
Abb. 7:	Präsenz und Durchdringung der Additiven Fertigung im Industrieüberblick .....	13
Abb. 8:	Anwendungen in der Automobilindustrie .....	14
Abb. 9:	4D Fusio von Adidas .....	15
Abb. 10:	Pflanzliches Steak von Redefine Meat .....	16
Abb. 11:	Geplante Turmkonstruktion in den Alpen: Tor Alva .....	21
Abb. 12:	Die ersten Häuser aus dem 3D-Druck in den USA .....	21
Abb. 13:	Das TECLA-Haus aus Lehm .....	22
Abb. 14:	Die 20 wichtigsten Unternehmen in der AM-Patentierung (2001-2020) .....	23
Abb. 15:	„Gyroid“ als Beispiel für eine nur mit 3D-Druck realisierbare geometrische Form .....	26
Abb. 16:	Preisentwicklung von Systemen der Additiven Fertigung .....	28
Abb. 17:	Gedruckter Gesichtsschutz-Visor .....	31
Abb. 18:	3D- und 4D-Druck im Vergleich .....	36
Abb. 19:	Vorteil der rechnerischen Faltung: Volumenreduzierung um 87 % mit zwei Faltungen .....	37
Abb. 20:	Die disruptivsten Zukunftstechnologien für die nächsten Jahre .....	38
Abb. 21:	Entwicklung der Patentierung in 3D-Drucktechnologien .....	39

# 1 Executive Summary

- Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing: AM), seit langem bekannt als „3D-Druck“, gilt als **vielversprechende Zukunftstechnologie**, die einen entscheidenden Wendepunkt erreicht hat und sich in den nächsten zehn Jahren stark verändern wird.
- Die AM-Technologie bewegt sich vom anfänglichen „Hype“ zu einer **produktiven Etablierung** im Markt, wobei sie auf verschiedenen Ebenen mit konventionellen Prozessen konkurriert und diese zum Teil deutlich übertrifft (Gestaltungsfreiheit, Materialeffizienz, digitale Prozesskette etc.).
- Additive Fertigungstechnologie basiert darauf, digitale CAD-(Computer-Aided-Design) Modelle in sehr dünne Flächen zu zerlegen und diese im Druckprozess **schichtweise aufzubauen**. Dieser Ansatz ermöglicht es, unterschiedliche Materialien präzise zu formen und miteinander zu verbinden, wodurch **komplexe dreidimensionale Strukturen** erstellt werden können.
- Diese Eigenschaft bietet für zahlreiche komplizierte Produktionsprozesse einen **grundsätzlichen Vorteil**, der erhöhte Kreativität, effizienteren Materialeinsatz und Gewichtsersparnis ermöglicht.
- Hinzu kommen **weitere Treiber** wie technologischer Fortschritt, Werkstoffinnovationen, Industrialisierung, weltpolitische Lage, Gestaltungsfreiheit und Nachhaltigkeit.
- Diese „systemischen Treiber“ wirken als **Schlüsselfaktoren** für eine breitere Anwendung der AM-Technologie und bewirken eine dynamische und **rasch fortschreitende Marktdurchdringung**:
  - **Technologischer Fortschritt** führt zu kostengünstigeren und robusteren Prozessen, wodurch die Akzeptanz in der Industrie gefördert wird. Darunter fällt die Optimierung von Metalldrucktechnologien, wie bspw. die Laser-Schmelztechnologie (*Laser Powder Bed Fusion-Metal* (LPBF-M), früher auch *Selective Laser Melting* genannt) oder die Elektronenstrahlschmelztechnologie (*Electron Beam Melting*: EBM), die eine präzisere Herstellung von Metallteilen mit komplexen Geometrien ermöglichen.
  - **Werkstoffinnovationen** erweitern die Anwendungsbereiche von hochleistungsfähigen Polymeren und Metallen bis hin zu organischen Materialien. Mit organischen Materialien wie biologischem Gewebe, biokompatiblen Polymeren oder zellulosebasierten Substanzen wird eine Vielzahl neuartiger Anwendungen möglich – von der medizinischen Biofabrikation bis zur Herstellung umweltfreundlicher Produkte. Darüber hinaus ermöglichen diese Materialien auch innovative Ansätze in der direkten Herstellung von (alternativen) Lebensmitteln, wie etwa „3D-Druck“ von synthetischem Fleisch.
  - Die **Industrialisierung** von Additiver Fertigung erfolgt in verschiedenen Branchen, von der Medizin über die Luft- und Raumfahrt bis hin zum Konsumgütermarkt. Sie erfordert jeweils eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette und die tiefe Integration von Automatisierung. Durch die **Nachfrage von großen Originalausrüstungsherstellern** (OEMs) entsteht ein zusätzlicher Hebel.
  - Die **Weltlage**, mit globalen Ereignissen (wie der Corona-Pandemie) bis hin zu geopolitischen Konflikten (wie derzeit mit Russland und China), beeinflusst globale Fertigungsprozesse. Zunehmende Instabilitäten der Versorgungsketten unterstützen eine Rückverlagerung von Produktionsstätten aus Schwellenländern zurück in die Industriestaaten („*Reshoring*“) und bewirken einen stärkeren Aufbau lokaler Produktion, was oftmals neue und effizientere Produktionsverfahren erfordert (wie etwa AM).

- **Design, Komplexität und Personalisierung** sind entscheidend, insbesondere in der Medizintechnik, wo Additive Fertigung hochgradig personalisierte Produkte ermöglicht.
- **Nachhaltigkeitsaspekte** im Sinne der Kreislaufwirtschaft stehen ebenfalls im Fokus: Der Einsatz von Additiver Fertigung führt zu leichteren Produkten, die Ressourcen und Energie einsparen. Auch das **Recycling** von Druckabfällen ist Teil des nachhaltigen Potentials. AM revolutioniert so nicht nur die Herstellungsweise, sondern trägt auch zu **nachhaltigeren Produkten und Prozessen** bei.
- Aufgrund ihrer spezifischen Vorteile etabliert sich die Additive Fertigung bereits zunehmend in einer **Vielzahl von Anwendungen** und in diversen Industriezweigen – von Prototyping über Werkzeugbau und Endprodukt-Herstellung bis hin zum Ersatzteil-Management.
- In besonders **anspruchsvollen und zukunftsrelevanten Anwendungsbereichen** (wie Energiewirtschaft, Medizintechnik oder Luft- und Raumfahrt) ermöglicht ein schichtbasierter Fertigungsansatz die Erstellung funktionsoptimierter Bauteile – materialsparend, gewichtsreduzierend und oftmals zugleich stabilitäts erhöhend.
- Durch konkrete Auswirkungen auf Bauwesen, Automobilwirtschaft oder Konsumgüter- und Lebensmittelindustrie (Alternative Food) wird das **transformative Potential** der AM-Technologie besonders deutlich.
- Trotz vieler Vorteile (Designfreiheit, Materialeffizienz, digitale Prozessketten) bringt ein Einsatz von AM auch diverse Herausforderungen mit sich; dazu zählen etwa **Energieverbrauch und Standardisierungshürden**.
- Mit Blick auf die Zukunft wird die 3D-Drucktechnologie zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Bereiche **Konsolidierung, Innovation und die Entwicklung hin zur produktionsfähigen Additiven Fertigung (mithilfe von Systemintegratoren)** stehen dabei im Mittelpunkt.
- Zukünftige Entwicklungen wie **Robotik, Mikrodruck** und **größere Druckvolumina** könnten sowohl die prozessuale Effizienz als auch neue Anwendungsfelder für AM dynamisch vorantreiben.
- Hinzu kommt seit kurzem noch die Entwicklung sogenannter **4D-Druck-Verfahren**, die mit Hilfe innovativer Material- und Drucktechniken **völlig neuartige Anwendungsmöglichkeiten** eröffnen.
- Die bisher noch relativ zersplitterte 3D-Druck-Branche dürfte in nächster Zeit durch gezielte Neuordnungen geprägt sein, um schneller **kritische Größen** und **erhöhte Skaleneffekte** zu realisieren. Das generelle Umfeld für 3D-Druck wird dadurch klar an Aufmerksamkeit gewinnen.
- Um mögliche **sprunghafte Wachstumsschübe** nicht zu übersehen, sollten Unternehmer und Investoren in nächster Zeit ihre **Wahrnehmung** für das Thema 3D-Druck gezielt erhöhen und die weiteren Entwicklungen in diesem Bereich sehr genau verfolgen.

Abb. 1: Additive Fertigung im kontinuierlichen Entwicklungsprozess



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2024

## 2 Einführung in die Additive Fertigungstechnologie

Ein oft übersehener, jedoch äußerst bedeutender Bereich in der Fertigungsindustrie ist der 3D-Druck. Trotz jahrzehntelanger Existenz hat er in der Vergangenheit nur in einzelnen Branchen eine breite Akzeptanz erfahren. Inzwischen entfaltet die Additive Fertigung jedoch erhebliche Auswirkungen:

- ▶ Die jüngsten **Fortschritte bei Technik, Material und Software** haben 3D-Druck für eine größere Anzahl von Unternehmen zugänglich gemacht und damit die Implementierung von Geräten und Verfahren ermöglicht, die zuvor nur auf wenige High-Tech-Sektoren beschränkt waren.
- ▶ 3D-Drucker gibt es heute in verschiedenen Größen, von kleinen Tischgeräten über großformatige Industriemaschinen bis hin zu Großdruckern für den Gebäudebau.<sup>1</sup>

Die Additive Fertigung unterscheidet sich grundlegend von konventionellen Fertigungsverfahren, da sie Objekte durch das **computergesteuerte, schichtweise Hinzufügen von Material** erzeugt. Die Erstellung dreidimensionaler Objekte erfolgt mithilfe einer *Computer-Aided-Design* (CAD)-Datei. Dies ermöglicht die Herstellung individueller und oftmals hochkomplexer Objekte mit einem hohen Maß an Präzision und Flexibilität.



Zugriff auf das Video „Von der CAD-Datei bis zum fertigen Bauteil“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

Aufgrund der inhärenten Designflexibilität und der durch die technologische Reife erreichten Qualität, Reproduzierbarkeit, Effizienz und Präzision findet Additive Fertigung heute in **verschiedensten Industriebereichen** Anwendung.

- ▶ Die einzigartige Freiheit im Design ermöglicht die Herstellung von Produkten mit großen Wertigkeitsfaktoren wie Leichtbau, Funktionsintegration, thermischer-/fluidodynamischer Effizienz, Nachhaltigkeit und Personalisierung.

Der Begriff 3D-Druck wurde erstmals 1984 von *Charles Hull* geprägt, der zugleich einer der Pioniere auf diesem Gebiet ist. *Hull* entwickelte das *Stereolithografie*-(SLA)-Verfahren, das als erstes patentiertes Verfahren für die Additive Fertigung gilt. In den folgenden Jahren entstanden weitere Verfahren wie das *Fused Deposition Modeling* (FDM) und das *Selective Laser Sintering* (SLS). Die Technologie wurde stetig weiterentwickelt, neue Materialien wurden erschlossen und zusätzliche Anwendungsbereiche kamen hinzu.

Die 2000er Jahre markierten einerseits einen Wendepunkt, als der 3D-Druck vermehrt in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Medizin eingesetzt wurde. Der Einsatz von Metall-3D-Druckverfahren ermöglichte die Herstellung komplexer Bauteile für Flugzeuge und Raumfahrzeuge. In der Medizin führte der 3D-Druck zu bahnbrechenden Fortschritten, darunter die Herstellung maßgeschneiderter Implantate und Prothesen. Andererseits kämpfte die Branche auch mit bestehenden Herausforderungen wie begrenzten Materialoptionen, Genauigkeitsproblemen und Einschränkungen in der Baugröße.

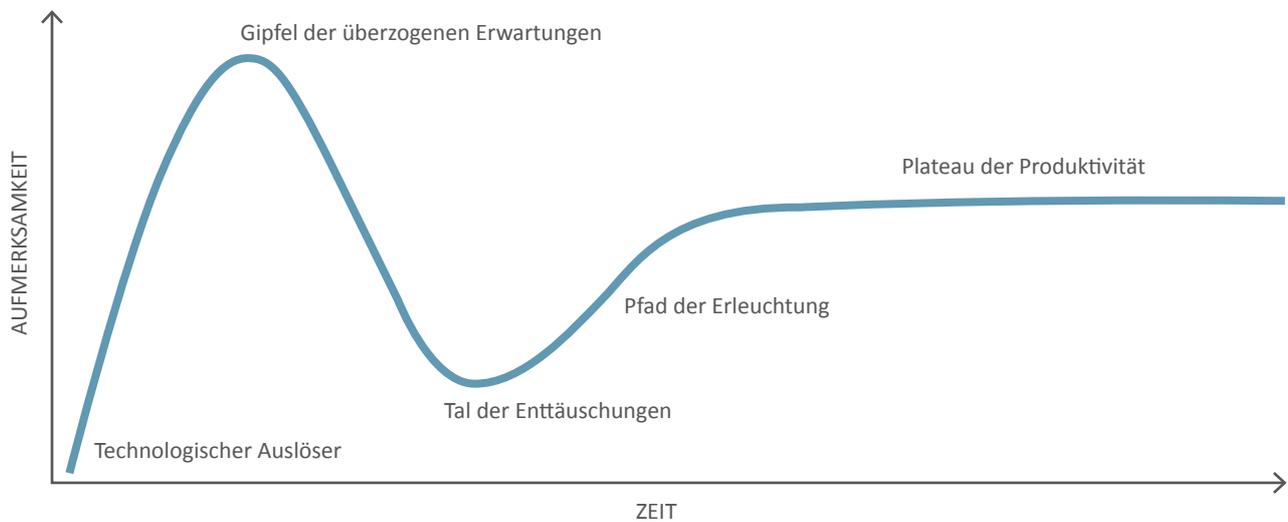
Mit dem Ablauf der ursprünglichen Patente und dem Fortschreiten der Technologie erlebte die Additive Fertigung ab den 2010er Jahren wieder einen regelrechten Boom. Unternehmen begannen, 3D-Druck in der Serienproduktion einzusetzen, und die Technologie wurde auch für Kleinunternehmen und Privatpersonen erschwinglicher.

- ▶ Heute ist die Additive Fertigung aus verschiedenen Industriezweigen nicht mehr wegzudenken. Von der Automobilindustrie über die Architektur bis hin zur Raumfahrt und Medizin hat der 3D-Druck die Art und Weise, wie Produkte hergestellt werden, revolutioniert und bietet ein enormes Innovationspotential für die Zukunft.

Gemäß dem *Gartner Hype-Zyklus* hat die AM-Technologie, die bereits in den 1980er Jahren entstanden ist, inzwischen sowohl den „*Gipfel der überzogenen Erwartungen*“ als auch das „*Tal der Enttäuschung*“ hinter sich gelassen und befindet sich derzeit auf dem **Aufstieg zum „Plateau der Produktivität“**, wo die Technologie vermehrt akzeptiert wird und in vielen Anwendungsgebieten erfolgreich Einsatz findet (vgl. Abb. 2).

Der *Gartner Hype-Zyklus* ist ein Konzept, das wechselhafte Lebenszyklen von Innovationen beschreibt und zur Bewertung von Technologien in Bezug auf ihre Reife und Akzeptanz in der Industrie dient.

Abb. 2: Themeneinordnung im Hype-Zyklus nach Gartner



Quelle: Idotter (2009, Zyklus)



*Additive Fertigung ist kein eigentlicher Hype mehr. Nach einer Phase der Ernüchterung hat sich die Technologie als Produktionstechnologie etabliert. Auf dem Maschinenmarkt ist eine Konsolidierung festzustellen. Druckerhersteller schließen sich zusammen oder werden von größeren Technologieanbietern übernommen. Aber nach wie vor entstehen neue Themen und Technologien im Bereich der Additiven Fertigung.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter Industriesektoren *Swissmem*



*BMW setzt bereits seit 30 Jahren 3D-Druck und additive Fertigungsverfahren ein. Im Jahr 1991 handelte es sich dabei noch um Prototypenteile für Konzeptfahrzeuge. Später wurden kleinere Serien für die *DTM*, den *Rolls-Royce Phantom*, den *BMW i8 Roadster* und den *MINI* produziert. Das Ziel besteht Angaben gemäß darin, die Fertigung von Automobilkomponenten ökonomischer zu gestalten und die Entwicklungsprozesse zu beschleunigen.*

Während der *Gartner Hype-Zyklus* eine laufende Perspektive für die Akzeptanz von Technologien bietet, ist es ebenso interessant, die **historische Entwicklung** Additiver Fertigung zu betrachten, um die Ursprünge und Fortschritte dieser Technologie besser zu verstehen (vgl. Abb. 3).

**Abb. 3: Die Entwicklung der Additiven Fertigung (Zeitliche Entwicklung mit repräsentativer Erwartungskurve der Technologie)**



Quelle: cross-ING, 2024; eigene Darstellung

**Begrifflichkeiten Abb. 3 (detailliertere Erläuterungen s. Abb. 4):**

Das **Fused Deposition Modeling (FDM)**-Verfahren, auch als Schmelzschichtung oder Düsensmelzverfahren bezeichnet, basiert auf der schichtweisen Ablagerung und Verschmelzung von Kunststoff, üblicherweise durch die Verwendung von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) oder Polymilchsäure (PLA).

**Selective Laser Sintering (SLS)** resp. **Laser Powder Bed Fusion-Polymer (LPBF-P)** ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein CO<sub>2</sub>-Laser kleine Polymerpulverpartikel zu einer massiven Struktur verschmilzt, um damit schichtweise ein Bauteil basierend auf einem 3D-Modell herzustellen.

Die **Stereolithografie (SLA)** gilt als das älteste patentierte additive Fertigungsverfahren. Hierbei wird ein Werkstück schichtweise aufgebaut, indem Punkte im Raum materialisiert werden. Die Herstellung erfolgt typischerweise vollautomatisch anhand von zuvor am Computer erstellten CAD-Daten, und es ist möglich, sowohl einzelne Teile als auch mehrere Teile gleichzeitig zu fertigen.

In den 1980er Jahren war der Begriff Additive Fertigung vorwiegend als Forschungsthema an Universitäten bekannt. Erst gegen Ende dieses Jahrzehnts erreichte der 3D-Druck mit dem ältesten patentierten additiven Fertigungsverfahren, bekannt als *Stereolithografie (SLA)*, eine erste Reifephase. In den frühen 1990er Jahren folgte dann mit dem *Selektiven Lasersintern (SLS)* eine neue Fertigungsmethode, die Mitte der 1990er Jahre zur kommerziellen Nutzung für die Prototypenerstellung führte. Erste industrielle Anwendungen wurden gegen Ende der 1990er Jahre eingeführt, womit eine erste Welle der Hype-Phase um die Additive Fertigung eingeläutet wurde.

Über längere Zeit war die Technologie dann mit **Herausforderungen** wie begrenzten Materialoptionen, Genauigkeitsproblemen und eingeschränkten Baugrößen konfrontiert, entsprechend dem „*Tal der Enttäuschungen*“ in der *Gartner*-Terminologie.

Allerdings hat die Additive Fertigung in den Folgejahren, vergleichbar mit dem „*Pfad der Erleuchtung*“, stetige Fortschritte verzeichnet: Technologische Innovationen haben zu einer breiteren Anwendung der Additiven Fertigung geführt, von der Luft- und Raumfahrt über die Medizin bis hin zur Automobilindustrie. Der Übergang von der Phase des „*Tals der Enttäuschungen*“ hin zum „*Plateau der Produktivität*“ zeigt sich heute in der zunehmenden **Integration der Technologie in industrielle Produktionsprozesse** und den **vermehrten Einsatz für kundenspezifische Anwendungen**.

- ▶ **In nächster Zeit ist nicht nur mit weiteren Anwendungsfällen für den 3D-Druck zu rechnen, sondern auch mit einer kontinuierlichen Expansion und Diversifizierung der Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Branchen. Besonders wird dabei die personalisierte Massenproduktion wichtig, da in diesem Bereich das größte Wachstumspotential gesehen wird.**<sup>2</sup>

Der zeitliche Entwicklungspfad der Additiven Fertigung folgt somit relativ deutlich den unterschiedlichen Phasen des *Gartner Hype-Zyklus*, wobei die Technologie zuletzt zunehmend an Reife gewinnt und sich sukzessive als **transformative Kraft** in verschiedenen Branchen etabliert.

In der nachfolgenden Untersuchung wird der Prozess der Additiven Fertigung vertieft dargestellt. Gleichzeitig werden relevante Faktoren beleuchtet, die Reichweite und Vielfalt der Anwendungen in der Industrie beeinflussen. Durch eingehende Analyse dieser systemischen Treiber lassen sich sehr klare Schlussfolgerungen über das **disruptive Potential** dieser Technologie ableiten.

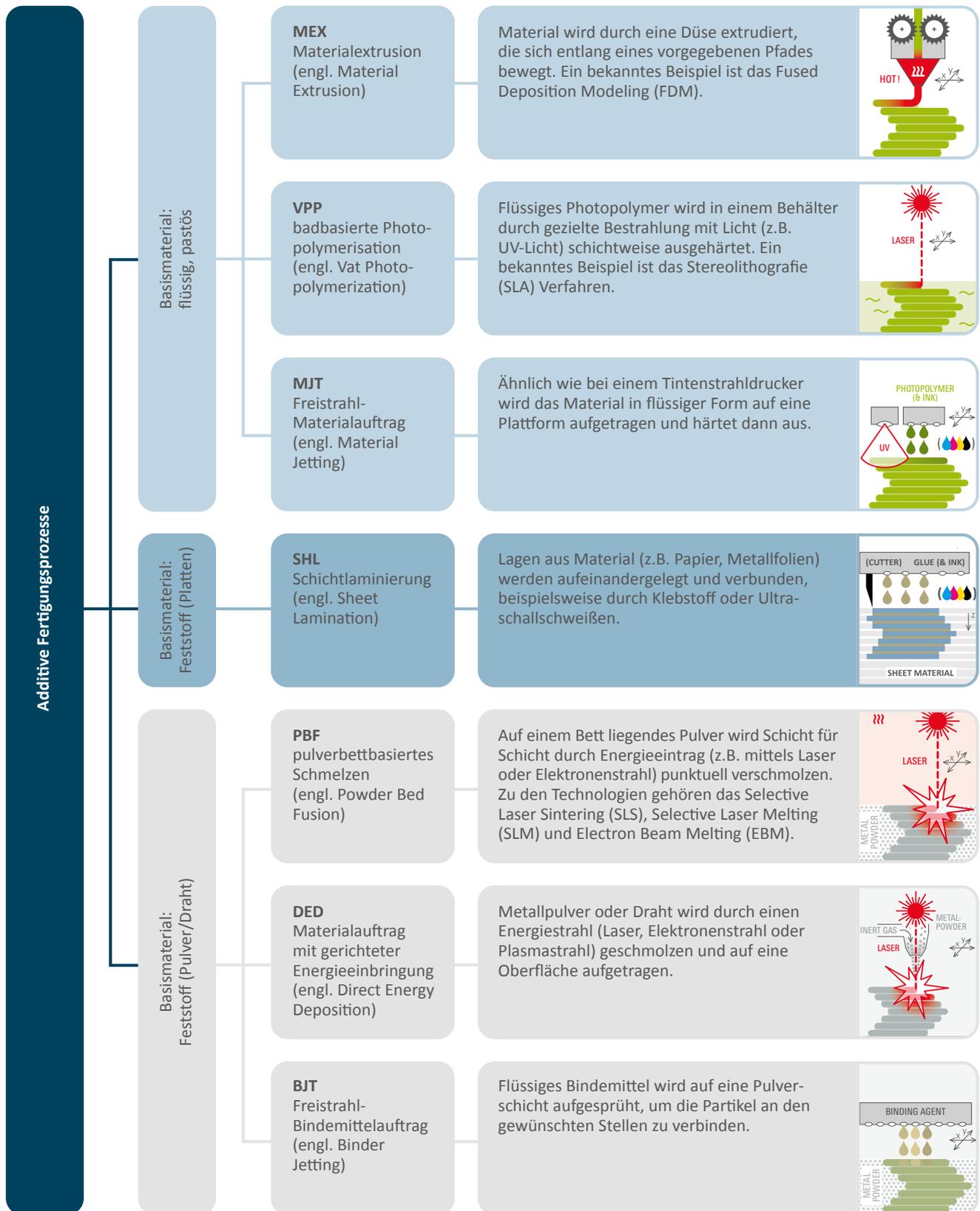
## 3 Additive Fertigung im Detail: Eine Übersicht

### 3.1 Methoden

Additive Fertigungsverfahren erzeugen durch das schichtweise Hinzufügen von Material mechanische Bauteile oder andere Objekte. Hierbei existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Fertigungsverfahren für Kunststoffe, Metalle, Verbundstoffe, organische Substanzen und weitere Materialien, die nach ihrem Wirkprinzip in sieben Kategorien eingeteilt werden können.<sup>3</sup>

- ▶ Die nachfolgende Darstellung gibt einen Überblick über die wichtigsten industriellen Fertigungsverfahren und ihre kategorialen Unterschiede – gegliedert in drei Basismaterialien: flüssiges/pastöses Basismaterial, Feststoff (Pulver/Draht) und Feststoff (Platten).<sup>4</sup>
- Zu den **flüssig/pastösen Basismaterialien** zählen bisher ausschließlich Polymere, Biomaterialien und Baumassen wie Beton. Dementsprechend finden sich die Anwendungen für diese Prozesse vor allem im Prototyping, Bioprinting und Bauwesen. *Fused Deposition Modeling (FDM)*, auch bekannt als *MEX* und *Stereolithografie (SLA)* sind Prozesse, die relativ einfach ohne aufwendige Prozessanforderungen ausgeführt werden können. Deshalb sind diese beiden Technologien gut für den Heimgebrauch geeignet und werden in Desktop 3D-Drucker-Systemen eingesetzt.

