



## Bachelorthesis

**Vor- und Zuname:**

Kelly Liao



**Titel:**

Chancen und Herausforderungen des 3D-Drucks für  
Automobilhersteller

**Abgabedatum:**

30.01.2020

**Betreuende Professorin:** Frau Prof. Dr. Claudia Brumberg

**Zweiter Prüfender** Herr Prof. Dr. Ralf Lenschow

Fakultät Wirtschaft und Soziales

Department Wirtschaft

**Studiengang:**

Logistik / Technische Betriebswirtschaftslehre

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VI</b>
<b>1. Problemstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Einordnung des 3D-Drucks .....</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen .....	3
2.2 3D-Druck im Kontext von Industrie 4.0 .....	5
<b>3. Technologie des 3D-Drucks .....</b>	<b>7</b>
3.1 Druckprozess .....	7
3.2 Übersicht der dominierenden Druckverfahren .....	12
3.2.1 Stereolithografie (SLA).....	12
3.2.2 Fused Filament Fabrication (FFF).....	14
3.2.3 Selektives Lasersintern (SLS).....	15
3.2.4 Pulverdruckverfahren (3DP).....	16
3.3 Materialien .....	19
<b>4. Anwendungsebenen des 3D-Drucks .....</b>	<b>21</b>
4.1 Rapid Prototyping .....	21
4.2 Rapid Tooling.....	25
4.3 Rapid Manufacturing.....	26
<b>5. Chancen und Herausforderungen des 3D-Drucks für Automobilhersteller unter Berücksichtigung der Wertschöpfungskette.....</b>	<b>28</b>
5.1 Wertschöpfungskette eines Automobilherstellers .....	28
5.2 Produktdifferenzierung.....	30
5.3 Chancen .....	32
5.3.1 Kostensenkungspotenziale .....	32
5.3.2 Designfreiheit .....	33
5.3.3 Gewichtseinsparung.....	35
5.3.4 Funktionsintegration .....	37
5.4 Herausforderungen .....	39

---

5.4.1 Technische Herausforderungen .....	39
5.4.2 Standards und Zertifizierungen .....	41
5.4.3 Schutz des geistigen Eigentums .....	41
<b>6. Abschlussbetrachtung.....</b>	<b>43</b>
<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>XII</b>
<b>Einverständniserklärung .....</b>	<b>XII</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip des 3D-Drucks.....	4
Abbildung 2: Prozess des 3D-Drucks.....	7
Abbildung 3: Triangulation eines CAD-Modells.....	8
Abbildung 4: Unterschiedliche Dichten der Innenfüllung in Prozent.....	9
Abbildung 5: Bauteil mit Stützstrukturen .....	10
Abbildung 6: Unterschiedliche Überhangswinkel .....	11
Abbildung 7: Schematische Zeichnung des SLA-Verfahrens.....	13
Abbildung 8: Schematische Zeichnung des FFF-Verfahrens .....	14
Abbildung 9: Schematische Zeichnung des SLS-Verfahrens.....	15
Abbildung 10: Schematische Zeichnung des 3DP-Verfahrens .....	17
Abbildung 11: Merkmale der 3D-Druckverfahren .....	18
Abbildung 12: Druckerkosten .....	19
Abbildung 13: Zeitersparnis durch Rapid Prototyping .....	21
Abbildung 14: Ergebnis vom Rapid Prototyping.....	22
Abbildung 15: Änderungskosten .....	23
Abbildung 16: Formeneinsatz mit konturangepassten Kühlkanälen .....	25
Abbildung 17: 3D-Druck und traditionelle Verfahren im Stückkostenvergleich .....	27
Abbildung 18: Wertschöpfungsanteil der Automobilzulieferer.....	28
Abbildung 19: Produktstruktur folgt Lieferantenstruktur .....	29
Abbildung 20: Erweiterung der Variantenvielfalt .....	31
Abbildung 21: Spiegelhalter aus dem 3D-Drucker .....	34
Abbildung 22: Generatives Design einer Felge.....	34
Abbildung 23: Entwicklungsstadien einer Dachhalterung .....	36
Abbildung 24: Alte und neue funktionsintegrierte Sitzhalterung.....	37

---

## Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional bzw. drei Dimensionen
3DP	Pulverdruckverfahren
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPS	Cyber-physisches System
FFF	Fused Filament Fabrication
JIT	Just-in-Time
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OEM	Original Equipment Manufacturer
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SLA	Stereolithographie
SLM	Selektives Laserschmelzen
SLS	Selektives Lasersintern
STL	Standard Triangulation Language