Abb. 4: Übersicht der unterschiedlichen Methoden der Additiven Fertigung



Quelle: cross-ING, 2024; eigene Darstellung; Daten von Ritter (2022, AM)

- Die Schichtlaminiierung mit **festem Basismaterial** ist ein Nischenprozess und wird vor allem für firmeninterne Herstellung von visuellen Prototypen benutzt (*Prototyping*). Unter visuellen Prototypen versteht man Modelle oder Entwürfe, die hauptsächlich auf visuelle Darstellung und Ästhetik abzielen, um ein besseres Verständnis des finalen Produkts oder Designs zu vermitteln.
- In **Pulver- und Drahtform** wird überwiegend Metall verarbeitet. Dabei erfolgt die Schicht-für-Schicht-Aufschmelzung des Metalls entweder direkt mithilfe von Verfahren wie der *Laser Powder Bed Fusion (LPBF)* oder *Direct Energy Deposition (DED)*. Alternativ wird das Metall durch die *Binder Jetting Technology (BJT)* und eine Matrix in Form gehalten und anschließend als Ganzes gesintert.
  - Sintern ist eine Technik, bei der Pulver durch Wärme und Druck zu festen Werkstücken verschmolzen werden; gesintert bedeutet, dass Metall unter Wärme und Druck in Form gehalten wird, ohne vollständig zu schmelzen.

Bei *BJT-Prozessen* kann ebenfalls Keramik verarbeitet werden. Im *Selective Laser Sintering (SLS)*-Prozess wird mit gleichem Funktionsprinzip wie bei *LPBF* Kunststoffpulver schichtweise verschmolzen.<sup>5</sup>

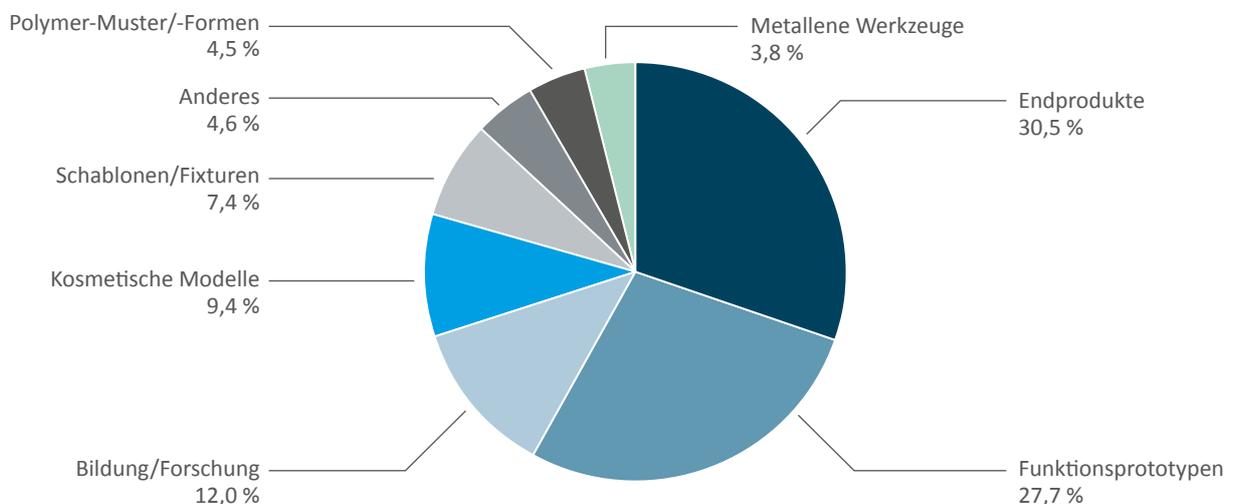
Neben diesen Ansätzen, die primär auf industrielle Werkstückfertigung ausgelegt sind, existieren noch weitere Verfahren, etwa für „Bioprinting“ oder alternative Lebensmittelproduktion, die sich jedoch auf die oben dargestellte Prozesslogik zurückführen lassen.<sup>6</sup>

### 3.2 Anwendungen entlang des Herstellungsprozesses

Additive Fertigung (Additive Manufacturing / AM) findet in einer Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Branchen Verwendung. Im Folgenden werden die wichtigsten Einsatzbereiche von AM entlang des Herstellungsprozesses beleuchtet.

Aus Abb. 5 ist zu entnehmen, dass sich die Hauptanwendung für AM längst nicht mehr nur auf die **Prototypenherstellung** fokussiert (27,7 % Anteil), sondern dass sich die Technologie besonders stark in der **Endproduktherstellung** (30,5 %) etablieren konnte. AM spielt (mit 12 %) auch eine große Rolle im Bildungs- und Forschungsbereich, wo sie für die Herstellung von Lehrmitteln, biomedizinische Forschung, Materialentwicklung, Ingenieurwissenschaften, Kunst und Design genutzt wird.

Abb. 5: Anwendungsbereiche der Additiven Fertigung



Quelle: cross-ING, 2024; eigene Darstellung; Daten von Campbell et al. (2023, AM)

### 3.2.1 Die frühe Phase der Produktentwicklung und Modellbildnisse

Über viele Jahre hinweg war das **Prototyping** die Hauptanwendung von 3D-Drucktechnologien. In dieser Phase werden maßstabsgetreue Modelle in der frühen Produktentwicklung erstellt, um Designvorstellungen zu vermitteln und Unklarheiten sowie Designfehler frühzeitig zu erkennen. Dies ist besonders hilfreich in der Automobilindustrie,<sup>7</sup> der Architektur/Baubranche und bei der Planung von medizinischen Eingriffen.

- In der **Maschinenbau- und Automobilbranche** werden durch 3D-Druck funktionale Prototypen erstellt, um das geometrische Zusammenspiel von Baugruppen zu überprüfen. Ingenieure können so die Funktionalität der Prototypen testen, Toleranzen prüfen und potentielle Designverbesserungen identifizieren, bevor die Serienproduktion beginnt.
- Die **Architektur- und Baubranche** erzielt wegweisende Fortschritte durch Nutzung von 3D-Druck für die Prototypenerstellung. Dieser Ansatz ermöglicht eine effiziente Visualisierung und Testung räumlicher Strukturen und komplexer Modelle, was bereits zu einer spürbaren Transformation in Design und Bauprozessen führt.
- In der **Medizin** erhalten Chirurgen dank detaillierter Tumormodelle auf Basis von AM Unterstützung bei der erfolgreichen Vorbereitung und Durchführung komplexer Operationen.<sup>8</sup> Ärzten wird so ermöglicht, Lage, Größe und Struktur eines Tumors vor der Operation besser zu verstehen, was zu einer erhöhten chirurgischen Präzision führt.



*Früher hatten wir für Patienten mit Tumoren etwas, das wir als individuelle Prothesen bezeichneten. Man untersucht den Patienten, macht einen MRT-Scan, misst alles aus und sendet das an einen Hersteller, der für den Patienten ein individuelles Modell in passender Größe anfertigt. Das dauerte so anderthalb bis zwei Monate. In dieser Zeit wächst der Tumor weiter und die Maße verändern sich. Dank des 3D-Drucks fertigen wir unsere Modelle heute in Rekordzeit an und sehen den Tumor in seiner vollen Größe. Das ist etwas, das ein zweidimensionales Bild leider nicht zu übermitteln vermag.*

Dr. Mohamed Ahmed Mashhour, Facharzt für orthopädische Chirurgie.<sup>7</sup>



- ▶ Der 3D-Druck ermöglicht somit eine **effiziente und präzise Validierung von Designs** in verschiedenen Industriezweigen. Dies gilt speziell beim Prototyping bzw. *Rapid Prototyping*, einer besonders schnellen Form des Produktentwicklungsprozesses, der Innovationszyklen in vielen Branchen zusätzlich beschleunigt.



Zugriff auf ein Video zu „*Rapid Prototyping mit 3D-Drucktechnologie*“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

### 3.2.2 Werkzeugbau: Verbesserung von Werkzeugen durch Additive Fertigung

Im **Werkzeugbau** trägt Additive Fertigung zur Optimierung von Gussformen für den Kunststoff-Spritzguss bei. AM bietet hier die Möglichkeit, konturnahe Kühlung in Werkzeugen zu integrieren, was zu einer besseren Wärmeableitung führt, den Durchsatz erhöht sowie die Produktqualität steigert.<sup>9</sup>

In der **Medizintechnik** können patientenspezifische Operationswerkzeuge und chirurgische Instrumente wie Bohrschablonen additiv hergestellt werden. Darüber hinaus eignet sich AM hervorragend für die Herstellung von verlorenen Formen im industriellen Metallguss oder in der Schmuckherstellung, was vollständig neue gestalterische Möglichkeiten eröffnet.

- ▶ Vorteil: Sinnvolle Unterstützung altbewährter Fertigungsverfahren und Erweiterung der Möglichkeiten traditioneller Handwerkskunst.

### 3.2.3 Effizientes und individualisiertes Ersatzteilmanagement

AM wird bereits effizient für die **Ersatzteilproduktion** eingesetzt. Durch die dezentralisierte und flexible Produktionsmöglichkeit des Prozesses können Ersatzteile lokal und bedarfsgerecht hergestellt werden. Das reduziert Lieferwege und Ersatzteillagerkapazitäten.

Mehrere Unternehmen nutzen bereits diese Anwendung der Additiven Fertigung, darunter auch die *Daimler Truck AG*. Im firmeninternen *Center of Competence 3D-Printing* wird ein digitales Lager ausgebaut, wo Teile flexibel und on-demand mittels 3D-Druck hergestellt werden können. Andere namhafte Firmen, welche ebenfalls diese Vorteile nutzen, sind *Boeing* und *DB-Schenker*.<sup>10</sup>

- ▶ Vorteil: Ineffiziente Standzeiten von Nutzfahrzeugen werden minimiert.

### 3.2.4 Endproduktherstellung

Einer der Hauptanwendungsbereiche für AM liegt in der Endproduktherstellung: Speziell bei der Produktion hochkomplexer und individuell angepasster Bauteile entfalten Additive Fertigungstechnologien ihre Stärken. Mit Hilfe von 3D-Druck können Unternehmen **maßgeschneiderte Produkte** herstellen, die den spezifischen Anforderungen ihrer Kunden entsprechen. Dies ist besonders relevant im Bereich der Luft- und Raumfahrtindustrie, wo komplexe Bauteile wie Turbinenschaufeln oder Leichtbaukomponenten für Satelliten und Raumfahrzeuge mit hoher Präzision und Effizienz hergestellt werden können. Additive Fertigung ermöglicht hier die Umsetzung **komplexer Designs und Strukturen**, die mit herkömmlichen Fertigungsmethoden schwer oder sogar unmöglich zu realisieren wären.

- ▶ Dieser Anwendungsbereich revolutioniert nicht nur die Produktionsweise, sondern fördert auch die Entwicklung innovativer Produkte und die Erschließung neuer Märkte durch die flexible Anpassung an individuelle Kundenwünsche und spezifische Anforderungen in der Produktion von Endprodukten. Bekannte Beispiele liegen etwa im Architektur- und Bauwesen oder im Bereich der Mode und Bekleidung, wo Designer 3D-Druck nutzen, um personalisierte Kleidungsstücke und einzigartige Accessoires zu entwerfen. Von maßgefertigten Schuhen bis hin zu Kleidern ermöglicht der 3D-Druck eine individuelle Gestaltung und Personalisierung von Modeartikeln, die die Grenzen herkömmlicher Fertigungsmethoden weit überschreiten.<sup>11</sup>

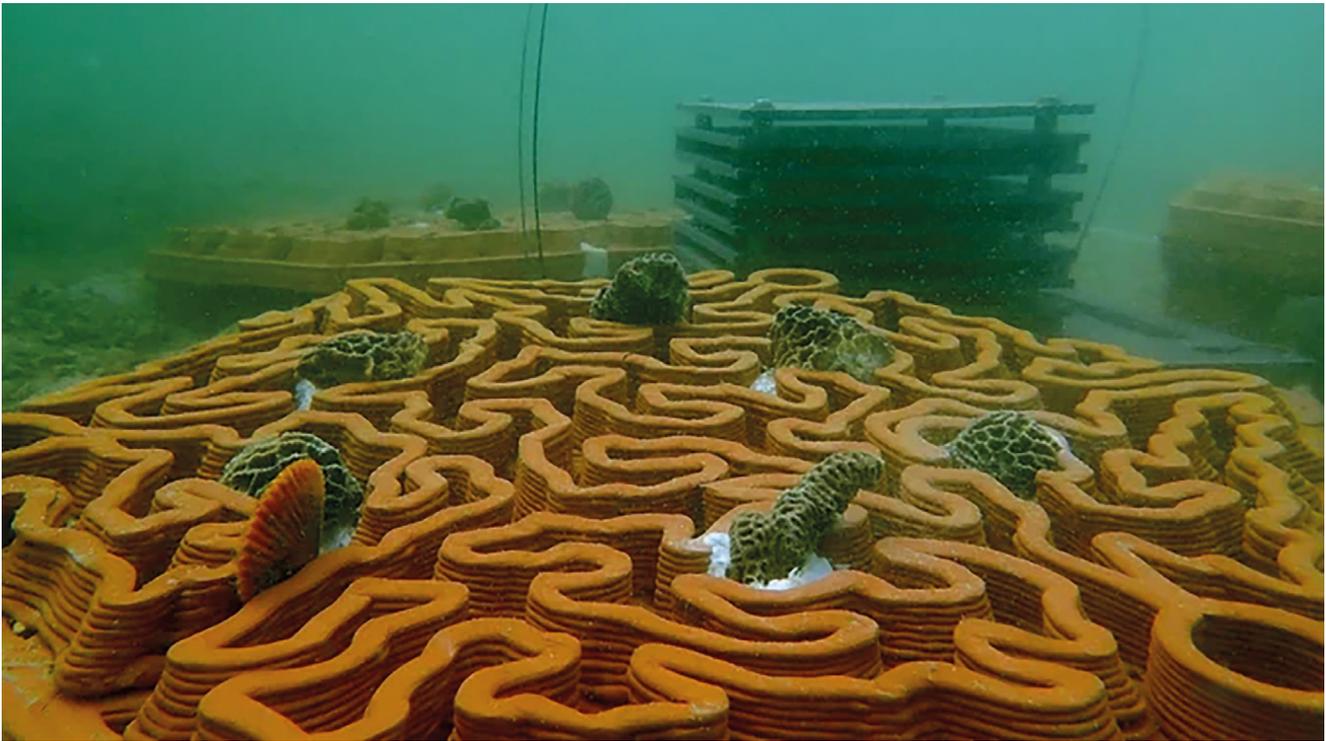
### 3.2.5 Spezielle Anwendungsgebiete

Weitere innovative Anwendungsbereiche für die 3D-Druck-Technologie liegen im **Umweltschutz** und beim Management spezieller Biosphären.<sup>12</sup> Die Anwendung der 3D-Drucktechnologie bietet dort ein vielversprechendes Potential für den Schutz und die Wiederherstellung gefährdeter Ökosysteme. Ein plakatives Beispiel ist die **Renaturierung und Regenerierung** absterbender Korallenriffe.<sup>13</sup>

So nutzt das Unternehmen *Archireef* um die Meeresbiologin *Vriko Yu* 3D-Druck, um künstliche Riffstrukturen aus Ton zu schaffen und bedrohte Korallenriffe zu restaurieren. Durch die Vielseitigkeit des 3D-Drucks und den Einsatz von kostengünstigem und umweltfreundlichem Ton können verschiedene Formen, Größen und Texturen geschaffen werden, die sich durch hohe Affinität zum natürlichen Vorbild auszeichnen und attraktiv für Korallenlarven sind (vgl. Abb. 6).

*Archireef* hat bereits erfolgreich künstliche Riffe in Südostasien installiert und plant, seine Aktivitäten deutlich auszuweiten, speziell in der arabischen Golfregion.<sup>14</sup>

Abb. 6: 3D-Druck zur Renaturierung von Korallenriffen



Quelle: Entrepreneur (2023, Archireef)

### 3.3 Branchenvielfalt und Schlüsselakteure

AM kommt inzwischen in verschiedensten Branchen zum Einsatz. Die größten Anwendungsbereiche liegen in der Automobil-, Konsumgüter- und Luftfahrtindustrie (vgl. Abb. 7).

“

*Die Luft- und Raumfahrtindustrie gehörte in den späten 1980er Jahren zu den ersten Anwendern des 3D-Drucks und ist auch heute noch führend in der Entwicklung und Anwendung dieses Verfahrens.*

Daussalt Systems (2023, Luft- und Raumfahrt)

”

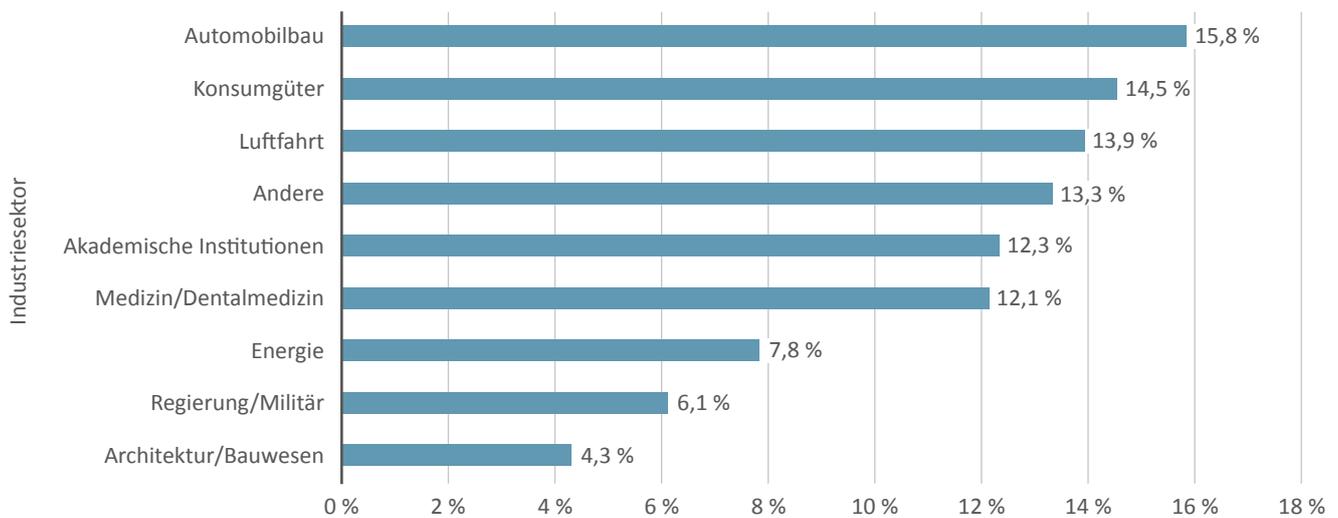
“

*Die Additive Fertigung umfasst ein breites Feld von Themen. Der Impact der Additiven Fertigung muss verstanden werden. Die Zukunft bringt noch vieles. Spezifisches Wissen über die neuesten Technologien und Wertschöpfungsketten ist unerlässlich.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter  
Industriesektoren *Swissmem*

”

Abb. 7: Präsenz und Durchdringung der Additiven Fertigung im Industrieüberblick



Quelle: cross-ING, 2024; eigene Darstellung; Daten von Campbell et al. (2023, AM)

### 3.3.1 Automobilbau

Im **Fahrzeugbau** spielt AM eine zunehmend wichtige Rolle bei der Gewichts- und Kostenreduktion von Fahrzeugen und wird auch in thermischen Anwendungen wie der Kühlung genutzt. Zusätzlich bietet AM hervorragende Möglichkeiten, einem breiteren Kundenspektrum individuelle und personalisierte Design-Optionen anzubieten, denn: „... sie können dank 3D-Druck Komponenten ganz individuell und persönlich abgestimmt anfertigen lassen.“<sup>15</sup>

Die *Fraunhofer* Einrichtung für Additive Produktionstechnologien (*Institute for Additive Production Technologies – IAPT*) konnte mit ihrem „*Design to Cost*“-Ansatz zwei Automobilkomponenten neugestalten und sowohl Gewicht als auch Kosten einsparen. Spezifisch wurde in Zusammenarbeit mit *Fiat Chrysler Automobiles (FCA)* eine Radaufhängung mitsamt Bremsattel entwickelt. Durch die Integration mehrerer Einzelkomponenten wie Radaufhängung, Bremsattel, Hydraulik und Hitzeschild in einem einzigen Bauteil konnten Montagekosten und Fertigungszeit massiv reduziert werden:

- **36 % weniger Gewicht, 12 Einzelteile in einem Bauteil, verlängerte Lebensdauer und bessere Geräusch- und Vibrationseigenschaften.** Außerdem wurde eine Türaufhängung neu entworfen, wobei **die Kosten für eine Kleinserie um 50 % und das Gewicht um 35 % reduziert** wurden.<sup>16</sup>

Der Luxusautomobilhersteller *Bentley* hat „... mit einer Investmentsumme von mehr als 3 Millionen Euro (...) im Jahr 2021 (...) mehr als 15.000 Bauteile in 3D herstellen können und somit Zeitersparnis bei Design und Herstellung sowie eine Minimierung des entstandenen Abfalls ermöglicht.“<sup>17</sup>

Auch andere Automobilhersteller nutzen zunehmend – insbesondere mit Fokus auf Gewichtersparnis – Verfahren der Additiven Fertigung, darunter Premiumhersteller wie *BMW, Bugatti, Ferrari, Lamborghini, McLaren, Mercedes* und *Porsche*, aber auch Großserienproduzenten wie *Ford, Mini* und *Seat*.<sup>18</sup>

Der Reifenhersteller *Michelin* hat 2019 den ersten Reifenprototypen in 3D-Druck hergestellt. Spezielle Merkmale dieser Reifen, sogenannter *Uptis (Unique Puncture-proof Tire System)*, sollen Risiken einer Reifenpanne verringern, Abfall reduzieren und die nachhaltige Mobilität fördern (vgl. Abb. 8).

---

*Abb. 8: Anwendungen in der Automobilindustrie*

Michelin und sein 3D-gedruckter Reifen



---

Quelle: 3Dnatives (2022, Automobilindustrie)

“

*Die Additive Fertigung ist schon jetzt ein integraler Bestandteil unseres weltweiten Produktionssystems und in unserer Digitalisierungsstrategie fest verankert. Neue Technologien wie diese können künftig die Produktionszeiten weiter verkürzen und das Potential werkzeugloser Fertigungsmethoden weiter ausschöpfen.*

Dr. Milan Nedeljković, Mitglied des Vorstands,  
Produktion, *BMW Group* (2020, Campus)

“

*Wir arbeiten intensiv daran, die Additive Fertigung vollständig auszureifen und einen maximalen Nutzen über den gesamten Produktlebenszyklus – von der Konzeptidee eines Fahrzeugs und der Produktion bis hin zum Aftersales-Bereich und dem Einsatz in klassischen Fahrzeugen zu generieren.*

Dr. Jens Ertel, Leiter Additive Manufacturing Center,  
*BMW Group* (2020, Campus)

“

“

### 3.3.2 Konsumgüter

Im **Konsumgüterbereich** revolutioniert der Einsatz von 3D-Drucktechnologie die Produktentwicklung und Fertigung, indem er innovative Wege für die schnelle Herstellung und Anpassung von Produkten eröffnet. Beispiele hierfür sind maßgefertigte **Schuhsohlen**, individualisierte **Schmuckstücke** und sogar personalisierte **Lebensmittel**, die den Konsumenten ein einzigartiges und auf ihre Bedürfnisse zugeschnittenes Produkterlebnis bieten.

Ein interessantes Beispiel im **Lifestylebereich** ist der *Adidas* FUTURECRAFT 4D, ein Laufschuh, bei dem die individuelle Sohle mithilfe von 3D-Drucktechnologie hergestellt wird. Dies ermöglicht eine präzise Anpassung der Dämpfung und Stabilität in verschiedenen Bereichen der Sohle entsprechend den Bedürfnissen des Läufers. Zudem können spezifische Materialien effizient eingesetzt werden, die für optimale Leistung, Haltbarkeit und Komfort sorgen und Abfälle reduzieren. Auch andere Hersteller wie *Nike* oder Start-Ups wie *Scientifect* und *Wiwv* bedienen sich der additiven Fertigung.<sup>19</sup>

- Spezielle Modelle von *Adidas*, wie der ALPHAEDGE 4D, der FUTURECRAFT.STRUNG und der 4D Fusio haben eine 3D-gedruckte Zwischensohle integriert (vgl. Abb. 9).



Zugriff auf ein Video zum „Adidas AlphaEdge und FutureCraft 4D - 3D Drucker Laufschuhe“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

Abb. 9: 4D Fusio von Adidas



Quelle: 3Dnatives (2021, Adidas)

Besonders aussichtsreich erscheinen moderne AM-Verfahren im Bereich **Spitzensport**, wo eine exakt auf die Physis eines Athleten abgestimmte und individuell optimierte Ausrüstung (vor allem Schuhe) über Sieg oder Niederlage entscheiden kann.<sup>20</sup> Nicht nur Sportriesen, auch Luxusunternehmen wie *Louis Vuitton*, setzen im Bereich Modebekleidung bereits 3D-Drucktechnologie ein, wie jüngst auf der *Hongkong Fashion Week* präsentiert.<sup>21</sup>

Die **Schmuckindustrie** ist ein weiterer Bereich, wo sich zunehmend disruptive Auswirkungen zeigen. Während Wachsausschmelzformen bereits additiv hergestellt werden, zeichnet sich für die Zukunft der verstärkte Einsatz des **direkten Schmuckdrucks** ab.<sup>22</sup> Dies ermöglicht die Herstellung komplexer und individueller Schmuckstücke. Ein wichtiger Entwicklungsschritt ist die Druckbarkeit von Edelmetallen auf Metall-3D-Druckern, was die Gestaltungsmöglichkeiten für Schmuckdesigner erheblich erweitert.

Auch personalisierte **Lebensmittel**, abgestimmt auf individuelle Ernährungsbedürfnisse und geschmackliche Präferenzen, bieten großes Potential.<sup>23</sup> Hier dient die Anwendung von AM der Herstellung geschmacklich und visuell ansprechender Süßigkeiten bis hin zur Texturverbesserung von Fleisch- und Fischersatzprodukten. Plakative Beispiele dafür reichen von pflanzlichen Steaks bis zum veganen Lachs aus dem 3D-Druck.<sup>24</sup> (Vgl. dazu Abb. 10).



Zugriff auf ein Video zu „3D-Druck und die Zukunft der Lebensmittel“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.



Zugriff auf ein Video zu „Fleisch-Alternative: Veganes Steak aus dem 3D-Drucker“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

Abb. 10: Pflanzliches Steak von Redefine Meat



Quelle: Veganivore (2023, Fleisch) und Foodish (2023, Fleisch)

Weitere Lebensmittelbeispiele inkludieren Pizzen, Spaghetti, Schokolade bis hin zu Torten.<sup>25</sup>

- ▶ Unternehmen wie *BeeHex* nutzen 3D-Drucktechnologie, um Pizzen herzustellen. Der Drucker kann Teig, Sauce und Beläge präzise auftragen und ermöglicht so eine sehr effiziente und zugleich individuelle Pizzaherstellung.<sup>26</sup>

Darüber hinaus kann die AM-Technologie zur Modulation der Aroma- und Geschmackswahrnehmung verwendet werden, indem Lebensmittel-Biopolymere gezielt texturiert werden, um ein einzigartiges Sensorikerlebnis zu schaffen.<sup>27</sup>



*3D food printing has the potential to transform the food industry by offering tailored nutrition, and sustainable manufacturing.*

Waseem et al. (2023, Physics)



Durch den 3D-Druck können hochgradig personalisierte und maßgeschneiderte Lebensmittel hergestellt werden, die den individuellen Bedürfnissen und Präferenzen der Verbraucher gerecht werden. Dies ermöglicht nicht nur eine bessere Anpassung an spezifische Ernährungsanforderungen, sondern trägt auch zur Förderung von Gesundheit und Wohlbefinden bei. Darüber hinaus bietet der 3D-Druck die Möglichkeit, Lebensmittel in Formen und Texturen zu gestalten, die mit herkömmlichen Fertigungsmethoden schwer oder unmöglich zu erreichen wären.<sup>28</sup>

### Alternative Nahrungsmittelproduktion durch Additive Fertigung

Noch sehr viel weitreichendere Anwendungsmöglichkeiten für AM bietet aus heutiger Sicht der **Gesamtkomplex alternativer Nahrungsmittelproduktion**, oftmals auch als „Alternative Food“ bezeichnet.

Ein vielversprechendes Beispiel ist die Herstellung von kultiviertem Fleisch (*Cultured Meat*). Dabei wird Fleischgewebe aus tierischen Stammzellen in einem bioreaktorähnlichen Umfeld kultiviert, um Fleisch ohne Schlachtung von Tieren zu produzieren. Dieser Prozess kann durch 3D-Drucktechnologien unterstützt werden, um komplexe Fleischstrukturen zu formen und zu gestalten.<sup>29</sup>

Hier geht es direkt zur Kurzversion der Studie des FERI Cognitive Finance Institute: „Zukunftstrend Alternative Food“ (2020)



Mit Blick auf die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der innovativen Lebensmitteltechnologie ziehen Forschende ein klares Fazit:

► **3D-Lebensmitteldruck hat das Potential, die Lebensmittelindustrie durch maßgeschneiderte Ernährung und nachhaltige Fertigung zu transformieren.**<sup>30</sup>

Die Kombination von 3D-Drucktechnologie mit fortschrittlichen Materialien (etwa synthetischen Proteinen) ermöglicht nicht nur, völlig neue alternative Ernährungssysteme aufzubauen, sondern auch Ressourcen effizienter zu nutzen und Nahrungsmittel auf individuelle Ernährungsbedürfnisse anzupassen.<sup>31</sup> Mit der steigenden Nachfrage nach nachhaltigen und ethisch vertretbaren Lebensmitteln gewinnt die Additive Fertigung auch hier an Bedeutung.

In den kommenden Jahren wird der Einsatz von 3D-Drucktechnologie in der Lebensmittelproduktion zunehmen und neuartige Lebensmittel mit unterschiedlichen Texturen hervorbringen. Darüber hinaus wird die Technologie dazu beitragen, gesunde Alternativen zu heutigen Lebensmitteln zu schaffen und Lebensmittelverschwendung zu verhindern.<sup>32</sup>



*In the meat field, 3D printing is expected to replace the traditional food industry and solve the problems of raw material waste and food contamination.*

Dong et al. (2023, 3D)



### 3.3.3 Luft- und Raumfahrt

In der **Luft- und Raumfahrt** werden von Einzelanfertigungen bis hin zu Kleinserien höchstleistungsfähige Komponenten mit AM hergestellt, um Gewicht- und Prozesseffizienz zu optimieren (u.a. Leichtbaukomponenten, Triebwerksteile, Satellitenkomponenten und Antennenstrukturen, Innenausstattung, Weltallinstrumente).

Die Branche eignet sich ganz besonders für die Nutzung der 3D-Drucktechnologie, da hier relativ geringe Produktionsmengen und der Wunsch nach immer leichteren und effizienteren Bauteilen – oftmals mit sehr **komplexen Geometrien** – zusammenfallen. Gleichzeitig bietet AM hohe Prozess- und Kosteneffizienz, was die Einhaltung strikter Liefertermine gewährleistet.

- ▶ Sowohl Unternehmen wie *Airbus* als auch *SpaceX* nutzen die 3D-Drucktechnologie zur Herstellung von leichten Komponenten für Flugzeuge. So wurde der *Airbus A350 XWB* mit 3D-gedruckten Titankomponenten optimiert (Halterungen und Verbindungsstücke), um das **Gesamtgewicht des Flugzeugs um eine Tonne zu reduzieren**. Das federführende Team wurde 2015 dafür für den *Deutschen Zukunftspreis* nominiert.<sup>33</sup>
- ▶ Im Bereich der Raketenantriebsysteme wird die Additive Fertigung unter anderem für die Entwicklung von Brennkammern eingesetzt. Das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* führte kürzlich erfolgreich Heißlauftests einer 3D-gedruckten Brennkammer durch. Neben den bestehenden Anforderungen wie maximale Sicherheit, hohe Leistung und lange Lebensdauer kann mittels Additiver Fertigung durch Kostenreduktion in der Produktion der hochkomplexen Bauteile die Wettbewerbsfähigkeit vergrößert werden.<sup>34</sup>

### 3.3.4 Akademische Institutionen

An **Universitäten** werden 3D-Drucker eingesetzt, um Studierenden einerseits die grundlegende Technologie näherzubringen, andererseits aber auch als Werkzeug zur Erstellung physikalischer Prototypen. In der Forschung und Entwicklung wird die Nutzung ebenfalls intensiviert. In den weit verbreiteten „*Makerspaces*“, öffentlich zugänglichen Werkstätten für kreatives Tüfteln und Entwickeln, sind 3D-Drucker mittlerweile unverzichtbare Instrumente geworden.<sup>35</sup>

### 3.3.5 Medizintechnik/Dentalmedizin

In der **Medizintechnik** unterstützt der 3D-Druck die Herstellung von maßgeschneiderten Prothesen und Implantaten. Diese können exakt an die individuellen Anatomien der Patienten angepasst werden.

- ▶ Die Additive Fertigung eignet sich hervorragend für die Fertigung von patientenspezifischen Pro-/Orthesen. Die Passform wird optimal an den Patienten angepasst und komfortsteigernde Funktionen wie Belüftungseinlässe und zusätzliche Annehmlichkeiten werden mühelos integriert. Dadurch kann für die Patienten ein signifikanter Mehrwert generiert werden.<sup>36</sup>

#### *Zahnmedizin: Fortschritte bei der Zahnprothetik*

Die Zahnmedizin ist ein Industriezweig, der bereits von AM profitiert, jedoch noch viel Raum für Innovationen bietet. Während viele zahnärztliche Anwendungen wie Kronen und Brücken bereits weit verbreitet additiv gefertigt werden, steht die Herstellung von Komplettlösungen für die dritten Zähne noch vor Herausforderungen. Ein entscheidender Fortschritt in diesem Bereich ist die Einführung von Keramikmaterialien für den Dentalbereich, die bisher hauptsächlich gefräst wurden. Erste Systeme, welche auch für die Herstellung von Komplettlösungen im Bereich der Zahnmedizin geeignet sind, werden vereinzelt bereits angeboten.<sup>37</sup> Trotz dieser Fortschritte bestehen weiterhin Herausforderungen im Zusammenhang mit der digitalen Abformung, da die aktuelle Scantechnologie die Zahnwurzelgeometrie unter dem Zahnfleisch oftmals nicht ausreichend erfassen kann.

### 3.3.6 Energie

Im **Energiesektor** gewinnt die 3D-Drucktechnologie breite Anwendung, indem sie innovative Wege für das Prototyping von Installationen und die Optimierung von Energiegewinnungssystemen eröffnet. Gleichzeitig können mit Hilfe von AM Turbinen- oder Triebwerkskomponenten und andere komplexe Bauteile sowohl gewichtssparend als auch ressourcenschonend und zugleich funktional optimiert hergestellt werden. Auch das Ersatzteilmanagement ist von immenser Bedeutung in dieser

Branche. Standzeiten der Anlagen können rasch zu erheblichen finanziellen Verlusten führen und die Versorgungssicherheit gefährden. Die Vorteile einer bedarfsgerechten Ersatzteilerfertigung, wie geringere Lagerkapazitäten und kurze Lieferwege, entfalten hier eine bedeutende Wirkung, insbesondere für abgelegene Standorte mit begrenzter Lagerkapazität, wie etwa Hochseeanlagen.<sup>38</sup>

- ▶ Das *Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)* hat 2019 eine Gasturbine mittels Additiver Fertigung hergestellt. Der im Maßstab 1:25 produzierte vollfunktionsfähige Demonstrator „Siemens SGT6-8000 H“ wurde im Design überarbeitet, wodurch die Anzahl der **Komponenten von bisher knapp 3000 auf nur 68 reduziert** werden konnte. Weiteres Optimierungspotential kann durch AM problemlos umgesetzt werden, wie beispielsweise eine konturnahe Kühlung von kritischen Komponenten wie Turbinenschaufeln.<sup>39</sup>

Völlig neue Möglichkeiten resultieren im Bereich der Energiewirtschaft aus der zunehmenden **Elektrifizierung** im Rahmen einer umfassenden Dekarbonisierung. Dieser Megatrend erfordert insbesondere einen deutlichen Ausbau entsprechender **Energiespeicher und Batteriesysteme**.<sup>40</sup>

Vgl. zum Thema Dekarbonisierung und Batteriesysteme die beiden ausführlichen Studien des FERI Cognitive Finance Institute: „**Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft**“ (2018), sowie „**Alternative Mobilität – Herausforderungen und Perspektiven für Umwelt und Automobilindustrie**“ (2019).



- ▶ Einen bedeutenden Durchbruch auf diesem Gebiet verzeichnet das Unternehmen *Sakuu* – mit dem Start der Massenproduktion von **3D-gedruckten Festkörperbatterien**. Dieser innovative Ansatz markiert einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der alternativen Energiespeicherung. Die neue *Kavian-Technologie* auf Basis von AM ermöglicht es, Batterien in verschiedenen Größen und Formen herzustellen, was eine Anpassung an die individuellen Anforderungen der Kunden erlaubt. Durch das *SwiftPrint-Verfahren* gelingt es zudem, Materialien wie Glas, Metalle, Keramik und Polymere effizient in einer Schicht zu drucken und zu integrieren. Die Massenproduktion soll weltweit vorangetrieben werden, um bis 2030 eine jährliche Produktion von 200 GWh an Batteriekapazität zu erreichen.<sup>41</sup>

Dieser **Durchbruch könnte die Energieindustrie grundlegend verändern**, da die 3D-gedruckten Festkörperbatterien zahlreiche Vorteile bieten, darunter **schnellere Ladezeit, höhere Kapazität und verbesserte Sicherheit**. Dies könnte die Zukunft der Energiespeicherung nachhaltig beeinflussen und einen signifikanten Beitrag zur Förderung erneuerbarer Energien leisten, speziell im Bereich von Elektrofahrzeugen und der Elektronikindustrie.

### 3.3.7 Regierung/Militär

**Regierungen und Militäreinheiten** setzen auf die AM-Technologie, um ihre Effizienz zu steigern und sich schnell an wechselnde Anforderungen anzupassen. Von der schnellen Prototypenerstellung bis zur On-Demand-Fertigung von Ersatzteilen ermöglicht der 3D-Druck eine agile Reaktion auf unvorhergesehene Herausforderungen. Militäreinheiten nutzen diese Innovation auch, um leichtgewichtige und dennoch widerstandsfähige Ausrüstung sowie individuell angepasste Ausrüstungsgegenstände herzustellen. Diese fortschrittlichen Anwendungen zeigen, wie der 3D-Druck nicht nur die Logistik revolutioniert, sondern auch die Art und Weise, wie Regierungen und Militäreinheiten ihre Missionen gestalten.<sup>42</sup>



**1,7 Milliarden USD, das ist der voraussichtliche Wert des 3D-Drucks im Verteidigungssektor bis 2027.**

3Dnatives (2024, Verteidigungsindustrie)



### 3.3.8 Architektur/Bauwesen

Die **Baubranche** durchläuft durch den Einsatz des 3D-Drucks eine entscheidende Transformation. In diesem Kontext werden nicht nur Gebäudemauern vor Ort von Robotern schichtweise errichtet, sondern auch Bauelemente durch hochmoderne 3D-Drucker vorgefertigt und zur Montage an die Baustelle transportiert. Diese technologischen Durchbrüche zeugen von einer revolutionären Veränderung tradierter Konzepte, wie Gebäude entworfen und hoch effizient errichtet werden.

Die Anwendung des 3D-Drucks im Bauwesen geht aber über die bloße Effizienz hinaus. Nicht nur wird durch eine effiziente Materialnutzung der Abfall reduziert, sondern der permanente Betrieb von Konstruktionsdruckern beschleunigt auch die Fertigstellung. Durch den Einsatz von organischen Materialien wie Bambus und Ton können zudem nachhaltige Aspekte nahtlos in den Bauprozess integriert werden. Dies ermöglicht nicht nur eine **ökologischere Bauweise**, sondern eröffnet auch völlig neue **gestalterische Spielräume** für Architekten.

- ▶ Dank dieser Freiheiten im Design können innovative und stabilere Strukturbaueisen entstehen, die die Grenzen der herkömmlichen Architektur neu definieren.

In jüngerer Zeit gab es mehrere spannende Beispiele von 3D-Druck-Projekten in der Baubranche:

- ▶ Im Januar **2024** wurde das größte 3D-Druck-Haus in Europa (50 Meter lang, 11 Meter breit und 9 Meter hoch) fertiggestellt. Der Rohbau wurde in 170 Stunden erstellt und innerhalb von zehn Monaten war das Gebäude (mit Standort in Heidelberg) bezugsbereit. Für den Druck wurde ein besonderer Hightech-Baustoff eingesetzt, der zu 100 % recyclebar sein soll, z. B. für den Straßenbau.<sup>43</sup>



Zugriff auf ein Video zu „Immobilien aus dem 3D-Drucker“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

- ▶ Auch die *ETH Zürich* ist aktuell an einem digital gedruckten Bauwerk beteiligt, das entlang der alten Julierpass Route bis Ende Juni **2024** in der Schweiz entstehen soll. 30 Meter hoch soll der Weiße Turm, auch als „*Tor Alva*“ bezeichnet, sein, und wäre somit das höchste gänzlich digital gedruckte Bauwerk der Welt (vgl. Abb. 11). Das zentrale Gestaltungselement des Weissen Turms hat 32 verzweigte Betonsäulen. Die größten Säulen sind 1,2 Tonnen schwer und werden in acht Stunden gedruckt. Die Gesamtkosten des Projekts belaufen sich auf 4,1 Millionen CHF.<sup>44</sup>



Zugriff auf ein Video zum „Tor Alva: dem höchsten digital gebauten Bauwerk der Welt“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

- ▶ Im Februar **2023** entstand Deutschlands erstes Haus aus dem 3D-Drucker im westfälischen Beckum. In vier Tagen wurde mit der Unterstützung von drei Bauarbeitern ein 160 Quadratmeter Haus für 500.000 EUR gebaut. Bei herkömmlicher Bauweise wäre hingegen mit ungefähr fünf Monaten Bauzeit zu rechnen.<sup>45</sup>



Zugriff auf ein Video zu „Deutschlands erstem Haus aus dem 3D-Drucker“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

- ▶ Die *East 17th Street Residences* in Texas waren **2021** die ersten 3D-gedruckten Häuser, die in den USA zum Verkauf standen (vgl. Abb. 12)



Zugriff auf ein Video zum „TECLA-Haus aus Lehm: Verbindung von Erde und Hightech“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

- ▶ Das erste 3D-gedruckte Haus, welches **2020** in Italien **vollständig aus lokalem Lehm** hergestellt wurde, ist unter dem Namen *Haus TECLA* bekannt (vgl. Abb. 13). Das vom Architekten *Mario Cucinella* entworfene und von der italienischen 3D-Druckfirma *WASP* gebaute Haus war das erste aus biologisch abbaubarem und recyclebarem Material gefertigte „Null-Abfall-Gebäude“. Über mehrere Monate hinweg druckten große Maschinen mehr als 200 Stunden lang mit Spezialdüsen Lehm aus einem nahegelegenen Flussbett in gewundene Rundungen.<sup>46</sup>

Abb. 11: Geplante Turmkonstruktion in den Alpen: Tor Alva



Quelle: NZZ (2024, Turm); basierend auf Hansmeyer/Dillenburger

Abb. 12: Die ersten Häuser aus dem 3D-Druck in den USA



Quelle: East 17th Street Residence (2024, Residence)

Abb. 13: Das TECLA-Haus aus Lehm



Quelle: AD (2021, Lehm)

- Das erste Bürogebäude aus dem 3D-Drucker wurde **2016** in Dubai eröffnet. Das „Büro der Zukunft“ ist das erste große Projekt der *Dubai Future Foundation*, einer Regierungsinitiative, die innovative Projekte unterstützt. In nur 17 Tagen wurde das 6 Meter hohe und 45 Meter lange voll funktionstüchtige Gebäude mit einem 3D-Großdrucker hergestellt.<sup>47</sup>

“

*Den Klimawandel zu bremsen, war eine wesentliche Motivation bei diesem Projekt.*

Mario Cucinella, Architekt, AD (2021, Lehm)

”