## Abstract

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit den Chancen und Herausforderungen, die sich Automobilherstellern bei Anwendung des 3D-Drucks ergeben. Dabei wird zunächst erklärt, was unter dieser Art der Fertigung zu verstehen ist und welche Bedeutung es für die Industrie 4.0 hat. Zudem werden relevante 3D-Druckverfahren beschrieben und miteinander verglichen. Die Problematik einer komplexen Supply Chain und die Folgen einer zunehmenden Differenzierung der Produktpalette der Automobilhersteller werden dargestellt und Lösungsmöglichkeiten vorgestellt, die sich durch den 3D-Druck eröffnen. Neben einer Verringerung der Lager- und Transportkosten bietet die additive Fertigung auch Wege Leichtbaufahrzeuge zu entwickeln. Technische Schwierigkeiten und rechtliche Risiken des 3D-Drucks werden ebenfalls ausgeführt. Beispiele aus der Praxis veranschaulichen die Erkenntnisse der Automobilhersteller mit dem 3D-Druck. In Bezug auf die kundenindividuelle Fertigung bieten sich durch den 3D-Druck viele Möglichkeiten, allerdings ist die Großserienfertigung momentan noch schwer zu bewerkstelligen, wenn lediglich auf additive Fertigungsverfahren zurückgegriffen wird. Eine kombinierte Anwendung von additiven und konventionellen Herstellungsverfahren ist eine gangbare Lösung, um die Wettbewerbsfähigkeit von Automobilherstellern zu steigern.

# 1. Problemstellung und Zielsetzung

In konventionellen Supply Chains tragen mehrere Unternehmen durch produktive Arbeitsteilung zur Wertschöpfung eines Produkts bei. Transport- und Lagerkosten sind dabei treibende Faktoren der Gesamtkosten in der Supply Chain.<sup>1</sup> Davon sind Automobilhersteller, die über globale Supply Chains verfügen, in besonderem Maße betroffen. In Anbetracht der zunehmenden Dynamik und Komplexität der Umwelt sowie eines erhöhten Wettbewerbsdrucks leistet der Einsatz innovativer Technologien einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Produktivität und zur Verbesserung der Supply Chain eines Unternehmens.<sup>2</sup> Durch den 3D-Druck als eine solche innovative Technologie kann die Supply Chain neu gedacht werden, indem bisherige Wertschöpfungsstufen der Automobilindustrie umgangen werden.<sup>3</sup> Nicht umsonst wird der 3D-Druck als eine wesentliche Komponente einer Industrie 4.0 betrachtet.

Der 3D-Druck, auch *additive Fertigung* genannt, beschreibt den Aufbau dreidimensionaler Objekte aus einem oder mehreren Materialien mittels physikalischen oder chemischen Schmelz- oder Härtingsverfahren. Der schichtweise, additive Aufbau ist dabei das entscheidende Merkmal. Dazu bildet ein computergeneriertes CAD-Modell die Druckvorlage.<sup>4</sup> 3D-Druck zeichnet sich sowohl im Hinblick auf das Druckverfahren als auch auf die verwendeten Materialien durch eine große Vielfalt aus.<sup>5</sup> Mithilfe des 3D-Drucks können komplexe Strukturen relativ einfach und in guter Qualität hergestellt werden, so dass sich vielfältige Anwendungsbereiche ergeben. Genutzt wird das Verfahren heute schon gerne, um relativ unkompliziert Prototypen herzustellen.<sup>6</sup> Große Automobilhersteller wie BMW sehen für die Zukunft auch ein großes Potenzial in der Serienproduktion. Kunden sollen die Möglichkeit bekommen, Fahrzeugteile nach individuellen Vorstellungen und Wünschen anzufertigen und dadurch einen Mehrwert erhalten.<sup>7</sup> Die ohnehin schon hohe Anzahl an gefertigten Varianten, die in den vergangenen Jahren aufgrund der

---

<sup>1</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 8

<sup>2</sup> Vgl. Zanker et al. (2013), S. 35

<sup>3</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 8

<sup>4</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 7

<sup>5</sup> Vgl. ebd., S. 8

<sup>6</sup> Vgl. Lipson et al. (2014), S. 44

<sup>7</sup> Vgl. <https://www.bmw.com/de/innovation/3d-druckerei.html>

Ausdifferenzierung der Produktpalette entstanden sind, ließe sich damit weiterhin steigern.<sup>8</sup> Zugleich sind große Automobilhersteller mit globalen Supply Chains einer Vielzahl von Risiken ausgesetzt, wie z.B. Versorgungsunterbrechungen, Versorgungsverspätungen, Bedarfsschwankungen, Preis- und Wechselkursrisiken und Qualitätsschwankungen. Der 3D-Druck könnte hierzu eine mögliche (Teil-)Lösung anbieten.<sup>9</sup> Die technischen Herausforderungen des 3D-Drucks dürfen allerdings nicht außer Acht gelassen werden, so dass sich auch die Frage stellt, inwieweit dieses Fertigungsverfahren für eine kundenindividuelle Massenproduktion geeignet ist.