“

*Wir sehen dieses Projekt als einen **Referenzpunkt in der Entwicklung der 3D-Technologie**, die für Regierungen, aber auch internationale Forschungs- und Entwicklungszentren große Bedeutung haben wird. Wir dokumentieren unsere Erfahrungen mit dem 3D-Druck im Laufe des Projekts und wollen auf diesen Erfahrungen aufbauen, um die Technologie weiterzuentwickeln.*

Scheich Mohammed Bin Rashid al Maktoum, Vizepräsident und Premierminister der Vereinigten Arabischen Emirate, Highlight (2016, Bürohaus)

”

### 3.3.9. Schlüsselakteure

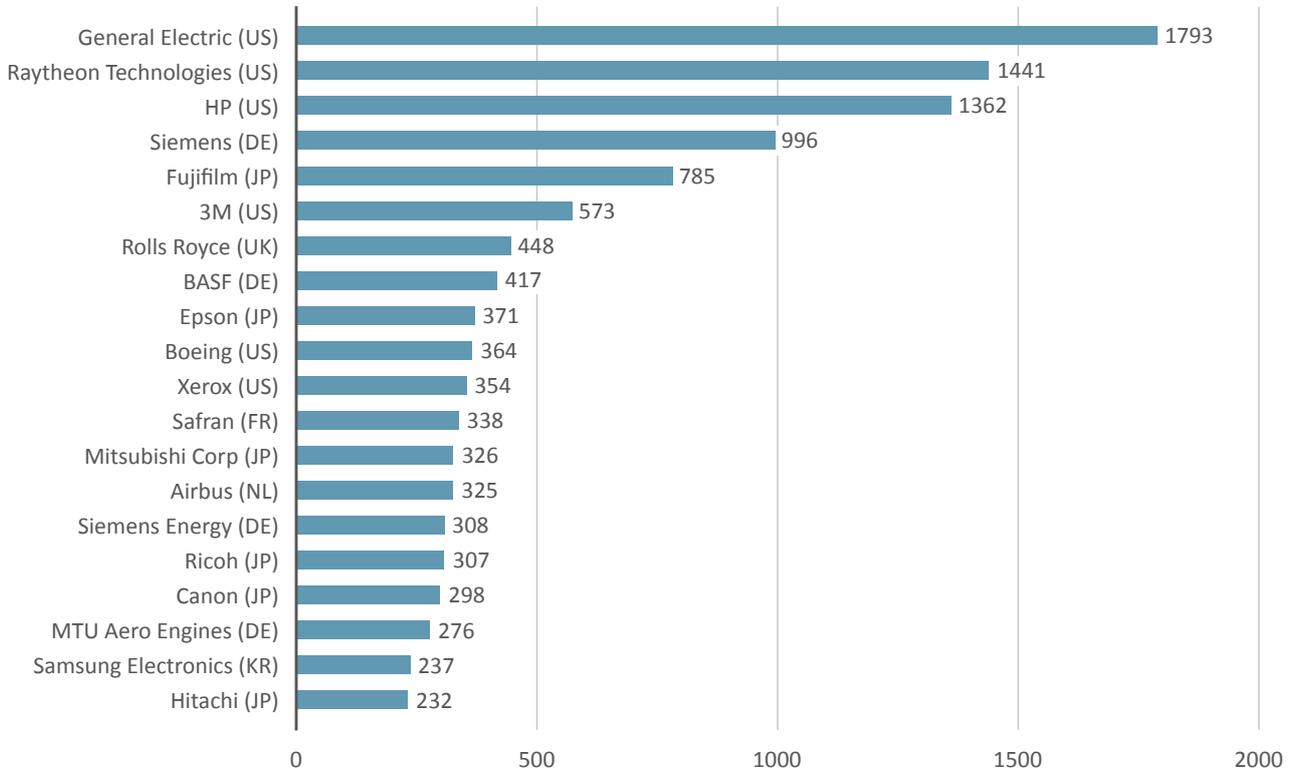
Zwischen 2001 und 2020 zeichneten sich drei US-amerikanische Unternehmen besonders aus, in dem sie über 1000 Patente (IPFs / *Intellectual Property Fillings*) im Bereich der Additiven Fertigung generierten (vgl. Abb. 14). Es ist bemerkenswert, dass sechs US-Unternehmen unter den Top 20 vertreten sind. Europa kann ebenfalls mit sieben Unternehmen in den Top 20 punkten, darunter vier aus Deutschland sowie je eines aus UK, Frankreich und den Niederlanden. *Siemens* führt dabei als größter europäischer Beitragender mit knapp 1.000 IPFs, gefolgt von *Rolls Royce* und *Safran*.

- ▶ Interessanterweise platziert sich die *Fraunhofer-Gesellschaft* als größte öffentliche Forschungsorganisation auf dem 21. Platz und zeigt signifikante Wirkung mit 221 IPFs.

Sechs japanische Unternehmen, angeführt von *Fujifilm* mit 785 IPFs, ergänzen die Liste. *Fujifilm* hatte bis 2013 das größte IPF-Portfolio in der Additiven Fertigung, bevor große internationale Unternehmen wie *Siemens*, *General Electric*, *HP* und *Raytheon Technologies* ihre Patentportfolios im Bereich AM aufbauten.

Obwohl die Liste der führenden Antragsteller von großen internationalen Unternehmen dominiert wird, sind auch etablierte 3D-Druckunternehmen und aufstrebende Start-ups vertreten. Beispiele hierfür sind *EOS* aus Deutschland mit 200 IPFs sowie *Materialise* aus Belgien und *Stratasys* aus Israel, die beide über 100 IPFs vorweisen können. Diese Vielfalt illustriert die breite Landschaft der Beitragenden und zeigt, dass das Feld nicht nur von Branchenriesen, sondern auch von spezialisierten 3D-Druckunternehmen bereichert wird.<sup>48</sup>

Abb. 14: Die 20 wichtigsten Unternehmen in der AM-Patentierung (2001-2020)



Quelle: Europäisches Patentamt (2023, Patentanmeldungen)

## Stimmen aus der Industrie zum Thema 3D-Druck

Ein Einblick in die Themenwelt durch Repräsentanten aus der Industrie, der folgende Vorteile von AM hervorhebt: Formfreiheit, Personalisierung, Ersatzteilmanagement und Standardisierung.

### Interview mit Martin Hofer (*Feramic AG*) und Dr. Adriaan Spierings (*Swissmem*)



*Welche Chancen und Risiken bietet 3D-Druck? Wie weit ist die Entwicklung vorangeschritten und warum wir das Thema gerade jetzt wieder spannend?*

**Hofer:** Die grundlegenden Vorteile der Additiven Fertigung, wie bspw. die Umsetzung komplexer Geometrie-Strukturen, sind aktuell wichtiger denn je. Komplexe mathematische Strukturen, wie TPMS Strukturen (dreifach-periodische Minimaloberflächen, „*triply periodic minimal surfaces*“), die durch 3D-Druck physisch realisiert werden können, sind in aller Munde und bieten eine spannende Alternative zu den Gitterstrukturen. Nun braucht es entsprechende Tools, damit die Modelle erstellt und simuliert werden können. Die normalen Rechenleistungen der Computer reichen bei weitem nicht aus, um thermodynamische oder FEM-Simulationen (Ergänzung der Redaktion: *Finite-Elemente-Methode*: numerisches Verfahren, das u.a. im Rahmen von Simulationen zur gezielten Strukturanalyse und -optimierung eingesetzt wird) durchzuführen. Hier braucht es Lösungen!

**Dr. Spierings:** Neue Chancen ergeben sich durch die bessere Integration in die Wertschöpfungskette und eine größere Automatisierung. Damit können neue Marktsegmente erschlossen werden. Die Risiken werden als eher gering eingeschätzt, da der 3D-Druck eine ergänzende Technologie ist und der Marktanteil vergleichsweise noch relativ klein ist. Da ein großer Preisdruck besteht, bergen die hohen Kosten der Drucker (Anschaffung und Unterhalt) das Risiko, dass die Verbreitung der Technologie ausgebremst wird. AM hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt: Weg vom *Rapid Prototyping* hin zur etablierten Produktionstechnologie. Treiber sind u.a. die Digitalisierung, Fortschritte in der Qualitätssicherung und günstigere Drucker (welche im Metalldruck z.B. mit Fortschritten in der Lasertechnologie verbunden sind).



*Welche wirtschaftlichen Auswirkungen hat die weit verbreitete Einführung der Additiven Fertigung, und wie könnte sie sich auf herkömmliche Fertigungsprozesse und Lieferketten auswirken?*

**Hofer:** Die Optimierung der Ersatzteile-Logistik könnte sich positiv auf die Umwelt auswirken, indem weniger Teile weltweit verschifft werden müssen. Der Weg zu dieser Optimierung ist jedoch noch weit.

Ebenso könnte die Lagerhaltung durch AM eine neue Dimension bekommen, doch auch hier ist es noch ein beträchtlicher Fortschritt erforderlich. Im Bereich Kunststoff sind wir schon deutlich weiter.

**Dr. Spierings:** Das aktuelle Konzept von „lokale Produktion vs. globale Lieferketten“ könnte sich ändern zu „globale Produktion vs. lokale Lieferketten“. D.h. man druckt Einzelteile nur in der notwendigen Menge und genau dort, wo man sie benötigt; man schickt nur noch Daten um die Welt statt fertiger Teile. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine weitgehende Standardisierung von Technologien, Prozessen und Methoden, um die Additive Fertigung möglichst überall nach gleichen Vorgaben und Methoden zu betreiben, und damit eine Vertrauensbasis zwischen Auftraggeber und Hersteller (z.B. 3D-Dienstleister) zu schaffen.



*Wie wirkt sich die Integration von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen auf die Optimierung von additiven Fertigungsprozessen aus, und welche potentiellen künftigen Entwicklungen können wir in diesem Bereich erwarten?*

**Hofer:** Hier wird sich vor allem in der Simulation der Bauprozesse einiges tun. Die Vorhersage des Verzugs, der thermischen Gegebenheiten im Bauprozess sowie das Erkennen der kritischen Flächen am Bauteil sind Arbeitsschritte, die zukünftig durch Software erkannt und entsprechend vorgehalten oder im Prozess direkt angepasst werden können.



*Welche Rolle spielt das Thema Nachhaltigkeit bei der Entwicklung der Additiven Fertigung, und wie arbeiten Forscher und Branchenexperten an umweltfreundlicheren Verfahren?*

**Hofer:** Der minimale Verbrauch der Ressourcen wird ein Treiber der Additiven Fertigung sein. Die unmittelbare Wiederverwendbarkeit des nicht verbauten Materials ist ein wesentlicher Faktor.

**Dr. Spierings:** Die Nachhaltigkeit ist bereits heute ein wichtiger Aspekt und in Zukunft wird sie noch wichtiger. Bezüglich Emissionen und Minimierung des Materialbedarfs ist z.B. der Metalldruck je nach Vergleichsbasis schon ziemlich nachhaltig. Beim Energieverbrauch ist dies nicht unbedingt der Fall. Das Einsparpotential bei Lasern oder auch Sinteröfen ist beschränkt. Umso wichtiger ist die Steigerung der Performance 3D-gedruckter Teile in der Anwendung. Die eingesparte Energie über die Einsatzdauer kann den höheren Energieaufwand in der Herstellung kompensieren. In Zukunft sollte spezifische Software die gesamte Energiebilanz bereits zu Beginn einer Entwicklung ermitteln können, womit auch eine bessere Beurteilung der Nachhaltigkeit erreicht werden kann.



*Welche Bereiche sind die vielversprechendsten für die künftige Forschung und Entwicklung im Bereich der Additiven Fertigung, und welche Durchbrüche erwarten Sie für das nächste Jahrzehnt?*

**Dr. Spierings:** Eine große Rolle wird die Künstliche Intelligenz (KI) spielen: Die Integration von KI in der Designphase, wie auch in der Prozessüberwachung und -steuerung sowie im Qualitätsmanagement.



*Welche Industrien werden disruptiv am stärksten von der weiteren Entwicklung betroffen sein und warum? Wo ergeben sich die größten Opportunitäten?*

**Dr. Spierings:** AM als solches ist eher nicht mehr disruptiv, da es immer mehr als etablierte Fertigungstechnologie betrachtet wird. Opportunitäten ergeben sich überall dort in der MEM-Industrie, also der Maschinen-, Elektro- und Metall-Industrie, wo...

- kleine bis mittlere Serien notwendig werden;
- die Performance eines Bauteils/Anwendung durch Innovation auf Ebene der Struktur gesteigert werden soll. Dies erfordert Funktionsintegration, komplexe Strukturen etc., was in der Regel nur noch additiv herstellbar ist;
- ein gewisser Grad an Personalisierung notwendig ist, z.B. im Bereich Orthopädie.



*Wo sehen Sie die größten Chancen für Investoren, Teil der Lösung zu sein?*

**Dr. Spierings:** AM ist nach wie vor mit großen Risiken verbunden. Große Druckerhersteller reduzieren die Risiken, in dem sie sich z.B. größere Partner suchen (z.B. wurde 2016 *Concept Laser* Teil von *General Electric* erworben). Chancen ergeben sich überall dort, wo AM sich in einer Branche als effiziente Technologie durchsetzen kann, die in Kombination mit anderen Technologien insgesamt zur besten Performance führt – sowohl was Kosten als auch Leistung (über die gesamte Lebensdauer eines Bauteils) betrifft.

### 3.4 Vor- und Nachteile

Die Additive Fertigung bietet zahlreiche Vorteile, aber sie ist auch mit einigen Herausforderungen und Nachteilen verbunden. Eine sorgfältige Abwägung und Analyse dieser Aspekte sind entscheidend, um den AM-Prozess effektiv und zielgerichtet einzusetzen.

### Vorteile der Additiven Fertigung

**Designfreiheit:** AM ermöglicht nahezu grenzenlose Designfreiheit, was die Herstellung von Formen und Geometrien ermöglicht, die mit konventionellen Verfahren nicht realisierbar sind (vgl. etwa Abb. 15).

**Materialeffizienz:** Im Gegensatz zu abtragenden Verfahren, bei welchen immer Materialabfall entsteht, wird bei AM Material nur dort appliziert, wo es benötigt wird.

**Individualisierung und Design-Flexibilität:** Die Anpassung von Designs bringt keine zusätzlichen Kosten mit sich, im Gegensatz zu konventionellen Methoden, die im Falle von beispielsweise Gussverfahren teure Formänderungen erfordern.

**Dezentrale und flexible Lieferketten:** Minimierung von Transportwegen werden ermöglicht, was die Agilität in den Lieferketten fördert. Die Produktion ist weniger an Standorte gebunden, was die Lieferketten weniger anfällig für externe Störfaktoren, wie geopolitische Entwicklungen, macht.

**Nachhaltigkeit:** Der AM-Prozess kann nachhaltige Produkte produzieren. Die Materialeffizienz ist hoch, Transportwege können minimiert werden und Bauteile können je nach Anwendung im Lebenszyklus erhebliche Energieeinsparungen realisieren.

### Nachteile der Additiven Fertigung

**Hoher Energieverbrauch:** Insbesondere im Metall-3D-Druck ist der Energieverbrauch des Prozesses hoch. Die Einsparungen müssen daher im Lebenszyklus der hergestellten Produkte realisiert werden.

**Langsamer Durchsatz:** 3D-Druck kann in spezifischen Fällen langsamer sein als konventionelle Fertigungsprozesse, auch aufgrund vereinzelt manueller Prozessschritte. Dies ist abhängig von verschiedenen Faktoren, wie der Größe und Komplexität des Objekts oder der eingesetzten Materialien bzw. Drucktechnologie.

**Hohe Investitionskosten:** Je nach spezifischem Prozess und Bauvolumen sind die anfänglichen Investitionskosten hoch. Metall-AM-Maschinen können von einigen Hunderttausend bis zu mehreren Millionen Euro kosten.

**Qualitäts- und Zertifizierungshürden:** Die Prozesse und Materialien in der AM sind noch wenig durch branchenweit akzeptierte Richtlinien genormt und zertifiziert, was zurzeit noch eine große Hürde für den breiten Einsatz von AM in der Industrie darstellt.

---

Abb. 15: „Gyroid“ als Beispiel für eine nur mit 3D-Druck realisierbare geometrische Form



---

Quelle: i.materialise (2024, Gyroid)

## 4 Einflussfaktoren

In der Welt des 3D-Drucks spielen diverse Einflussfaktoren eine relevante Rolle, die nicht nur die Herstellungsprozesse, sondern auch das gesamte Umfeld der Technologie prägen und entscheidend zur weiteren Entwicklung beitragen.

### 4.1 Technologischer Fortschritt und Kostenreduktion

Der technologische Fortschritt, die Industrialisierung bei der Herstellung der 3D-Drucker und die dadurch oftmals miteinhergehende Kostenreduktion repräsentieren wichtige Aspekte der Entwicklung und Etablierung von Technologien, ebenso im Fall der Additiven Fertigung.

#### 4.1.1 Kontinuierliche technologische Verbesserungen

Die AM-Technologie hat sich kontinuierlich weiterentwickelt und etabliert sich als zuverlässige Technologie in der Fertigungsindustrie. Der **Fortschritt** in diesem Sektor manifestiert sich in vielfältigen Aspekten, etwa durch **erhöhte Präzision**, **Materialvielfalt** und **Druckgeschwindigkeit**.

In den letzten Jahren sind Kinematiksysteme, die für höhere Geschwindigkeiten ausgelegt sind, wie das *Core-XY-System* (ein riemengetriebenes und daher sehr schnelles Achsenverfahrssystem), sogar im Bereich der erschwinglichen Desktop-3D-Drucker immer beliebter geworden. Gleichzeitig werden ausgeklügelte Algorithmen, die durch die Kompensation von Trägheit und Schwingungen der Maschine ein verbessertes Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Wiederholgenauigkeit ermöglichen, immer präsenter. Durch spezifische Forschungs- und Entwicklungsverfahren haben sich die additiven Verfahren zu **hochmodernen, multifunktionalen Produktionsmethoden** entwickelt.

#### 4.1.2 Preisentwicklung der AM-Maschinen

Technologische Fortschritte führen oftmals zu **Preissenkungen**. Dies kann auch für die AM-Technologie beobachtet werden. Dieser Trend spiegelt sich deutlich in den Daten von *Wohlers Associates* wider, einem anerkannten Marktforschungsunternehmen für Additive Fertigung.<sup>49</sup> Die graphische Darstellung verdeutlicht, wie die Preise für 3D-Drucker, sowohl für Desktop- als auch für industrielle Modelle, bis 2010 kontinuierlich rückläufig waren. Der steile Anstieg ab 2010 lässt sich darauf zurückführen, dass im Bereich Metall-3D-Druck mehr industrielle Geräte auf den Markt kamen. Die Kosten für solche Drucker übersteigen die eines Kunststoff-Druckers für den Privatgebrauch teils um das 10-fache. Seit 2020 sind die Preise wieder rückläufig (vgl. Abb. 16). Dieser Trend zur Preissenkung ist auch in den folgenden Jahren zu erwarten, was die Technologie für neue Anwenderkreise öffnet.



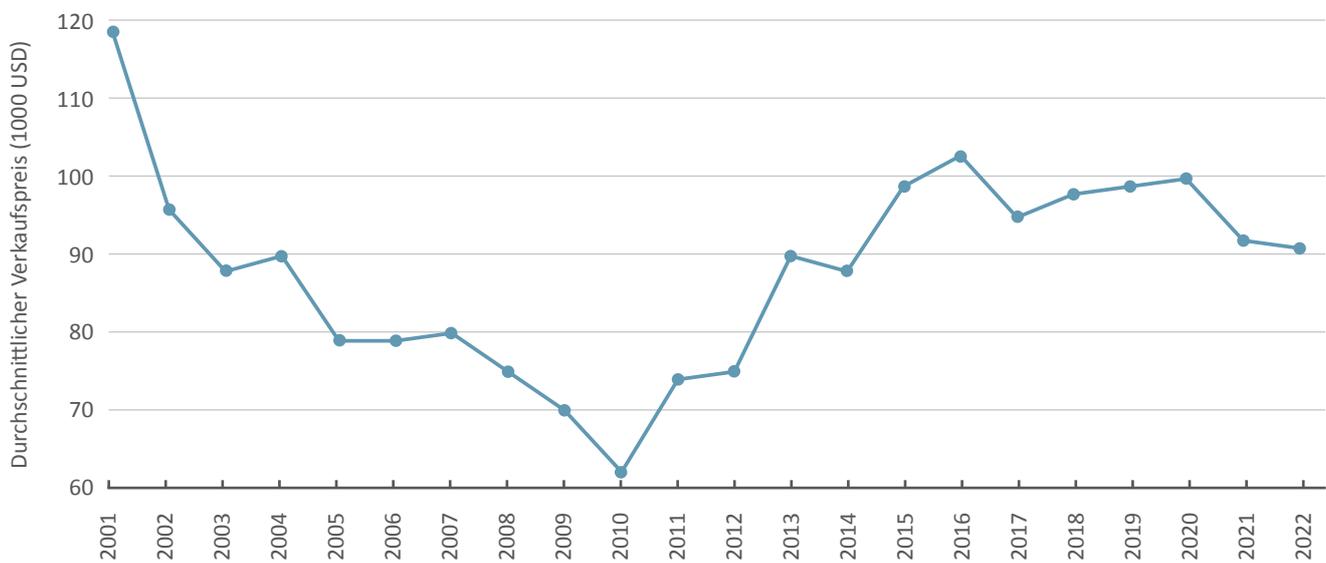
*Treiber sind u.a. die Digitalisierung, Fortschritte in der Qualitätssicherung und günstigere Drucker (welche im Metalldruck z.B. mit Fortschritten in der Lasertechnologie verbunden sind).*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter  
Industriesektoren *Swissmem*



Es handelt sich beim *Achsenverfahrssystem* um ein System, das die Bewegung entlang verschiedener Achsen ermöglicht. In der Additiven Fertigung kann ein Achsenverfahrssystem beispielsweise dazu dienen, den 3D-Druckkopf präzise entlang der X-, Y- und Z-Achsen zu bewegen.

Abb. 16: Preisentwicklung von Systemen der Additiven Fertigung



Quelle: cross-ING, 2024; eigene Darstellung; Daten von Campbell et al. (2023, AM)

#### 4.1.3 Innovation durch „Neue Technologien“

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der aktuellen Entwicklungen in der Additiven Fertigung ist die Einführung **neuer Technologien**. Von KI-gesteuerten Algorithmen bis hin zu innovativen Druckverfahren bahnen diese Fortschritte den Weg für eine vielversprechende Zukunft. Diese Technologien versprechen nicht nur eine Steigerung der Druckqualität, sondern auch **kürzere Prozesszeiten** und damit verbunden eine **bessere Kosteneffizienz** in der Herstellung komplexer Produkte.

## 4.2 Werkstoffinnovationen

Neben dem Prozess an sich gibt es auch stetige Weiterentwicklung im Bereich der Werkstoffe, sowohl in der Diversität als auch in der Qualität. Diese Innovationen sind von entscheidender Bedeutung für die Erweiterung der Anwendungsbereiche und die Effizienzsteigerung der AM-Verfahren.

### 4.2.1 Verbesserte Werkstoffe

Die kontinuierliche Forschung und Entwicklung in der Additiven Fertigung haben zur Verbesserung von bestehenden Werkstoffen geführt, die aufgrund ihrer **optimierten Druckbarkeit** und guten mechanischen oder thermischen Eigenschaften für High-End-Anwendungen eingesetzt werden können. Diese Entwicklungen führten in der Vergangenheit etwa zu Zulassungen für den Einsatz von AM in der Medizintechnik, einem der großen Meilensteine der Technologie. Dies ermöglicht etwa die Herstellung von gedruckten Schädelplatten<sup>50</sup> und anderen **speziellen Implantaten**, die selbst für komplizierte medizinische Eingriffe maßgeschneiderte Lösungen bieten.

### 4.2.2 Neuartige Werkstoffe

Die Integration von Metalllegierungen in die AM-Technologie ist ein weiterer signifikanter Schritt. So haben etwa Kupferlegierungen aufgrund ihrer ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit und elektrischen Eigenschaften ein großes Potential in

verschiedensten Anwendungen. Ihre hohe Reflektivität stellte sich bis vor kurzem noch als große Herausforderung dar, um diese in additiven Prozessen wie *Laser Powder Bed Fusion (LPBF)* einzusetzen; jedoch konnte durch Entwicklungen auf Werkstoff- und Prozessseite auch diese Hürde überwunden werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der Elektronik- und Energietechnik sowie in der Luft- und Raumfahrt.

#### 4.2.3 Multi-Material-Druck

Die Fähigkeit zum Multi-Material-Druck ist ein Schlüssel zur Schaffung komplexer Baugruppen und Komponenten. Die Kombination von Metallen wie Kupfer und Stahl ermöglicht bspw. die Herstellung von Wärmetauschern und Reaktoren mit verbesserter Effizienz und Leistungsfähigkeit.<sup>51</sup>

#### 4.2.4 Keramik

Ein weiterer spannender Aspekt der Werkstoffinnovation in der Additiven Fertigung ist die Integration von **Keramikmaterialien**. Diese finden dank ihrer Biokompatibilität und Ähnlichkeit zu Knochenmaterial vielseitige Verwendung in der Medizintechnik, etwa als Knochenimplantate und Zahnprothesen. Weitere anspruchsvolle Anwendungen umfassen Hochtemperaturumgebungen und verschleißfeste Bauteile, weshalb sie etwa als hochleistungsfähige Bremscheiben für Fahrzeuge eingesetzt werden können.<sup>52</sup> Die Additive Fertigung mit Keramiken hat große Entwicklungssprünge hinter sich und erweitert immer mehr den Horizont der Anwendungsgebiete.

#### 4.2.5 Spezielle Anwendungen

Der Einsatz organischer Materialien in der Wissenschaft und Medizin eröffnet ein vielfältiges Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten, die von tierversuchsfreien Testmethoden über Arzneimittel-Screening bis zu regenerativer Medizin reichen.

► **Innerhalb dieses Bereichs zeichnet sich der Organdruck als eines der einflussreichsten und vielversprechendsten Forschungsfelder der Zukunft ab.**

Die Entwicklung und Verbesserung von Biomaterialien bilden die Grundlage für diese innovative Richtung. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Erforschung von Materialien, die aus menschlichem Gewebe hergestellt werden. Im Gegensatz zu den momentan noch hauptsächlich eingesetzten Bio-Materialien auf tierischer Basis verspricht etwa die Verwendung von menschlichem Plazentagewebe eine bessere Eignung für zukünftige medizinische Anwendungen wie Organdruck. Die noch geringe Bioaktivität und Druckleistung muss aber erst überwunden werden.<sup>53</sup> Andere spannende Anwendungen fokussieren sich auf die effiziente Wasserfiltration. Dabei können additiv gefertigte Filterstrukturen aus organischem Material zur Entfernung von Verunreinigungen in Wasserressourcen eingesetzt werden.<sup>54</sup>

► Vor allem hier ist die **Werkstoffentwicklung ein wichtiger Treiber der Additiven Fertigung**, wodurch sich völlig neue Einsatzmöglichkeiten und Verfahren mit erhöhter Effizienz eröffnen.

### 4.3 Industrialisierung

Die Additive Fertigung durchläuft aktuell eine Phase, in der sie zunehmend Einzug in verschiedene Industriebereiche hält. Die fortschreitende Integration in die industrielle Landschaft ist offensichtlich und führt zu oftmals sehr markanten Veränderungen in der Prozesskette.

#### 4.3.1 Anfänge im Rapid Prototyping und der Medizintechnik

In der industriellen Anwendung markierte das *Rapid Prototyping* den ersten weitreichenden Einsatz der 3D-Drucktechnologie. Dies ermöglichte die schnelle und kosteneffiziente Herstellung von anschaulichen und funktionalen Mustern sowie Prototypen in der Produktentwicklung. Diese bahnbrechende Innovation leitete eine Ära weiterer industrieller Anwendungen

ein, insbesondere im Bereich der Medizintechnik. Hier ermöglichte die Technologie die Fertigung von maßgeschneiderten Implantaten<sup>55</sup> und Prothesen. Diese Anwendungen waren wichtige Meilensteine und zeigen das Potential für personalisierte und hochpräzise Lösungen auf.

#### 4.3.2 Erweiterung auf Konsumgüter

Speziell in den letzten fünf Jahren haben additiv gefertigte Produkte immer stärkeren Einzug in den Konsumgütermarkt gefunden. Produkte wie Schuhe<sup>56</sup>, Kopfhörer<sup>57</sup> oder Fahrradzubehör werden vielfach mit AM-Technologie hergestellt. Diese Entwicklung signalisiert den Beginn einer breiteren Akzeptanz in der Massenproduktion, und damit eine **neue und entscheidende Phase** für 3D-Druck.

#### 4.3.3 Ganzheitliche AM-Prozessketten

Die Integration in Industrieanwendungen erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette. Dazu gehört die Entwicklung von speziellen Design-Tools, welche die Schaffung von AM-optimierten Produkten erleichtern und Arbeitsschritte in der Design-Phase automatisieren. Die Integration von Automatisierung in den Produktionsprozess spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, wobei *Printer Farms*<sup>58</sup> und Robotik zur Steigerung der Effizienz und zur Minimierung des menschlichen Eingriffs beitragen.

#### 4.3.4 Hybrider Ansatz und Verbindung mit konventionellen Prozessen

Der Markt zeigt auf, dass die komplette Ablösung von konventionellen Fertigungsprozessen weniger vielversprechend scheint als ein **hybrider Ansatz**, wobei sich konventionelle Prozesse und AM Prozesse gegenseitig ergänzen und vervollständigen.<sup>59</sup> Dieser Ansatz erweitert die Anwendungsbereiche von AM und steigert die Effizienz der einzelnen Prozesse. Dies ermöglicht eine **optimierte Fertigung von komplexen Baugruppen**, die aus einer Mischung von additiv gefertigten und herkömmlich hergestellten Teilen bestehen.

### 4.4 Weltpolitische Lage

Die Additive Fertigung steht vor einer Reihe von Herausforderungen und Chancen, die durch unsichere Zeiten geprägt sind. Von globalen Ereignissen wie der CoViD-19-Pandemie bis hin zu geopolitischen Konflikten wie dem Ukraine-Konflikt beeinflussen externe Faktoren die Fertigungslandschaft in bemerkenswerter Weise.

#### 4.4.1 Unsichere Zeiten und Störungen in Lieferketten

In Zeiten globaler Unsicherheit sind Störungen in den Lieferketten zu einem akuten Risiko geworden. Diese Ereignisse haben die Abhängigkeit von globalen Produktions- und Lieferstandorten verdeutlicht und die Notwendigkeit von Lösungen zur Risikominimierung aufgezeigt.

#### 4.4.2 Abhängigkeit von Produktionsstandort China und das „Reshoring“-Phänomen

Die herausfordernde Situation hat die bestehende Abhängigkeit von Produktionsstandorten in China ins Rampenlicht gerückt. Das Konzept des „Reshoring“ gewinnt an Bedeutung, da es sich auf die Verlagerung von Produktionskapazitäten näher an die Verbrauchermärkte konzentriert.<sup>60</sup> Dies bietet einige Vorteile, darunter die Verkürzung der Transportwege und deshalb auch kürzere Lieferzeiten und Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes der Güter, die Minimierung von Lagerauslastung und die Berücksichtigung steigender „Made in“-Präferenzen des Marktes (Sensibilisierung für den Produktionsstandort der Produkte).

### Beispiel: Medizinprodukte während der CoViD-19-Pandemie

Die CoViD-19-Pandemie führte zu akuten Lieferengpässen bei medizinischen Hilfsmitteln wie Gesichtsschutz-Visieren. Dies verdeutlichte die Dringlichkeit dezentralisierter und lokaler Produktionsmöglichkeiten. Die Desktop-3D-Druck-Community trug zur Bewältigung dieser Herausforderungen bei, indem sie den Desktop-3D-Druck zur Herstellung von dringend benötigten medizinischen Versorgungsmaterialien einsetzte.

Abb. 17: Gedruckter Gesichtsschutz-Visor



Quelle: Prusa 3D (2020, Schutz)

Infolgedessen erleben wir eine Bewegung in Richtung dezentralisierter und lokaler Produktion, die auf die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von AM-Technologien setzt. Die Unsicherheiten unserer Zeit fordern innovative Lösungsansätze und verdeutlichen die Bedeutung von resilienten Fertigungsstrategien.

## 4.5 Design, Komplexität, Personalisierung

Die Additive Fertigung zeigt speziell in der Medizintechnik und bei thermischen Prozessen großes Potential, da sie sowohl die Personalisierung von Produkten als auch die Realisierung komplexer Designs ermöglicht.

### 4.5.1 Medizintechnik: Personalisierte Produkte für höhere Erfolgsraten

AM hat in der Medizintechnik einen Paradigmenwechsel ermöglicht, indem personalisierte Produkte wie Implantate und Prothesen nun kosteneffizient realisiert werden können. Diese Personalisierung erhöht die Erfolgsraten von medizinischen Eingriffen erheblich, da die Produkte speziell auf die individuellen Bedürfnisse und Anforderungen des Patienten zugeschnitten sind. Ein Beispiel ist die **Osseointegration**, die Integration eines Zahnimplantats in den umgebenden Knochen.<sup>61</sup>

- ▶ AM ermöglicht hier neben einer auf den Patienten zugeschnittenen Geometrie auch das Einbringen von knochenähnlichen Oberflächen und Strukturen, wodurch das Implantat nicht nur besser vom Knochen angenommen wird, sondern auch die mechanischen Eigenschaften an den Knochen angepasst werden können.-

#### 4.5.2 Thermische Prozesse: Effizienz durch Designkomplexität

Im Bereich der thermischen Prozesse zeigt sich die Fähigkeit von AM, die Effizienz von Systemen durch die **Schaffung komplexer Designs** zu verbessern. Beispielsweise ermöglichen Gitterstrukturen und vollumfängliche geometrische Gestaltung von Fluidführungen, die mithilfe von AM hergestellt werden, die Optimierung von Wärmeübergängen in verschiedenen Anwendungen, darunter die von Wärmetauschern. Dies trägt zur Effizienzsteigerung von Reaktoren in der Chemie- oder Energieindustrie bei, etwa bei der Erzeugung von nachhaltigen künstlichen Brennstoffen.<sup>62</sup>

### 4.6 Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft

Die Additive Fertigung hat nicht nur die Art und Weise verändert, wie Produkte hergestellt werden, sondern trägt auch dazu bei, bessere und nachhaltigere Produkte zu entwickeln.

#### 4.6.1 Bessere Produkte durch AM: Effizienz und Leichtbau

Dank größerer Gestaltungsfreiheit ermöglicht AM die Herstellung von Produkten mit erhöhter Effizienz und Leichtbau, was zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs über die gesamte Lebensdauer führt. In der Mobilitätsbranche hat der 3D-Druck zu leichteren Fahrzeugkomponenten geführt, was wiederum den Kraftstoffverbrauch reduziert. Dies trägt nicht nur zur Nachhaltigkeit bei, sondern führt auch zu Kosteneinsparungen für die Verbraucher. Mit optimierter Thermodynamik können auch chemische oder thermische Prozesse durch AM effizienter gestaltet werden.

#### 4.6.2 Recycling von Druckabfällen

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Recycling von Abfällen, die bei AM-Prozessen entstehen. Im Metallbereich ermöglicht das Recycling von Metallpulver die Wiederverwendung und Reduzierung von Abfällen. Im Kunststoffbereich wird das Recycling von Kunststoffabfällen in neues Filament, wie beispielsweise PET-Recycling, immer bedeutsamer. Somit können Ressourcen geschont werden.

Die Additive Fertigung trägt außerdem dazu bei, bessere Produkte zu entwickeln, die während ihrer gesamten Lebensdauer effizienter und nachhaltiger sind. Gleichzeitig ermöglicht das Recycling von Druckabfällen die **Schaffung eines geschlossenen Kreislaufsystems**, das zur Ressourcenschonung beiträgt und die Umweltauswirkungen reduziert. Dies unterstreicht das Potential von AM, nicht nur die Produktqualität zu steigern, sondern auch einen positiven Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten.



*Der minimale Verbrauch der Ressourcen wird ein Treiber in der Additiven Fertigung sein.  
Die unmittelbare Wiederverwendbarkeit des nicht verbauten Materials ist ein  
wesentlicher Faktor.*

Martin Hofer, Gründer und Mitinhaber der Feramic AG



## 5 In die Zukunft gedruckt: Aussichten der Additiven Fertigung

Die Additive Fertigung steht vor wichtigen Entwicklungs- und Innovationsschüben, die von verschiedenen Faktoren abhängen.

- ▶ Die entscheidenden Stellschrauben für die weitere Entwicklung des 3D-Drucks umfassen die Innovation von **Materialien**, die Optimierung der **Produktivität** durch Automatisierung von manuellen Prozessschritten (unterstützt durch spezifische Software) sowie die Steigerung von **Druckgeschwindigkeiten**.
- ▶ Hinzu kommt der verstärkte Einsatz von **Künstlicher Intelligenz** (KI) als neuer Komponente zur Optimierung von Prozess- und Gestaltungselementen beim Einsatz von AM.

Daneben spielen **Kosteneffizienz, Nachhaltigkeit und regulatorische Anpassungen** eine bedeutende Rolle, wobei Fortschritte in diesen Bereichen den 3D-Druck zunehmend vielseitiger, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher gestalten. Immer mehr Unternehmen investieren in die Entwicklung nachhaltiger Materialien und umweltfreundlicher Produktionsprozesse, was dazu beiträgt, dass negative ökologische Auswirkungen prozessseitig minimiert werden.

- Ein Beispiel für die Schlüsselrolle von Materialinnovationen ist die Einführung von **Hochleistungsverbundwerkstoffen**, um den Anwendungsbereich zu erweitern und verschiedene Anforderungen hinsichtlich **Festigkeit, Flexibilität und Hitzebeständigkeit** besser zu erfüllen.
- Fortschritte in der **Bioprinting-Technologie** könnte die **Herstellung von Gewebe und Organen** ermöglichen – revolutionäre Durchbrüche in der Medizin und Gesundheitsversorgung.
- Softwareentwicklungen führen auf Prozessseite zu **maximierter Druckgeschwindigkeit**, Effizienz und Zuverlässigkeit. Auf Gestaltungsseite können nie zuvor dagewesene komplexe Geometrien erstellt werden, oftmals organischer Natur und unterstützt durch Simulation und immer mehr durch KI. **Denn die Zukunft der 3D-Drucktechnologie wird maßgeblich von innovativer Software beeinflusst.**
  - ▶ Diese Software optimiert Designprozesse, maximiert den effizienten Einsatz von Materialien, generiert komplexe Strukturen, ermöglicht automatisierte Druckvorgänge und fördert den nahtlosen Austausch digitaler 3D-Modelle.
  - ▶ Fortschrittliche Softwarelösungen integrieren KI und Maschinelles Lernen, um die Effizienz zu steigern, Materialsimulationen durchzuführen und die 3D-Drucktechnologie kontinuierlich in Richtung einer vielseitigeren, nachhaltigeren und leichter zugänglichen Zukunft zu entwickeln.



*Neben anderen Qualitätsmaßstäben der hergestellten Bauteile und der relativen kleinen Produktivität der Prozesse verhindern derzeit vor allem noch die hohen Anlagenkosten den Einstieg in die professionelle additive Fertigung für viele Firmen und Anwender. Dies, obwohl AM-Technologien verfügbar wären, welche in gewissen Fällen durchaus in Konkurrenz zum Spritzgießen betrachtet werden können.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter  
Industriesektoren *Swissmem*



*Eine große Rolle wird die Künstliche Intelligenz (KI) spielen: Die Integration von KI in der Designphase, wie auch in der Prozessüberwachung und -steuerung sowie im Qualitätsmanagement.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter  
Industriesektoren *Swissmem*



Die Entwicklung und Anpassung von Regulierungen im Zusammenhang mit 3D-Drucktechnologien wird den Einsatz in verschiedenen Industrien beeinflussen. Da die Technologie weiter voranschreitet, ist zu erwarten, dass auch die regulatorische Landschaft im 3D-Druckbereich sich weiterentwickeln wird. Allgemeine Überlegungen beinhalten die Entwicklung von Standards und Vorschriften für Sicherheit, medizinische Anwendungen (insbesondere im Bereich des Bioprinting), geistiges Eigentum und Verbraucherschutz. Die Regulierungsbehörden stehen vor der Herausforderung, Schutzstandards zu etablieren, um Sicherheit, Qualität und Integrität in verschiedenen Anwendungsbereichen zu gewährleisten.



*Die Skalierung verlangt nach mehr Kapazität. Da die Maschinen immer schneller und größer werden, sehe ich da kein Problem. Die Maschinen laufen problemlos ohne Betreuung im 24/7 Modus.*

Martin Hofer, Gründer und Mitinhaber der *Feramic AG*



### **3D-Druck Industrie aktuell in entscheidender Phase:**

*„What Will the 3D Printing Industry Look Like in Ten Years?“*

Die Grundthese der vorliegenden Analyse lautet, dass die 3D-Druck-Technologie derzeit an einem **wichtigen Wendepunkt** steht. Diese Einschätzung wird belegt durch aktuelle Fortschritte der eigentlichen Drucktechnologie, neuartige Werkstoffe und Materialien und vielversprechende neue Anwendungsbereiche; hinzu kommt die positive Grundtendenz anderer wichtiger Treiber.<sup>63</sup>

Darüber hinaus deuten aber auch zahlreiche Faktoren innerhalb der 3D-Druckindustrie auf eine deutlich **zunehmende Dynamik**. Experten gehen davon aus, dass sich das Profil der 3D-Druckindustrie in den nächsten Jahren erheblich verändern wird. Dahinter stehen Marktkräfte, die sowohl eine fortschreitende **Konsolidierung** als auch zunehmende Bemühungen zur höheren **Skalierung** bewirken. Denn:

- ▶ Erst der Übergang der relativ zersplitterten Branche zu größeren industriellen Einheiten sowie die Transformation der Prozesse in breit anwendbare – also hoch skalierte – Fertigungsprozesse ermöglichen signifikante Zuwächse für die 3D-Druck-Technologie.<sup>64</sup>

Vor diesem Hintergrund zeichnen Branchenkenner das Bild eines sehr **grundlegenden Wandels**, der die Bedeutung heutiger 3D-Druck-Verfahren auf ein **völlig neues Niveau** heben könnte. Diesen Punkt bestätigt – vor der Ausgangsfrage *„What Will the 3D Printing Industry Look Like in Ten Years?“* – sehr klar der langjährige Brancheninsider *John Kawola* (2023):

- ▶ *„Consolidation, innovation and the drive toward production-ready additive manufacturing could bring **another order-of-magnitude change** in the industry over the next decade.“<sup>65</sup>*

Zentraler Treiber für die absehbare Dynamik der 3D-Druck-Technologie bleibt vorerst, neben dem Aspekt verstärkter industrieller Konsolidierung und Skalierung, vor allem die **Entwicklung neuer und aussichtsreicher Anwendungsgebiete**.

- ▶ In jüngerer Zeit hat sich hier bereits eine Vielzahl sehr innovativer Konzepte und Einsatzmöglichkeiten entwickelt, die sich in näherer Zukunft als wegweisend zeigen könnten – trotz oftmals noch begrenzter Verfügbarkeit und Beschränkung auf Nischenanwendungen.

### Vielversprechende Anwendungsgebiete

Die Additive Fertigung ist auf dem Weg, insbesondere in der Raumfahrt und Medizin, bahnbrechende Fortschritte zu erzielen. Obwohl diese Entwicklungen durchaus spektakuläre Möglichkeiten eröffnen, sind dabei noch einige Herausforderungen zu bewältigen.

#### Drucken im Orbit und für den urbanen Luftverkehr

Die Raumfahrtindustrie befasst sich seit den letzten Jahren intensiv mit dem 3D-Druck im All, sowohl für den Druck von Strukturbauteilen der Raumstationen als auch den Druck von organischen Materialien. Ersteres hat den Vorteil, dass Strukturen im offenen Weltraum direkt vor Ort hergestellt werden können, anstatt sperrige Teile von der Erde aus in den Weltraum transportieren zu müssen. Ein Beispiel ist die Produktion von Solarpaneelen im Weltraum.<sup>66</sup>

Zusätzliches Potential besteht durch zunehmendes Drohnenaufkommen. Die sogenannte „Urban Air Mobility“ (UAM) bezeichnet die Erweiterung des städtischen Nahverkehrs in die dritte Dimension. In naher Zukunft sollen VTOL-Luftfahrzeuge (VTOL: *Vertical Take Off and Landing* – Kleinflugzeuge bzw. Drohnen, welche vertikal starten und landen können) als emissionsärmere und schnellere Alternative für den urbanen Personenverkehr zum Einsatz kommen.

Hier geht es zum  
Cognitive Comment  
„Urban Air Mobility –  
Flugdrohnen als  
Transportmittel der  
Zukunft“ (2021):



Prognosen zufolge sollen im Jahr 2035 bereits 23'000 VTOL's weltweit in den Städten für Menschen- und Warentransport eingesetzt werden und der Transportmarkt mit Passagierdrohnen ein Volumen von 21 bis 31 Milliarden USD erreichen.<sup>67</sup>

- ▶ Die Hersteller von Kleinflugzeugen setzen zunehmend auf 3D-Druck, da durch die hohen geometrischen Freiheiten sehr leichte und stabile Bauteile gefertigt werden können und die Produktionsmengen in diesem Bereich gering sind.<sup>68</sup>

#### 3D-Druck von menschlichem Gewebe und Organen: Medizinische Durchbrüche

Der 3D-Druck von menschlichem Gewebe und Organen verspricht revolutionäre Fortschritte in der Medizin. Die Realisierung des Organdrucks wird immer realistischer, wobei Gewebematerialien, mittlerweile auch humanbasierte Materialien, verwendet werden<sup>69</sup>. Für den Organdruck braucht es Biomaterialien, welche aus Trägermedium und darin gelöste Zellen bestehen und einer Matrix, welche diese in Form hält. Materialien und Matrix sind bereits verfügbar; Nanocellulose bietet eine gute Matrix für den Biodruck. Dies zeigen Forscher durch Druck einer menschlichen Ohrmuschel.<sup>70</sup> An der *Universität Tel Aviv* wurde sogar ein Herz mit eigener Blutversorgung repliziert, mittels unprogrammierter Stammzellen aus patienteneigenem Fettgewebe. Dieses ist zwar nur so groß wie eine Kirsche und kann auch nicht schlagen, jedoch zeigt es das immense Zukunftspotential. Herausforderungen bestehen vor allem darin, die komplexe Struktur der Organe zu verstehen und diese in Form von feinen Blutgefäßen und verschiedenen Zelltypen nachzubilden.<sup>71</sup>

- ▶ Die Schwerelosigkeit im Weltraum bietet besondere Vorteile für den Druck von Organen mit komplexen Hohlstrukturen, da Strukturen aus den geleeartigen organischen Materialien unter Schwerkraft schnell in sich zusammenfallen. Konkret wurde bereits ein Stück menschlicher Meniskus in der *3D-BioFabrication Facility* auf der *ISS* hergestellt.<sup>72</sup>

Auch Soft-Roboter, die im Körper eingesetzt werden und dort lokal schneiden, spülen und sogar Gewebe drucken können, eröffnen neue Möglichkeiten für minimalinvasive Chirurgie.<sup>73</sup>

### 3D-Druck von Medikamenten: Personalisierte Gesundheitslösungen

Der 3D-Druck von Medikamenten ermöglicht personalisierte Lösungen, bei denen die Dosierung auf den einzelnen Patienten abgestimmt werden kann. Ebenfalls kann auch die Herstellung mehrerer Medikamente in einer einzigen Pille realisiert werden, was die Arzneimittelverabreichung vereinfacht. Techniken wie *Selective Laser Sintering (SLS)* mit Medikamentenzusatz eröffnen neue Möglichkeiten.<sup>74</sup>

- ▶ Ebenso ist der **zellbasierte 3D-Druck von Krebsmedikamenten** ein vielversprechender Ansatz, der die Effizienz der Behandlung verbessern kann.<sup>75</sup>

Zu den spannendsten Themen im 3D-Druck-Universum zählt aktuell auch dessen Weiterentwicklung zum völlig neuartigen Konzept des **4D-Drucks**:

- ▶ Als **4D-Druck** wird das Prinzip bezeichnet, wonach Werkstücke, die zunächst durch 3D-Druck erzeugt wurden, im späteren Verlauf ihre Form oder andere Eigenschaften verändern:
- ▶ „4D-Druck ist der Prozess, durch den sich ein 3D-gedrucktes Objekt unter dem Einfluss von externer Energiezufuhr wie Temperatur, Licht oder anderen Umweltreizen in eine andere Struktur verwandelt.“<sup>76</sup>

Diese Technologie, die ursprünglich aus dem *MIT Self-Assembly Lab* stammt, ermöglicht es, dass sich 3D-gedruckte Objekte unter Einfluss externer Energiezufuhr in eine andere Struktur verwandeln können. Im Wesentlichen fügt der 4D-Druck dem traditionellen 3D-Druck eine **vierte Dimension** hinzu: die Zeit.



Zugriff auf ein Video zum „4D-Druck“ über **diesen LINK** oder den nebenstehenden QR-Code.

Sehr vereinfacht ausgedrückt handelt es sich also beim 4D-Druck „... um einen 3D-Druck, **der sich im Laufe der Zeit verändert**.“<sup>77</sup>

Die wichtigsten Grundeigenschaften und daraus resultierende Vorteile des 4D-Drucks im Vergleich zum traditionellen 3D-Druck beschreibt die nachfolgende Klassifikation (vgl. dazu Abb. 18):

- ▶ „Der Unterschied besteht darin, dass die 4D-Drucktechnologie programmierbare und fortschrittliche Materialien verwendet, die durch Zugabe von heißem Wasser, Licht oder Wärme eine andere Funktion erfüllen. Deshalb kann ein nicht-lebendes Objekt seine 3D-Form und sein Verhalten im Laufe der Zeit ändern.“<sup>78</sup>

Die innovative 4D-Druck-Technologie bietet eine Vielzahl von potentiellen Anwendungen, darunter selbstreparierende Rohrleitungssysteme, selbstmontierende Möbel und revolutionäre Entwicklungen in der medizinischen Industrie. Offensichtlich sind im Zeitablauf (sowie durch Zuführung spezifischer Umwelteinflüsse) **veränderbare Materialeigenschaften** sowie das **Prinzip gezielter Strukturveränderung** für eine Vielzahl neuer Anwendungsbereiche äußerst attraktiv (vgl. Abb. 19).

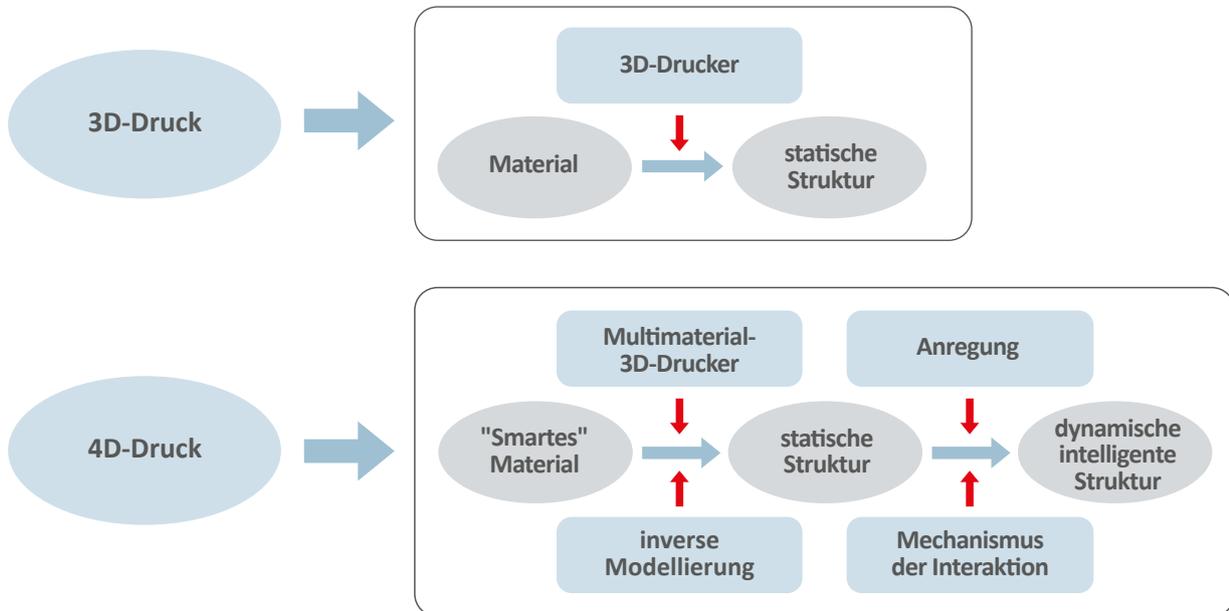
Auch wenn sich die Entwicklung beim 4D-Druck derzeit noch in einem frühen Stadium befindet, sind zukünftig dafür noch zahlreiche **vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten** absehbar – mit möglicherweise sogar **exponentieller Beschleunigung**.

- ▶ In diesem Fall wäre 3D-Druck als Basistechnologie in einer sehr **attraktiven Ausgangslage**, um von einer daraus entstehenden Dynamik unmittelbar zu profitieren.

4D-Druck bezeichnet den Prozess, bei dem ein mittels 3D-Druck hergestelltes Objekt unter dem Einfluss externer Energiezufuhr wie Temperatur, Licht oder anderen Umweltreizen in eine andere Struktur transformiert wird.

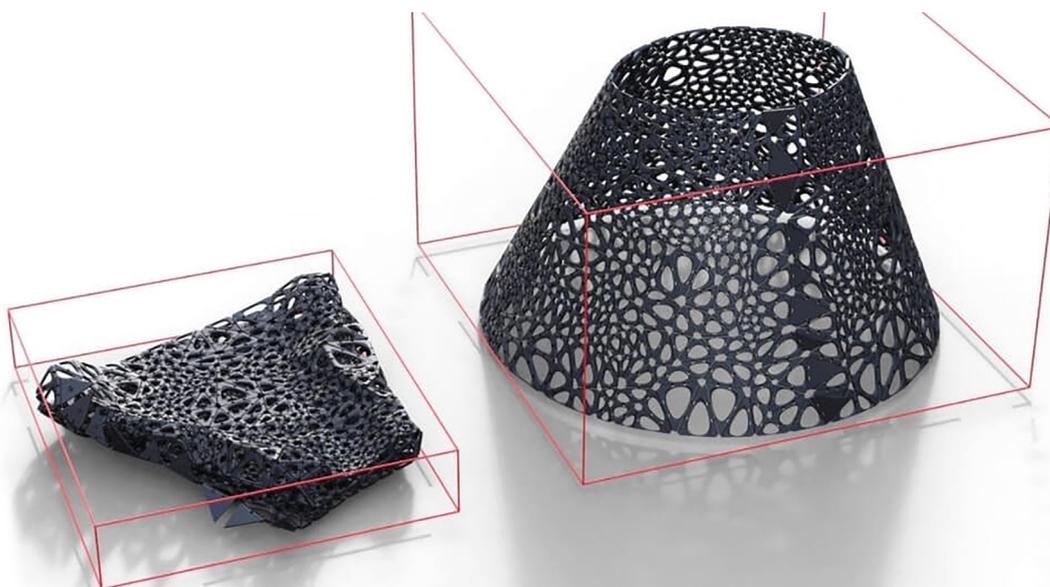
- Insbesondere hier dürften weitere Innovationen bei Werkstoffen und Druckmaterialien, die das 4D-Prinzip gezielt unterstützen, von großer Bedeutung sein.<sup>79</sup>

Abb. 18: 3D- und 4D-Druck im Vergleich



Quelle: Sculpteo (2024, 4D-Druck), basierend auf Momeni et al. (2017, 4D Print)

Abb. 19: Vorteil der rechnerischen Faltung: Volumenreduzierung um 87 % mit zwei Faltungen



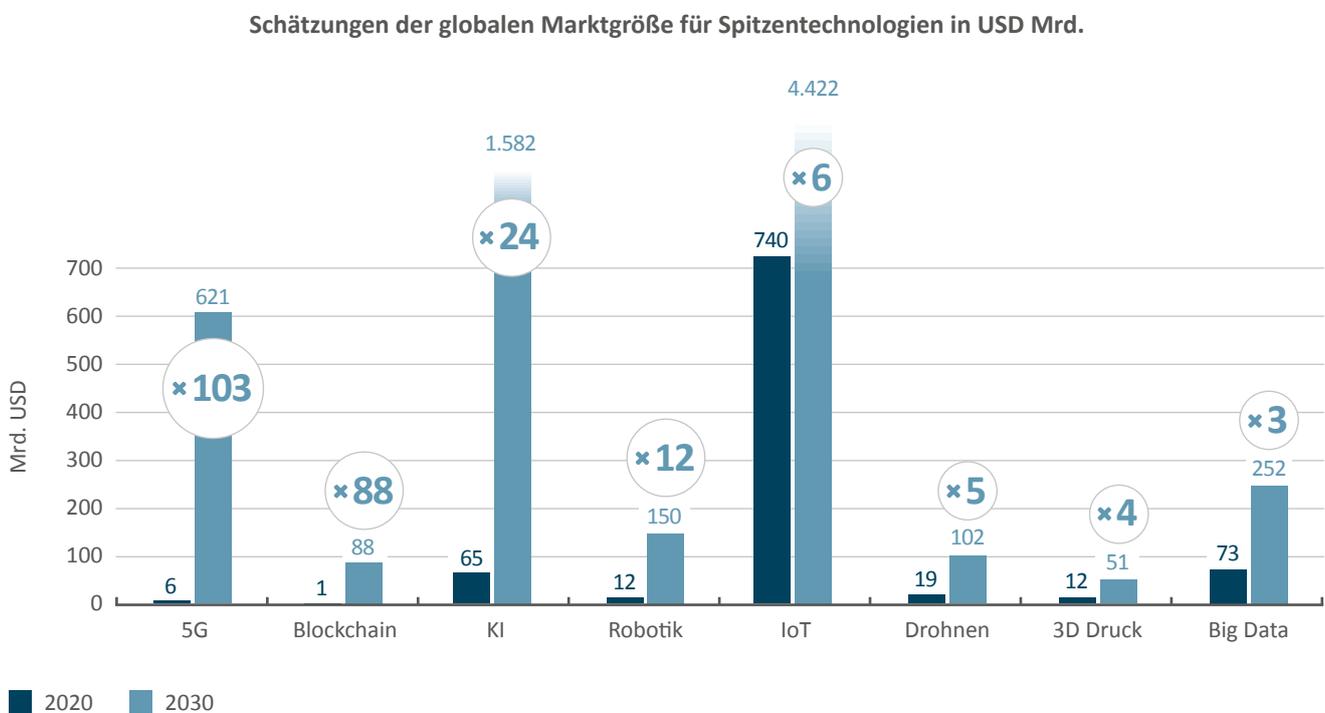
Quelle: Sculpteo (2024, 4D-Druck)

## Fazit

Die Zukunft der 3D-Drucktechnologie ist vielversprechend. Die Additive Fertigung gehört zu den einflussreichsten Zukunftstechnologien und kann Prognosen zufolge bis 2030 einen Marktwert von über 50 Milliarden USD erreichen.<sup>80</sup>

Neben den großen Technologieentwicklungen wie KI (Prognosen sagen eine Entwicklung von 2020 bis 2030 um das 24-fache voraus, von 65 auf 1582 Milliarden USD) und 5G (x103) scheint die Additive Fertigung auf den ersten Blick nur einen kleinen Anteil (x4, von 12 auf 51 Milliarden USD) unter den disruptivsten Technologien auszumachen (vgl. Abb. 20).

Abb. 20: Die disruptivsten Zukunftstechnologien für die nächsten Jahre

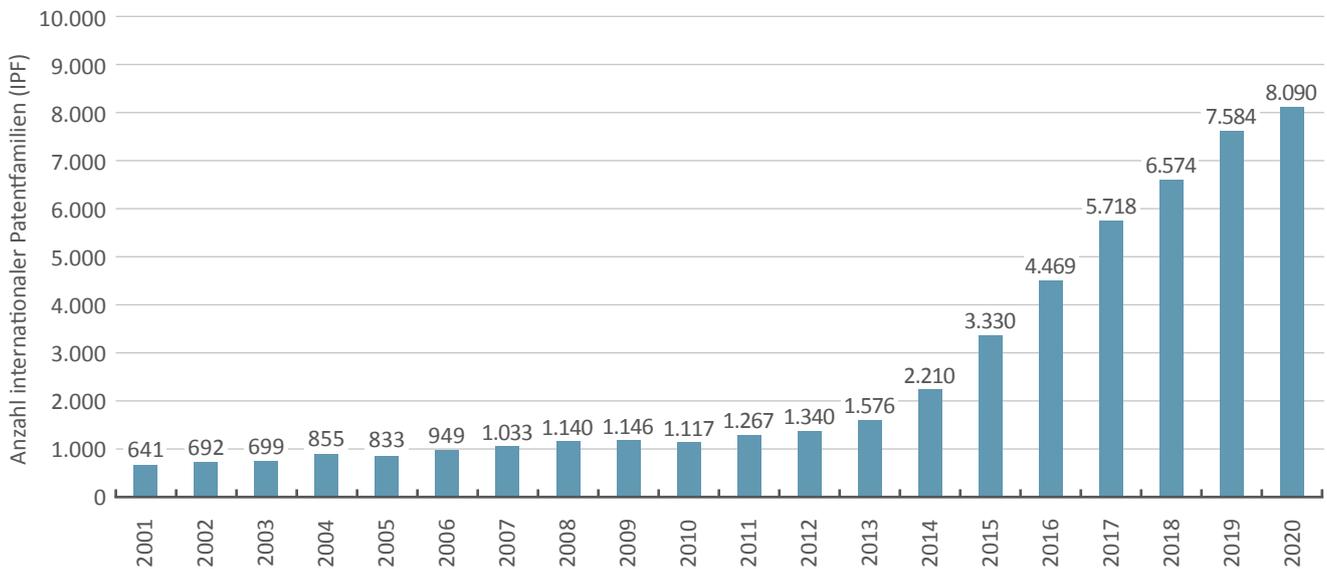


Quelle: Krys (2023, Megatrends)

Jedoch verrät ein Blick auf die Patentanmeldung der vergangenen Jahre ein erhebliches Wachstumspotential: Eine Studie des Europäischen Patentamts von 2023 kommt zu dem Ergebnis, dass „... die internationalen Patentfamilien im Bereich der 3D-Druck-Technologien zwischen 2013 und 2020 mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von 26,3 % zunehmen – fast achtmal schneller als in allen anderen Technologiebereichen zusammen (3,3 %) im gleichen Zeitraum.“<sup>81</sup> (Vgl. dazu Abb. 21).

Die USA führen deutlich im Herkunftsländer-Ranking der Patentfamilien mit einem Anteil von 39,8 %, gefolgt von Europa mit 32,9 %. Obwohl Asien bisher den geringsten Anteil von 20,7 % ausweist, wird dort das stärkste Wachstum erwartet. Insbesondere China und Südkorea haben bereits eine beeindruckende Verbreitung der Technologie erreicht, mit Anteilen von bis zu 80 %. Dadurch zählen sie zu den Ländern mit der umfassendsten Erfahrung in diesem Bereich.<sup>82</sup>

Abb. 21: Entwicklung der Patentierung in 3D-Drucktechnologien



Quelle: Europäisches Patentamt (2023, Patentanmeldungen)

Die Prognosen zum Wachstum von 3D-Drucktechnologien variieren je nach Branche, aber es gibt allgemeine Trends, die auf bestimmte Sektoren zutreffen:

- **Gesundheitswesen:** Es wird erwartet, dass der 3D-Druck im Gesundheitswesen stark wächst, da er personalisierte Implantate, Prothesen, medizinische Modelle und sogar Organe ermöglicht. Die Technologie könnte die Patientenversorgung verbessern und die Effizienz bei der Herstellung medizinischer Geräte erhöhen.
- **Luft- und Raumfahrt:** In der Luft- und Raumfahrtindustrie wird ein beträchtliches Wachstum erwartet, da 3D-Druck komplexe und leichte Bauteile ermöglicht, die den hohen Anforderungen der Flugzeug- und Raumfahrttechnik entsprechen. Dies könnte zu leichteren und kostengünstigeren Flugzeugen sowie zu schnelleren Entwicklungszyklen führen.
- **Automobilindustrie:** Auch in der Automobilbranche wird zunehmendes Wachstum erwartet, da 3D-Druck die effiziente Herstellung von Prototypen, Ersatzteilen und sogar ganzen Fahrzeugkomponenten ermöglicht. Dies könnte die Produktentwicklung beschleunigen und die Produktion flexibler gestalten.
- **Bauwesen:** Im Bauwesen wird 3D-Druck dazu beitragen, komplexe Bauteile und Strukturen effizienter herzustellen. Dies könnte die Baukosten senken, die Bauzeit verkürzen und die Gestaltungsmöglichkeiten erweitern. Nicht zuletzt für Entwicklungsländer werden sich hier vielversprechende Möglichkeiten bieten.
- **Verbraucherprodukte:** Im Bereich der Verbraucherprodukte wird 3D-Druck eine Vielzahl von maßgeschneiderten und personalisierten Produkten ermöglichen, von Schmuck und Modeaccessoires bis hin zu Haushaltsgegenständen und Spielzeug.

Insgesamt ist zu erwarten, dass 3D-Druck als wichtige Prozessinnovation in verschiedenen Branchen weiter an Bedeutung gewinnt, da die Technologie sich rasch weiterentwickelt und immer wieder auch völlig neue Anwendungsbereiche erschließt. Zudem wirken zahlreiche der (oben ausführlich dargestellten) spezifischen Einflussfaktoren und systemischen Treiber in Richtung einer **dynamischen Beschleunigung** bei der künftigen Anwendung und Weiterentwicklung von 3D-Druck-Verfahren.<sup>83</sup>

- ▶ **In Summe resultiert daraus eine sehr positive Zukunftsprojektion für den Gesamtkomplex moderner Additiver Fertigung; folglich rückt dieser oftmals unterschätzte Teilbereich der Prozess- und Verfahrenstechnik automatisch auch ins Blickfeld von Investoren.**

Die zunehmende Attraktivität und Effizienz der 3D-Drucktechnologie sowie deren immer breitere Einsatzfähigkeit hat konkrete Auswirkungen auch für Unternehmer und Investoren, denn:

- ▶ Eine fortschreitende Marktdurchdringung dieser Technologie, angetrieben vom Zusammenspiel der oben erörterten spezifischen Einflussfaktoren, wird in vielen Industrien **deutliche Disruptionen** oder transformative Veränderungen mit ungewissem Ausgang auslösen. Bestehende Geschäftsmodelle (etwa Bauwirtschaft, Medizintechnik, KFZ-Zulieferer) könnten dadurch zunehmend **herausgefordert** und partiell sogar entwertet werden.
- ▶ Gleichzeitig könnten viele Sektoren unmittelbar **profitieren**, indem sie durch **zunehmende Integration** von 3D-Druck-Verfahren in bestehende Geschäftsmodelle und Fertigungsprozesse eine spürbar höhere Effizienz und Flexibilität erzielen.
- ▶ Ebenso könnten durch innovative Produktgestaltung und hohe Individualität „made bei 3D-Druck“ auch **Kundengewinnung, Kundenzufriedenheit** und **Markenloyalität** spürbar verbessert werden, insbesondere bei Luxus-Konsumgütern und „Lifestyle-Produkten“.
- ▶ Nicht zuletzt dürften sich durch eine beschleunigte Weiterentwicklung der 3D-Druck-Technologie auch bei wichtigen Menschheitsproblemen wie **Medizin und Ernährung** völlig neue Chancen ergeben, speziell im Kontext „*Bioprinting*“ und „*Alternative Food*“.<sup>84</sup>
- ▶ Hinzu kommt seit kurzem noch die Entwicklung sogenannter „**4D-Druck-Verfahren**“, die mit Hilfe innovativer Material- und Drucktechniken völlig neuartige Anwendungsmöglichkeiten erschließen und zugleich auch der „Basistechnologie“ 3D-Druck zusätzliches **dynamisches Wachstumspotential** öffnen.

Gleichzeitig existieren für die Zukunft des 3D-Drucks aber auch noch einige **Herausforderungen** und **Belastungsfaktoren**. Nachfolgend sind einige Faktoren angeführt, die hier relevant erscheinen:

- ▶ 3D-Druck hat Bedenken hinsichtlich der **Rechte an geistigem Eigentum** aufgeworfen, da es dadurch immer einfacher wird, patentierte Designs zu vervielfältigen und zu verbreiten.
- ▶ Der **Wettbewerb** in der 3D-Druckbranche wird immer härter, da neue Marktteilnehmer auf den Markt drängen und etablierte Unternehmen ihr Angebot erweitern. Gleichzeitig wird sich dies auf weitere **Marktkonsolidierungen** auswirken: Experten zufolge wird die Branche in Zukunft noch stärker von Zusammenschlüssen kleiner Unternehmen zu größeren Unternehmen geprägt sein.<sup>85</sup>
- ▶ Mit dem Fortschreiten der 3D-Drucktechnologie kann es zu einer stärkeren **Regulierung** in Bezug auf Sicherheits- und Qualitätsstandards kommen.



*Investoren sollten noch mehr über Additive Manufacturing lernen, weil die Vorteile gegenüber anderen Herstellverfahren ganz neue Möglichkeiten eröffnen und die Innovationen, getrieben durch AM, noch lange nicht ausgeschöpft sind. Wissen über Technologien und Wertschöpfungsketten ist unerlässlich.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter  
Industriesektoren *Swissmem*





*Regulatorische Überlegungen, um Standardisierung und Normierung für AM festzulegen, sind sehr wichtig. Nur so lassen sich neue Geschäftsideen in den Lieferketten realisieren. Neben Aspekten der Technologie und Qualität spielt die Sicherheit der Daten eine große Rolle. Der Umgang mit den Daten muss besser geregelt werden, um Missbrauch zu verhindern.*

Dr. Adriaan Spierings, Ressortleiter Industriesektoren Swissmem



### **Was meint die KI dazu?**

*Einschätzung des KI-Systems ChatGPT für die Zukunftsaussichten von 3D-Druck:*

*Als KI-Modell kann ich keine persönlichen Meinungen äußern, aber basierend auf aktuellen Trends und Entwicklungen deutet vieles darauf hin, dass die Zukunftsaussichten für den 3D-Druck und additive Fertigungstechnologien äußerst vielversprechend sind. Die Technologie hat bereits in verschiedenen Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Gesundheitswesen, Automobilindustrie und sogar im Verbrauchermarkt einen erheblichen Einfluss gezeigt.*

*Mit kontinuierlichen Fortschritten in Materialwissenschaften, Maschinenbau und Softwareentwicklung wird erwartet, dass der 3D-Druck noch vielseitiger, kostengünstiger und effizienter wird. Dies wird dazu beitragen, die Hemmschwellen für die Einführung dieser Technologien weiter zu senken und ihre Marktdurchdringung zu erhöhen.*

*Darüber hinaus werden auch innovative Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten des 3D-Drucks in Bereichen wie der Biotechnologie, der Bauindustrie und der Lebensmittelherstellung erkundet, was zusätzliches Wachstumspotential bietet.*

*Obwohl es Herausforderungen wie Materialbeschränkungen, Qualitätskontrolle und geistige Eigentumsrechte gibt, deuten die fortschreitende Forschung und Entwicklung darauf hin, dass diese Hindernisse überwunden werden können.*

*Insgesamt können wir davon ausgehen, dass der 3D-Druck und additive Fertigungstechnologien eine immer wichtigere Rolle in der globalen Fertigungslandschaft spielen werden und dazu beitragen, die Art und Weise, wie Produkte hergestellt und konsumiert werden, zu revolutionieren.*

Prompt: 14.02.2024: Wie schätzen Sie die Zukunftsaussichten von 3D-Drucktechnologie ein?

Als wichtiges Fazit lässt sich somit festhalten:

- ▶ Mit Blick auf die Zukunft wird die 3D-Drucktechnologie in den nächsten zehn Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen, da sich die **Technologie weiter verbessert** und laufend **neue Anwendungen** entstehen.
- ▶ Die Technologie hat das Potential, heutige Fertigungsprozesse radikal zu verändern, indem sie die Herstellung **komplexer und maßgeschneiderter Produkte** zu **geringeren Kosten** und mit **größerer Effizienz** ermöglicht.
  - Insbesondere im Bereich der **personalisierten Massenproduktion und Kleinserienfertigung komplexer Teile** besteht beträchtliches Wachstumspotential. Das größte Wachstumspotential in den kommenden Jahren wird spezifisch in der Massenproduktion gesehen.<sup>86</sup>
  - Mit einem angesichts zunehmender und beschleunigter Nachfrage positiven Ausblick für den 3D-Druck haben Unternehmen, die sich inmitten brancheninterner Veränderungen erfolgreich behaupten können, grundsätzlich **vielversprechende Perspektiven**.<sup>87</sup>

- ▶ Darüber hinaus könnte die Verwendung neuer Materialien wie biologisch abbaubarer Kunststoffe und recycelter Materialien die **Nachhaltigkeit** des 3D-Drucks weiter verbessern.
- ▶ In Bereichen von **essentieller Zukunftsrelevanz für die Menschheit** – also Sektoren wie Gesundheit, Medizinaltechnik, Energiewirtschaft, Raumfahrt und Alternative Ernährung – könnte 3D-Druck zukünftig eine sehr viel bedeutendere Rolle spielen, die heute erst in Ansätzen erkennbar ist.
- ▶ Weiteres Zukunftspotential bietet die gezielte Weiterentwicklung des 3D-Drucks zu speziellen **4D-Druck-Verfahren**, die völlig neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen.

Hinzu kommt ein weiterer wichtiger Faktor, der den bisher eher verhaltenen – und oftmals unterschätzten – Ausblick für das Thema 3D-Druck spürbar verändern und beleben könnte:

- ▶ Die bisher noch relativ zersplitterte 3D-Druck-Branche dürfte in nächster Zeit durch verstärkte Bemühungen zur **industriellen Neuordnung** geprägt sein.
- ▶ Im Vordergrund wird dabei das Ziel stehen, durch Zusammenlegung von Kapazitäten und Technologien schneller **kritische Größe** und erhöhte Skaleneffekte zu realisieren. **Systemintegratoren** werden hierbei eine wichtige Rolle spielen, um den Übergang zu Additiver Fertigung zu erleichtern.<sup>88</sup>

Mögliche Übernahmen innerhalb der Branche werden den Fokus auf mögliche Marktbewertungen und bislang noch **unterschätzte Zukunftspotentiale** lenken und den Gesamtmarkt für 3D- bzw. 4D-Druck damit automatisch attraktiver machen. Das generelle Branchenumfeld bei 3D-Druck wird dadurch in nächster Zeit deutlich an **Aufmerksamkeit** gewinnen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der 3D-Druck eine **bahnbrechende Technologie** ist, die das Potential hat, die derzeitige Fertigungsindustrie massiv zu verändern. Die weitere Zukunft der 3D-Drucktechnologie wird vor allem von den laufenden **Forschungs- und Entwicklungsbemühungen** zur Verbesserung der Geschwindigkeit, Materialien, Effizienz (niedrige Kosten) und Nachhaltigkeit der Technologie geprägt sein.

- ▶ Um mögliche **sprunghafte Wachstumsschübe** nicht zu übersehen, sollten Unternehmer und Investoren in nächster Zeit ihre **Wahrnehmung** für das Thema 3D-Druck gezielt erhöhen und die weiteren Entwicklungen in diesem Bereich sehr genau verfolgen.



## Erläuterungen

- 1 Vgl. Dassault Systems (2023, Luft- und Raumfahrt).
- 2 Vgl. 3Ddruck (2023, Umsatz).
- 3 Die sieben Kategorien sind in der DIN-Norm wiederzufinden, vgl. Deutsches Institut für Normung (2021, Terminologie).
- 4 Vgl. Ritter (2022, AM).
- 5 Vgl. 10xDNA (2023, Wendepunkt) sowie Fortune Business Insights (2022, Marktforschung).
- 6 Vgl. zu diesen Bereichen weiterführend: unten, Kap. 5.
- 7 Die sogenannte *PolyJet-Technologie* ermöglichte es *Audi* verschiedene Prototypen zu entwickeln und zu bewerten, bevor Fahrzeugteile produziert wurden. Neben dem *VW*-Konzern, zu dem *Audi* gehört, ist auch *BMW* mit einem eigenen *Zentrum für additive Fertigung* sehr aktiv, wenn es darum geht Produktionskompetenzen zu bündeln, vgl. 3Dnatives (2022, Automobilindustrie).
- 8 3D-Druck wird bspw. für die Herstellung des Modells eines bösartigen Chondrosarkoms in den Vereinigten Arabischen Emiraten verwendet, vgl. Formlabs (2022, Chirurgie).
- 9 Die Herstellung von Werkzeugen mit konturnaher Kühlung wird von verschiedenen AM-Anbietern angeboten und angepriesen, darunter auch *Velo3D*, vgl. *Velo3D* (2023, Werkzeugbau).
- 10 Diese Unternehmen haben Ersatzteile für Schienen, LKW und Luftverkehr aus dem Drucker hergestellt. Große Namen der Transportindustrie bedienen sich bereits der AM-Technologie im Ersatzteil-Management, vgl. *Factory* (2023, Ersatzteilmanagement).
- 11 Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Beispielen: unten, Kap. 3.3.2. sowie 3.3.8
- 12 Vgl. zum generellen Kontext auch die neue Studie des *FERI Cognitive Finance Institute* zum Thema „Schutz der Biodiversität“ (Veröffentlichung in Kürze).
- 13 Vgl. dazu: *Forbes Asia* (2023, Coral Reefs).
- 14 Vgl. dazu ausführlich: *Entrepreneur* (2023, Archireef), sowie die Darstellung des Unternehmens *Archireefs* (2024, Korallen).
- 15 Diese Unternehmen haben Ersatzteile für Schienen, LKW und Luftverkehr aus dem Drucker hergestellt. Große Namen der Transportindustrie bedienen sich bereits der AM-Technologie im Ersatzteil-Management, vgl. *Factory* (2023, Ersatzteilmanagement) sowie 3Dnatives (2022, Automobilindustrie).
- 16 Vgl. Fraunhofer IAPT (2020, Jahresbericht), insbesondere S. 28-32.
- 17 Vgl. 3Dnatives (2022, Automobilindustrie).
- 18 Vgl. 3Dnatives (2022, Automobilindustrie).
- 19 Vgl. 3Dnatives (2021, Adidas).
- 20 Vgl. dazu beispielhaft *Windform* (2024, Stollenschuh).
- 21 *Louis Vuitton* präsentierte in Hongkong seinen ersten 3D-gedruckten Sneaker *Cobra*, vgl. 3DGrenzenlos (2023, Cobra).
- 22 Vgl. 3Dnatives (2023, Schmuck).
- 23 Vgl. Prozesstechnik Online (2023, Lebensmittel) sowie vgl. hierzu insbesondere die Studie des *FERI Cognitive Finance Institute* „Zukunftstrend *Alternative Food*“, Wirsam et al. (2020, Food).
- 24 Vgl. Alami et al. (2023, Food) sowie zu gedrucktem Fisch: *Fisch&Fang* (2023, Lachs).
- 25 Vgl. *WirtschaftsWoche* (2015, Frisch) sowie 3Ddruck (2020, Torten).
- 26 Vgl. *WirtschaftsWoche* (2015, Frisch) sowie 3Ddruck (2020, Torten).
- 27 Vgl. Deutsche Forschungsgemeinschaft (2022, Aroma).
- 28 Vgl. Prakash et al. (2023, Future).
- 29 Vgl. Dong et al. (2023, 3D).
- 30 Vgl. Prakash et al. (2023, Future) sowie Waseem et al. (2023, Physics).
- 31 Vgl. zum Gesamthintergrund *Alternative Food & Alternative Food Systems* die ausführliche Studie des *FERI Cognitive Finance Institute* „Zukunftstrend *Alternative Food*“, Wirsam et al. (2020, Food).
- 32 Vgl. Dong et al. (2023, 3D).
- 33 Vgl. Siebel (2023, Helicopter); *Airbus A350* spart mit gedruckten 3D-Metalteilen eine Tonne Gewicht, vgl. *Mattke* (2015, Airbus).
- 34 Das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* forscht mit 3D-gedruckten Raketenantriebsbauteilen wie bspw. der Brennkammer und konnte bereits erfolgreiche Heißlauftests durchführen, vgl. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (2023, Raumfahrt).
- 35 Vgl. *Presseportal* (2022, MakerSpace).
- 36 Vgl. *EOS* (2023, Orthopädie).
- 37 Vgl. Produktbeispiel *CeraFab*, *Lithoz* (2023, Dental).
- 38 Vgl. *Shell* (2016, Energy Industry).
- 39 Hier ist bspw. die Kühlung von Turbinenrotorschaukeln nennenswert, vgl. *Karlsruher Institut für Technologie* (2023, Gasturbine) sowie *Fraunhofer IFAM* (2019, Turbine).
- 40 Vgl. dazu grundsätzlich die beiden ausführlichen Studien des *FERI Cognitive Finance Institute*: „*Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft*“, Horster et al. (2018, Transformation), sowie „*Alternative Mobilität - Herausforderungen und Perspektiven für Umwelt und Automobilindustrie*“, Doll et al. (2019, Mobilität).
- 41 Vgl. 3Dnatives (2024, Festkörperbatterien).
- 42 Vgl. 3Dnatives (2024, Verteidigungsindustrie) sowie *Bundeswehr* (2022, Projekt).
- 43 Vgl. *SWR* (2024, Haus).
- 44 Vgl. *NZZ* (2024, Turm).
- 45 Vgl. *Frankfurter Neue Presse* (2024, Haus).

- 46 Vgl. AD (2021, Lehm) sowie HSBcad (2023, Zukunft).
- 47 Vgl. Highlight (2016, Bürohaus).
- 48 Vgl. Europäisches Patentamt (2023, Patentanmeldungen)
- 49 Vgl. Campell et al. (2023, AM).
- 50 Vgl. 3Dnatives (2023, Schädeldecke).
- 51 Vgl. Aerosint (2023, Multi-Material).
- 52 Vgl. Ceramic Disc Technology (202, Rotors).
- 53 Vgl. zur Verwendung von Humanmaterialien für den 3D-Druck, Industry of Things (2023, Humanmaterialien).
- 54 Vgl. 3Dnatives (2023, Umweltverschmutzung).
- 55 Vgl. 3Dnatives (2023, Schädeldecke).
- 56 Siehe Produktbeispiel *Adidas*, vgl. Kreimeier (2017, Adidas).
- 57 Siehe Produktbeispiel für Kopfhörer von *Sennheiser*, vgl. Sher (2022, Sennheiser).
- 58 Vgl. Prusa Research (2023, Farm System) und Prusa Research (2020, 3D).
- 59 Hybride Prozesse sparen enorm viel Ressourcen ein, vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (2022, Einsparung).
- 60 Vgl. Calignano et al. (2023, Overview).
- 61 Vgl. EOS (2023, Orthopädie).
- 62 Vgl. Metzger et al. (2023, Downsizing).
- 63 Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 4.
- 64 Genau diese Entwicklungen scheinen derzeit bereits verstärkt abzulaufen; vgl. dazu ausführlich etwa: Engineering (2023, Ten Years).
- 65 Der langjährige Industriekenner *John Kawola* im Interview, zitiert nach: Engineering (2023, Ten Years); (Hervorhebung durch Verfasser).
- 66 Vgl. für mehr Informationen zum ersten 3D-Druck im offenen All, 1E9 (2023, All).
- 67 Vgl. hierzu den Cognitive Comment aus dem *FERI Cognitive Finance Institute* „Urban Air Mobility – Flugdrohnen als Transportmittel der Zukunft“, Richter (2021, Flugdrohnen).
- 68 Vgl. Metzger et al. (2023, Downsizing).
- 69 Vgl. Quitter (2023, Weltall).
- 70 Vgl. EMPA (2019, Ohr).
- 71 Mehr zum Thema Organdruck, vgl. Reckter (2022, Organe).
- 72 Vgl. 3Dnatives (2023, Space).
- 73 Vgl. Martin (2023, Bioprint).
- 74 3D-Druckverfahren für personalisierte Medikamente, vgl. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2023, 3D).
- 75 Vgl. 3DDruck (2023, Bioprinting).
- 76 Scuplteo (2024, 4D-Druck).
- 77 Scuplteo (2024, 4D-Druck), (Hervorhebung durch Verfasser).
- 78 Scuplteo (2024, 4D-Druck).
- 79 Vgl. zum Komplex der Materialinnovationen bereits ausführlich: oben, Kap. 2.
- 80 Vgl. Krys (2023, Megatrends).
- 81 Patentanmeldungen im Bereich 3D-Druck sind im letzten Jahrzehnt achtmal schneller als der Durchschnitt aller Technologien gewachsen, vgl. Europäisches Patentamt (2023, Patentanmeldungen).
- 82 Weitere Informationen zur Marktreife vgl. Precedence Research (2023, Construction), AMFG (2020, Weltweit) sowie Mordor Intelligence (2023, Aerospace) und Mordor Intelligence (2023, Wachstum).
- 83 Zu den spezifischen Treibern vgl. ausführlich: oben, Kap. 4.
- 84 Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 3.3.5 (Bioprinting); Kap. 3.3.2 (Alternative Food). Vgl. zum Kontext alternativer Lebensmittelerzeugung ausführlich die Studie des *FERI Cognitive Finance Institute* „Zukunftstrend Alternative Food“, Wirsam et al. (2020, Food).
- 85 Vgl. Engineering (2023, Ten Years).
- 86 Vgl. 3Ddruck (2023, Umsatz).
- 87 Vgl. 3Ddruck (2023, Umsatz).
- 88 Vgl. Engineering (2023, Ten Years).

## Literaturverzeichnis

### Bücher und Publikationen

- Alami, A. H. / Olabi, A. G. / Khuri, S. / Aljaghoub, H. / Alasad, S. / Ramadan, M. & Abdelkareem, M. A.** (2024, Food): 3D printing in the Food Industry: Recent Progress and Role in Achieving Sustainable Development Goals, veröffentlicht bei *Ain Shams Engineering Journal*, erschienen im Februar 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923002757>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Calignano, F., & Mercurio, V.** (2023, Overview): An Overview of the Impact of Additive Manufacturing on Supply Chain, Reshoring, and Sustainability, veröffentlicht bei *Cleaner Logistics and Supply Chain*, erschienen im Juni 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390923000124>, zuletzt abgerufen am 15.01.2024.
- Campbell, I. / Diegel, O. / Huff, R. / Kowen, J., & Wohlers, T.** (2023, AM): Wohlers Report 2023 - 3D Printing and Additive Manufacturing - Global State of the Industry, veröffentlicht bei *Wohlers Associates*, erschienen 2023, <https://wohlersassociates.com/product/wr2023/>, zuletzt abgerufen am 15.01.2024.
- Doll, C. / Grimm, A. / Wietschel, M. / Funke, S.** (2019, Mobilität): Alternative Mobilität - Herausforderungen und Perspektiven für Umwelt und Automobilindustrie, veröffentlicht bei *FERI Cognitive Finance Institute*, erschienen am 11.09.2019, Kurzversion unter: <https://www.feri-institut.de/content-center/20190911>, zuletzt abgerufen am 16.02.2024.
- Dong, H. / Wang P. / Yang, Z. / Yu, X.** (2023, 3D): 3D Printing Based on Meat Materials: Challenges and Opportunities, veröffentlicht bei *Current Research in Food Science*, erschienen 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927122002490>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Fraunhofer IAPT** (2020, Jahresbericht): Jahresbericht 2020, veröffentlicht bei *Fraunhofer IAPT*, erschienen im Januar 2021, [https://www.iapt.fraunhofer.de/content/dam/iapt/documents/jahresbericht/Fraunhofer-IAPT\\_Jahresbericht\\_2020\\_D\\_Online.pdf](https://www.iapt.fraunhofer.de/content/dam/iapt/documents/jahresbericht/Fraunhofer-IAPT_Jahresbericht_2020_D_Online.pdf), zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Fortune Business Insights** (2022, Marktforschung): Markt Forschung Bericht, veröffentlicht bei *FBI*, erschienen im April 2022, <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/enquiry/request-sample-pdf/markt-f-r-3d-druck-101902>, zuletzt abgerufen am 15.01.2024.
- Horster, M. / Lutz, V. / Rosenberg, R. / Schaefers, K.** (2018, Transformation): Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, veröffentlicht bei *FERI Cognitive Finance Institute*, erschienen am 12.04.2018, Kurzversion unter: <https://www.feri-institut.de/content-center/20180412>, zuletzt abgerufen am 16.02.2024.
- Krys, C.** (2023, Megatrends): Trend Compendium 2050: Six Megatrends Will Shape the Next Decades, veröffentlicht bei *Roland Berger*, erschienen im Juli 2023, <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Global-Topics/Trend-Compendium/>, zuletzt abgerufen am 15.01.2024.
- Metzger, D. F. / Klahn, C. / Dittmeyer, R.** (2023, Downsizing): Downsizing Sustainable Aviation Fuel Production with Additive Manufacturing-An Experimental Study on a 3D printed Reactor for Fischer-Tropsch Synthesis, veröffentlicht bei *Energies*, No. 19, erschienen am 25.09.2023, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/6798>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Momeni, F. / Hassani, M. / Liu, X. / Ni, J.** (2017, 4D Print): A Review of 4D Printing, veröffentlicht bei *Materials & Design*, erschienen am 15.05.2017, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517302034>, zuletzt abgerufen am 20.02.2024.
- Prakash, S. / Bhandari, B. R. / Godoi, F. C. / Zhang, M.** (2019, Future): Chapter13 – Future Outlook of 3D Food Printing, veröffentlicht bei *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, erschienen in 2019, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128145647000134>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Precedence Research** (2023, Construction): 3D Printing Construction Market, veröffentlicht bei *Precedence Research*, erschienen im Februar 2023, <https://www.precedenceresearch.com/3d-printing-construction-market>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Richter, M.** (2021, Flugdrohnen): Urban Air Mobility – Flugdrohnen als Transportmittel der Zukunft, veröffentlicht bei *FERI Cognitive Finance Institute*, erschienen am 05.05.2024, Version unter: [https://www.feri-institut.de/content-center/20210505Finance Institute](https://www.feri-institut.de/content-center/20210505Finance%20Institute), zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Waseem, M. / Tahir A.U. / Majeed, Y.** (2023, Physics): Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing, veröffentlicht bei *Food Physics*, erschienen im September 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950069923000038>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Wirsam, J. / Biber, A./ Bahlmann, J.** (2020, Food): Zukunftstrend „Alternative Food“ – Disruption und Transformation globaler „Food Systems“, veröffentlicht bei *FERI Cognitive Finance Institute*, erschienen am 06.10.2020, Kurzversion unter: <https://www.feri-institut.de/content-center/20201006>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.

### Zeitungen und Internetquellen

- 1E9** (2023, All): Erster 3D-Druck im offenen All: DCUBED aus München will Raumfahrt-Geschichte schreiben, veröffentlicht am 18.08.2023, <https://1e9.community/t/erster-3d-druck-im-offenen-all-dcubed-aus-muenchen-will-raumfahrt-geschichte-schreiben>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 10xDNA** (2023, Wendepunkt): 3D-Druck erreicht Wendepunkt bei Anwendungen in der Industrie, veröffentlicht am 22.06.2023, <https://www.ftd.de/kolumnen/3d-druck-erreicht-wendepunkt-bei-anwendungen-in-der-industrie/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Ddruck** (2020, Torten): Pizza 3D-Druck Startup BeeHex druckt jetzt auch Torten, veröffentlicht am 26.06.2020, <https://3druck.com/case-studies/pizza-3d-druck-startup-beehex-druckt-jetzt-auch-torten-5495004/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2023.
- 3Ddruck** (2023, Bioprinting): 3D Bioprinting: CELLINK und Carcinotech kooperieren bei der Entwicklung von Krebsmedikamenten, veröffentlicht am 10.10.2023, <https://3druck.com/medizin/3d-bioprinting-cellink-und-carcinotech-kooperieren-bei-der-entwicklung-von-krebsmedikamenten-27122688>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3DGrenzenlos** (2023, Cobra): Louis Vuitton präsentiert in Hongkong ersten 3D-gedruckten Sneaker „Cobra“, veröffentlicht am 03.12.2023, <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/louis-vuitton-cobra-3d-druck-sneaker-271068373/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Dnatives** (2024, Festkörperbatterien): Start der Massenproduktion 3D-gedruckter Festkörperbatterien von Sakuu, veröffentlicht am 18.01.2024, <https://www.3dnatives.com/de/massenproduktion-3d-gedruckter-festkoerperbatterien-180120241/#!>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- 3Dnatives** (2024, Verteidigungsindustrie): 3D-Druck in der Verteidigungsindustrie, veröffentlicht o.A., <https://www.3dnatives.com/de/wp-content/uploads/sites/3/2024/02/3D-DRUCK-IN-DER-VERTEIDIGUNGSINDUSTRIE.pdf>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- 3Dnatives** (2023, Umweltverschmutzung): 3D-gedrucktes lebendes Material gegen Umweltverschmutzung, veröffentlicht am 25.09.2023, <https://www.3dnatives.com/de/3d-gedrucktes-lebendes-material-gegen-umweltverschmutzung-150920231>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Dnatives** (2023, Schädeldecke): Universitätsspital Basel setzt erstmals in-house 3D-gedruckte Schädeldecke ein, veröffentlicht am 26.09.2023, <https://www.3dnatives.com/de/universitaetsspital-basel-setzt-erstmal-in-house-3d-gedruckte-schaedeldecke-ein-260920231>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.

- 3Dnatives** (2023, Schmuck): 3D-Druck spielt eine immer größere Rolle in der Schmuckindustrie, veröffentlicht am 20.02.2023, <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-immer-groessere-rolle-schmuck-200220231>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Dnatives** (2023, Space): Redwire Has 3D Bioprinted the First Human Knee Meniscus in Space, veröffentlicht am 13.09.2023, <https://www.3dnatives.com/en/redwire-3d-bioprinted-human-knee-meniscus-space-130920236>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Dnatives** (2022, Automobilindustrie): Welche Anwendungen findet der 3D-Druck in der Automobilindustrie, veröffentlicht am 12.10.2022, <https://www.3dnatives.com/de/anwendung-3d-druck-in-der-automobilindustrie-081020201/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- 3Dnatives** (2021, Adidas): 4D Fusio, der neue 3D-gedruckte Schuh von Adidas, veröffentlicht am 14.01.2021, <https://www.3dnatives.com/de/4d-fusio-adidas-140120211/#!>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- AD** (2021, Lehm): Ein Haus aus dem 3D-Drucker – komplett aus Lehm, veröffentlicht am 16.06.2021, <https://www.ad-magazin.de/article/tecla-haus-aus-3d-drucker-aus-lehm>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Aerosint** (2023, Multi-Material): Multi-material L-PBF, veröffentlicht o.A., <https://aerosint.com/multi-material-3d-printing-bundle/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- AMFG** (2020, Weltweit): AM Weltweit: Wie ausgreift ist 3D-Druck im asiatisch-pazifischen Raum?, veröffentlicht am 11.01.2020, <https://amfg.ai/de/2020/01/11/am-weltweit-wie-ausgreift-ist-3d-druck-im-asiatisch-pazifischen-raum/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Archireef** (2024, Korallen): Restoring Degraded Marine Ecosystems, veröffentlicht o.A., <https://archireef.co/>, zuletzt abgerufen am 16.02.2024.
- BMW Group** (2020, Campus): Der Additive Manufacturing Campus: Fahrzeugteile aus dem Drucker, veröffentlicht am 25.06.2020, <https://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2020/additive-manufacturing.html>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Bundeswehr** (2022, Projekt): 3D-Druck: Von der Idee zum Projekt, veröffentlicht am 23.03.2022, <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/weitere-bmvg-dienststellen/planungsamt-der-bundeswehr-/3d-druck-additive-fertigung-planungsamt-5379914>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Ceramic Disc Technology** (2020, Rotors): Better-Performing Brake Rotor from 3D Printing, veröffentlicht o.A., <https://www.ceramicdiscotech.com/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Dassault Systems** (2024, 3D-Druck): 3D Druck, veröffentlicht o.A., <https://www.3ds.com/de/make/guide/process/3d-printing>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Dassault Systems** (2023, Luft- und Raumfahrt): 3D-Druck in der Luft- und Raumfahrt, veröffentlicht o.A., <https://www.3ds.com/de/make/solutions/industries/3d-printing-aerospace>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Deutsches Institut für Normung** (2021, Terminologie): Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021), veröffentlicht im März 2021, <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-astm-52900/344258696>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft** (2022, Aroma): Texturdesign von Lebensmittel-Biopolymeren mittels 3D-Druck zur Modulation der Aroma/Geschmackswahrnehmung, veröffentlicht in 2022, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/405072578?context=projekt&task=showDetail&id=405072578&>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt** (2023, Raumfahrt): DLR entwickelt 3D-Druckverfahren für die Raumfahrt weiter, veröffentlicht am 02.08.2023, <https://www.dlr.de/aktuelles/nachrichten/2023/03/dlr-entwickelt-3d-druckverfahren-fuer-die-raumfahrt-weiter>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- East 17th Street Residence** (2024, Residence): Welcome to East 17th Street Residences, veröffentlicht o.A., <https://www.east17thstreetresidences.com/>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- EMPA** (2019, Ohr): Das Ohr aus dem 3-D-Drucker, veröffentlicht am 15.01.2019, <https://www.empa.ch/de/web/s604/ohr-aus-nanozellulose>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Engineering** (2023, Ten Years): What Will the 3D Printing Industry Look like in Ten Years?, veröffentlicht am 28.07.2023, <https://www.engineering.com/story/what-will-the-3d-printing-industry-look-like-in-ten-years>, zuletzt abgerufen am 19.02.2024.
- Entrepreneur** (2023, Archireef): Archireef: Using 3D Printing to Save the Coral Reef Ecosystem, veröffentlicht am 17.02.2023, <https://www.entrepreneur.com/en-ae/entrepreneurs/archireef-using-3d-printing-to-save-the-coral-reef/445928>, zuletzt abgerufen am 16.02.2024.
- EOS** (2023, Orthopädie): 3D-Druck in der Orthopädietechnik, veröffentlicht o.A., <https://www.eos.info/de/innovationen/3d-druck-beispiele/medizintechnik/orthopaedietechnik-gelenk>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Europäisches Patentamt** (2023, Patentanmeldungen): Patentanmeldungen im Bereich 3D-Druck sind im letzten Jahrzehnt achtmal schneller als der Durchschnitt aller Technologien gewachsen, veröffentlicht am 19.09.2023, <https://www.epo.org/de/news-events/news/patentanmeldungen-im-bereich-3d-druck-sind-im-letzten-jahrzehnt-achtmal-schneller>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Factory** (2023, Ersatzteilmanagement): 3D-Druck als Heilsbringer fürs Ersatzteilmanagement?, veröffentlicht am 21.03.2023, <https://factorynet.at/warenfluss/3d-druck-als-heilsbringer-fuers-ersatzteilmanagement/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2023.
- Fisch&Fang** (2023, Lachs): 3D-gedrucktes Lachsfilet im Supermarkt erhältlich, veröffentlicht am 12.09.2023, <https://fischundfang.de/3d-gedrucktes-lachsfilet-im-supermarkt-erhaeltlich/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Foodish** (2023, Fleisch): Redefine Meat, veröffentlicht am 29.01.2023, <https://foodish.cooking/define-meat>, zuletzt abgerufen am 27.02.2024.
- Forbes Asia** (2023, Coral Reefs): Meet The Marine Biologist-Turned-Entrepreneur Restoring Coral Reefs Using 3D Printing And Clay, veröffentlicht am 14.03.2023, <https://www.forbes.com/sites/zinnialee/2023/03/14/meet-the-marine-biologist-turned-entrepreneur-restoring-coral-reefs-using-3d-printing-and-clay/>, zuletzt abgerufen am 16.02.2024.
- Formlabs** (2022, Chirurgie): Wie medizinischer 3D-Druck die chirurgische Arbeit in den VAE verändert, veröffentlicht am 25.07.2022, <https://formlabs.com/ch/blog/medizinischer-3d-druck-revolutioniert-chirurgische-arbeit-uae/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Frankfurter Neue Presse** (2024, Haus): Deutschlands erstes Haus aus 3D-Drucker steht: In nur vier Tagen gebaut, veröffentlicht am 16.02.2024, [https://www.fnp.de/deutschland/sparen-haus-aus-3d-drucker-deutschland-hausbau-innovativer-bau-bauen-schnell-baukosten-baumaterial-nds-92091577.html?utm\\_medium=Social&utm\\_source=Facebook&utm\\_campaign=fnp&fbclid=IwAR1jf1cXre0H1p9NzdpPyJs2YE3VRhYCXwhmTBVPkIjNzKF-Wy3tVNuEpZqg#Echobox=1705487863](https://www.fnp.de/deutschland/sparen-haus-aus-3d-drucker-deutschland-hausbau-innovativer-bau-bauen-schnell-baukosten-baumaterial-nds-92091577.html?utm_medium=Social&utm_source=Facebook&utm_campaign=fnp&fbclid=IwAR1jf1cXre0H1p9NzdpPyJs2YE3VRhYCXwhmTBVPkIjNzKF-Wy3tVNuEpZqg#Echobox=1705487863), zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Fraunhofer IFAM** (2019, Turbine): Turbine aus dem 3D-Drucker, veröffentlicht am 17.09.2019, [https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Archiv/2019/Turbine\\_aus\\_dem\\_3D-Drucker.html](https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Archiv/2019/Turbine_aus_dem_3D-Drucker.html), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg** (2023, 3D): 3D-Druckverfahren für personalisierte Medikamente, veröffentlicht am 06.10.2023, <https://www.process.vogel.de/3d-druckverfahren-fuer-personalisierte-medikamente-a-99f1eed973c510a374859aee04b736cb>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.

- Highlight** (2016, Bürohaus): Erstes Bürohaus aus dem 3D-Drucker in Dubai mit Innenausstattung von Bene, veröffentlicht am 17.06.2016, <https://www.highlight-web.de/4143/erstes-buerohaus-aus-dem-3d-drucker-in-dubai-mit-innenausstattung-von-bene/?view=gallery>, zuletzt abgerufen am 15.02.2024.
- HSBcad** (2023, Zukunft): Ist der 3D-Druck die Zukunft des Bauwesens?, veröffentlicht o.A., <https://deu.hsbcad.com/news/3d-printing-the-future-of-construction>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Idotter** (2009, Zyklus): Hype-Zyklus nach Gartner, veröffentlicht am 27.12.2007, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gartner\\_Hype\\_Cycle.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gartner_Hype_Cycle.svg), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- i.materialise** (2024, Gyroid); Gyroid, veröffentlicht o.A., <https://i.materialise.com/de/shop/item/gyroid>, zuletzt abgerufen am 27.02.2024.
- Industry of Things** (2023, Humanmaterialien): Humanmaterialien für den 3D-Druck menschlichen Gewebes, veröffentlicht am 28.07.2023, <https://www.industry-of-things.de/humanmaterialien-fuer-den-3d-druck-menschlichen-gewebes-a-05dc2c16a43c8bd96752f8ecf7340c7b>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Karlsruher Institut für Technologie** (2023, Gasturbine): Kühlung von Turbinenrotorschaukeln, veröffentlicht o.A., [https://www.its.kit.edu/Forschungsschwerpunkte\\_KuehlungTurbinenrotorschaukel.php](https://www.its.kit.edu/Forschungsschwerpunkte_KuehlungTurbinenrotorschaukel.php), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Kreimeier, N.** (2017, Adidas): Adidas - Schuhe aus dem 3D-Drucker, veröffentlicht am 04.10.2017, <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/adidas-schuhe-aus-dem-3d-drucker>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Lithoz** (2023, Dental): Printed ceramics make your smile!, veröffentlicht o.A., <https://lithoz.com/de/branchen/dental/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Martin, N.** (2023, Bioprint): 3D Bioprinting Inside the Human Body Could Be Possible Thanks to New Soft Robot, veröffentlicht am 28.02.2023, <https://www.unsw.edu.au/newsroom/news/2023/02/3d-bioprinting-inside-the-human-body-could-be-possible-thanks-to>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Mattke, S.** (2015, Airbus): Airbus A350: mit gedruckten 3D-Metalteilen eine Tonne Gewicht einsparen, veröffentlicht am 14.10.2015, <https://www.heise.de/news/Airbus-A350-mit-gedruckten-3D-Metalteilen-eine-Tonne-Gewicht-einsparen-2844080.html>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Mordor Intelligence** (2023, Aerospace): 3D Printing in Aerospace and Defense Market Size, veröffentlicht o.A., <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-in-aerospace-and-defense-market>, zuletzt abgerufen am 15.01.2024.
- Mordor Intelligence** (2023, Wachstum): 3D-Druck-Marktgröße & Anteilsanalyse - Wachstumstrends & Prognosen (2023 - 2028), veröffentlicht o.A., <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/3d-printing-market>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- NZZ** (2024, Turm): Die ETH Zürich fabriziert das höchste gänzlich digital gedruckte Bauwerk der Welt – es soll an Zuckerbäcker von früher erinnern, veröffentlicht am 26.01.2024, <https://www.nzz.ch/zuerich/3d-druck-eth-zuerich-fabriziert-hoehchstes-digital-gedrucktes-bauwerk-der-welt-ld.1776096>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Presseportal** (2022, MakerSpace): Koehler-Gruppe fördert Innovationen und stellt MakerSpace großformatigen 3D-Drucker von BigRep zur Verfügung, veröffentlicht am 22.12.2022, <https://www.presseportal.de/pm/132448/5400494>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Prozesstechnik Online** (2023, Lebensmittel): Lebensmittel aus dem 3D-Drucker, veröffentlicht am 12.09.2023, <https://prozesstechnik.industrie.de/food/nahrungsmittelmaschinen-food/lebensmittel-aus-dem-3d-drucker/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Prusa Research** (2020, 3D): 3D Printed Face Shields for Medics and Professionals, veröffentlicht o.A., [https://www.prusa3d.com/page/covid-19\\_379/](https://www.prusa3d.com/page/covid-19_379/), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Prusa Research** (2023, Farm System): Autonomes Farm System von Prusa Research, veröffentlicht o.A., <https://afs.prusa3d.com/de>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Quitter, D.** (2023, Weltall): Menschliches Gewebe im Weltraum drucken, veröffentlicht am 28.08.2023, <https://www.industry-of-things.de/menschliches-ewebe-im-weltraum-drucken-a-45de41c575fe7e7de4153f15ea78524f>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Reckter, B.** (2022, Organe): Maßgeschneidert Organe aus dem 3D-Drucker, veröffentlicht am 05.05.2022, <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/gesundheit/massgeschneiderte-organe-aus-dem-3d-drucker/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Ritter, S.** (2022, AM): Formnext AM Field Guide Compact, veröffentlicht im September 2022, [https://formnext.mesago.com/content/dam/messefrankfurt-mesago/formnext/2022/documents/pdf/Formnext2022\\_AM-Field-Guide\\_2022\\_Deutsch\\_Englisch\\_WEB.pdf](https://formnext.mesago.com/content/dam/messefrankfurt-mesago/formnext/2022/documents/pdf/Formnext2022_AM-Field-Guide_2022_Deutsch_Englisch_WEB.pdf), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Sculpteo** (2024, 4D-Druck): 4D-Druck: Eine Technologie aus der Zukunft, veröffentlicht o.A., <https://www.sculpteo.com/de/3d-lernzentrum/das-beste-von-unserem-blog/4d-druck-eine-technologie-aus-der-zukunft/>, zuletzt abgerufen am 19.02.2024.
- Shell** (2016, Energy Industry): 3D Printing in Energy Industry, veröffentlicht 2016, <https://www.shell.com/energy-and-innovation/digitalisation/digital-technologies/3d-printing.html>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Sher, D.** (2022, Sennheiser): Sennheiser Launches Metal 3D Printed IE 600 Earphones, veröffentlicht am 04.03.2022, <https://www.voxelmatters.com/sennheiser-to-launch-metal-3d-printed-ie-600-earphones-on-march-8th/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Siebel, T.** (2023, Helicopter): Airbus Helicopters fertigt 3-D-Druckteile in Serie, veröffentlicht am 17.10.2023, <https://www.springerprofessional.de/additive-fertigung/leichtbau/airbus-helicopters-fertigt-3-d-druckteile-in-serie/26189622>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- SWR** (2024, Haus): Heidelberg: IT-Firma zieht in Haus aus dem 3D-Drucker ein, veröffentlicht am 30.01.2024, <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/mannheim/haus-3d-druck-heidelberg-100.html>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Veganivore** (2023, Fleisch): Fleisch aus dem 3D Drucker: Was ist das?, veröffentlicht am 15.02.2023, <https://veganivore.de/fleisch-3d-drucker/>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Velo3D** (2023, Werkzeugbau): Wie die additive Fertigung den Werkzeugbau verändert, veröffentlicht o.A., [https://velo3d.com/de/white\\_papers/how-additive-manufacturing-is-transforming-tooling/](https://velo3d.com/de/white_papers/how-additive-manufacturing-is-transforming-tooling/), zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- Welt** (2014, Revolution): 3-D-Druck leitet dritte industrielle Revolution ein, veröffentlicht am 02.06.2014, <https://www.welt.de/wirtschaft/article128614810/3-D-Druck-leitet-dritte-industrielle-Revolution-ein.html#:~:text=%E2%80%9C,Lesen%20Sie%20auch&text=3%2DD%2DDruck%20werde%20das,%E2%80%9C>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Windform** (2024, Stollenschuh): Pleko, voll funktionsfähige Stollenschuhe, hergestellt mit dem kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoff Windform SP und 3D-Druck, veröffentlicht o.A., <https://www.windform.com/de/fallstudien/pleko-voll-funktionsfaehige-stollenschuhe-3d-druck/>, zuletzt abgerufen am 14.02.2024.
- Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik** (2022, Einsparung): Hybride Prozesse sparen enorm viel Ressourcen ein, veröffentlicht im Dezember 2021, <https://wgp.de/de/hybride-prozesse-sparen-enorm-viel-ressourcen-ein/>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.
- WirtschaftsWoche** (2015, Frisch): Frisch gedruckt statt frisch gekocht, veröffentlicht am 20.01.2014, <https://www.wiwo.de/technologie/forschung/food-print-frisch-gedruckt-statt-frisch-gekocht-/9356446.html#7>, zuletzt abgerufen am 09.02.2024.

## *Impressum*

**Herausgeber:** FERl Cognitive Finance Institute, Bad Homburg

**Autoren:** Jonas Keller, Entwicklungsingenieur, cross-ING  
Patrick Streit, Entwicklungsingenieur, cross-ING  
Fabian Tunzini, Leiter Kompetenzzentrum AM Design, cross-ING  
Dr. Dominik Kohr, Director Central, cross-ING

**Über cross-ING:** Wir unterstützen Unternehmen aller Branchen dabei, noch erfolgreicher zu werden und neue Entwicklungen gekonnt zu realisieren. cross-Engineering steht für unsere interdisziplinäre Arbeitsweise, 150 hochqualifizierte Mitarbeitende und Expertise in 20 Fachbereichen. Unseren Kunden bieten wir dadurch ein besonders umfangreiches Spektrum an Möglichkeiten – das zeichnet uns aus.

**Veröffentlichung:** Februar 2024

# Bisherige Analysen und Publikationen im FERI Cognitive Finance Institute:

## Studien:



1. Carbon Bubble und Dekarbonisierung (2017)
2. Overt Monetary Finance (OMF) (2017)
3. Die Rückkehr des Populismus (2017)
4. KI-Revolution in der Asset & Wealth Management Branche (2017)
5. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“ (2018)
6. Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, (2018)
7. Wird China zur Hightech-Supermacht? (2018)
8. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2018)
9. Risikofaktor USA (2018)
10. Impact Investing: Konzept, Spannungsfelder und Zukunftsperspektiven (2019)
11. „Modern Monetary Theory“ und „OMF“ (2019)
12. Alternative Mobilität (2019)
13. Digitalisierung – Demographie – Disparität (2020)
14. „The Great Divide“ (2020)
15. Zukunftstrend „Alternative Food“ (2020)
16. Digitalisierung – Demographie – Disparität, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2020)
17. „The Great Progression“ (2021)
18. „Blockchain und Tokenisierung“ (2021)
19. „The Monetary Supercycle“ (2021)
20. Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft (2022)
21. Sustainable Blue Economy (2022)
22. Chinas globales Powerplay (2022)
23. Quo vadis, Europa? (2023)
24. Neue Weltordnung – „Made in China“ (2023)

## Cognitive Comments:



1. Network Based Financial Markets Analysis (2017)
2. Zwischen Populismus und Geopolitik (2017)
3. „Neue Weltordnung 2.0“ (2017)
4. Kryptowährung, Cybermoney, Blockchain (2018)
5. Dekarbonisierungsstrategien für Investoren (2018)
6. Innovation in block-chain-based business models and applications in the enterprise environment (2018)
7. Künstliche Intelligenz, Quanten-Computer und Internet of Things - Die kommende Disruption der Digitalisierung (2019)
8. Quantencomputer, Internet of Things und superschnelle Kommunikationsnetze (2019)
9. Was bedeutet die CoViD19-Krise für die Zukunft? (2020)
10. Trouble Spot Taiwan – ein gefährlich unterschätztes Problem (2021)
11. Urban Air Mobility – Flugdrohnen als Transportmittel der Zukunft (2021)
12. „Longevity“: Megatrend Langlebigkeit – Die komplexen Auswirkungen und Konsequenzen steigender Lebenserwartung (2022)
13. Hightech-Metalle und Seltene Erden – Akute Rohstoff-Risiken für Europas Zukunft (2022)
14. Amerika auf dem Weg zur Autokratie – Anatomie und Perspektiven einer gespaltenen Großmacht (2022)
15. Vertical Farming – Technologische Innovation zur Umgestaltung des globalen Ernährungssystems (2023)
16. Generation Z – Potentiale der jungen Generation für globale Disruption (2023)
17. KI: The Next Level – Die transformative Wucht des Megatrends „Künstliche Intelligenz“ (2023)
18. Chinas Angriff auf den US-Dollar – Maßnahmen, Motive und mögliche Risiken für das westliche Finanzsystem (2023)
19. „Trump reloaded“ – Drohender Umbau der USA in eine Präsidialdiktatur (2024)
20. 3D-Druck und Additive Fertigung: Unterschätztes Potential zur Transformation wichtiger Zukunftstrends (2024)

## Cognitive Briefings:



1. Ressourcenverbrauch der Digital-Ökonomie (2020)
2. Globale Bifurkation oder „New Cold War“? (2020)
3. Digitaler Euro: Das Wettrennen zwischen Europäischer Zentralbank und Libra\* Association (2020)
4. Herausforderung „Deep Fake“ (2021)
5. Geoökonomische Zeitenwende (2022)
6. Brennpunkt Taiwan (2023)
7. CRISPR/Cas (2023)

Diese und noch viele weitere themenspezifische Veröffentlichungen haben wir auf unserer Webseite hinterlegt: [www.feri-institut.de](http://www.feri-institut.de)

*„Die Vorteile gegenüber anderen Herstellverfahren eröffnen ganz neue Möglichkeiten und die Innovationen, getrieben durch die Additive Fertigung, sind noch lange nicht ausgeschöpft.“*

Martin Hofer, Gründer und Mitinhaber *Feramic AG*



FERI AG | FERI Cognitive Finance Institute  
Das strategische Forschungszentrum der FERI Gruppe  
Haus am Park  
Rathausplatz 8 – 10  
61348 Bad Homburg v.d.H.  
Tel. +49 (0)6172 916-3631  
info@feri-institut.de  
www.feri-institut.de



cross-ING AG  
Technoparkstrasse 2  
CH-8406 Winterthur  
Tel. +41 (0) 52 202 02 50  
www.cross-ING.ch

Rechtliche Hinweise: Alle Angaben und Quellen werden sorgfältig recherchiert. Für Vollständigkeit und Richtigkeit der dargestellten Information wird keine Gewähr übernommen. Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Jede weitere Verwendung, insbesondere der gesamte oder auszugsweise Nachdruck oder die nicht nur private Weitergabe an Dritte, ist nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung von FERI gestattet. Die nicht autorisierte Einstellung auf öffentlichen Internetseiten, Portalen oder anderen sozialen Medien ist ebenfalls untersagt und kann rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen. Die angeführten Meinungen sind aktuelle Meinungen, mit Stand des in diesen Unterlagen aufgeführten Datums. FERI AG, Stand 2024