Es wird in dieser Arbeit der Frage nachgegangen, welche Chancen und Herausforderungen sich für Automobilhersteller unter besonderer Berücksichtigung der Wertschöpfungskette durch die Anwendung des 3D-Drucks ergeben. So ist auch die Wertschöpfungskette der Automobilindustrie und die Änderung, die es durch den 3D-Druck erfährt, Gegenstand der Betrachtung. Die Forschungsfrage soll im Rahmen einer Literaturlarbeit bearbeitet und beantwortet werden. Dafür werden relevante wissenschaftliche Bücher, aber auch Fachzeitschriften und Onlinequellen im Hinblick auf die Forschungsfrage gesichtet und ausgewertet, um Chancen und Herausforderungen des 3D-Drucks für Automobilhersteller aufzuzeigen. Hierfür werden im zweiten Kapitel Grundlagen zum 3D-Druck erläutert und diese Fertigungsweise im Kontext von Industrie 4.0 betrachtet. Kapitel 3 befasst sich mit der technischen Seite des 3D-Drucks. Eine Übersicht dominierender 3D-Druckverfahren sowie Materialien wird dargestellt. Kapitel 4 gibt die unterschiedlichen Anwendungsebenen des 3D-Drucks wieder. Im fünften Kapitel wird die Ausgangssituation von Automobilherstellern in Hinblick auf die Wertschöpfung beschrieben. Anschließend sollen Chancen und Herausforderungen beim Einsatz des 3D-Drucks für Automobilhersteller aufgezeigt werden. Dabei werden auch Beispiele und Erfahrungen von Automobilunternehmen vorgestellt, die einige Möglichkeiten dieser Technologie ausgelotet haben. Im letzten Kapitel erfolgt eine Abschlussbetrachtung.

---

<sup>8</sup> Vgl. Schade et al. (2014), S. 147

<sup>9</sup> Vgl. Thissen (2019), S. 30



---

## 2. Einordnung des 3D-Drucks

### 2.1 Grundlagen

Im Jahr 1984 hat der US-amerikanische Erfinder und Ingenieur Chuck Hull das erste Patent für ein 3D-Druckverfahren eingereicht. Das Patent beinhaltet einen Drucker, der auf Basis eines digitalen CAD-Modells einen Kunststoff schmilzt und in dünnen Schichten aufträgt, um damit ein dreidimensionales Objekt zu erzeugen. Seitdem hat sich die Technologie in Bezug auf Qualität, der Geschwindigkeit und den einsatzfähigen Materialien deutlich weiterentwickelt und wird infolgedessen auch zunehmend interessanter für die industrielle Fertigung. Viele Unternehmen haben das Potenzial des 3D-Drucks erkannt und widmen sich den technischen Möglichkeiten und Herausforderungen sowie den Produkt- und Prozessinnovationen, die hervorbracht werden können.<sup>10</sup>

Der Begriff *3D-Druck*, auch *additive Fertigung* genannt, kann heute als Oberbegriff für verschiedene Technologien bzw. additive Fertigungsverfahren verstanden werden. Dabei werden dreidimensionale Objekte aus einem oder mehreren Materialien mittels physikalischen oder chemischen Schmelz- oder Härtingsverfahren aufgebaut. Im Gegensatz zur *subtraktiven Fertigung*, bei dem die gewünschte Form durch Zerspanen bzw. das mechanische Abtragen von Material unter Zuhilfenahme von Werkzeugen erreicht wird, zeichnet sich die additive Fertigung durch das schichtweise Hinzufügen und Auftragen von Material aus, also durch einen additiven Aufbau. Daneben existiert noch die Gruppe der *formativen Fertigung*, bei dem ein Ausgangsmaterial durch den Einsatz mechanischer Kraft und formgebender Werkzeuge in eine bestimmte Form gebracht wird. Das Spritzgießen und das Schmieden sind Beispiele dieses Verfahrens.<sup>11</sup>

Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein Verfahren des 3D-Drucks mit Kunststoff, um das Prinzip zu verdeutlichen. Der Kunststoff liegt zunächst als Druckfilament vor und wird in dieser Form dem Druckkopf von oben zugeführt. Das Heizelement des Druckkopfs bringt das Filament zum Schmelzen. Anschließend wird der verflüssigte Kunststoff

---

<sup>10</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 3

<sup>11</sup> Vgl. Feldmann et al. (2017), S. 18

über eine bewegliche Düse auf einem beheizten Druckbett schichtweise aufgetragen und somit ein dreidimensionales Objekt erzeugt.

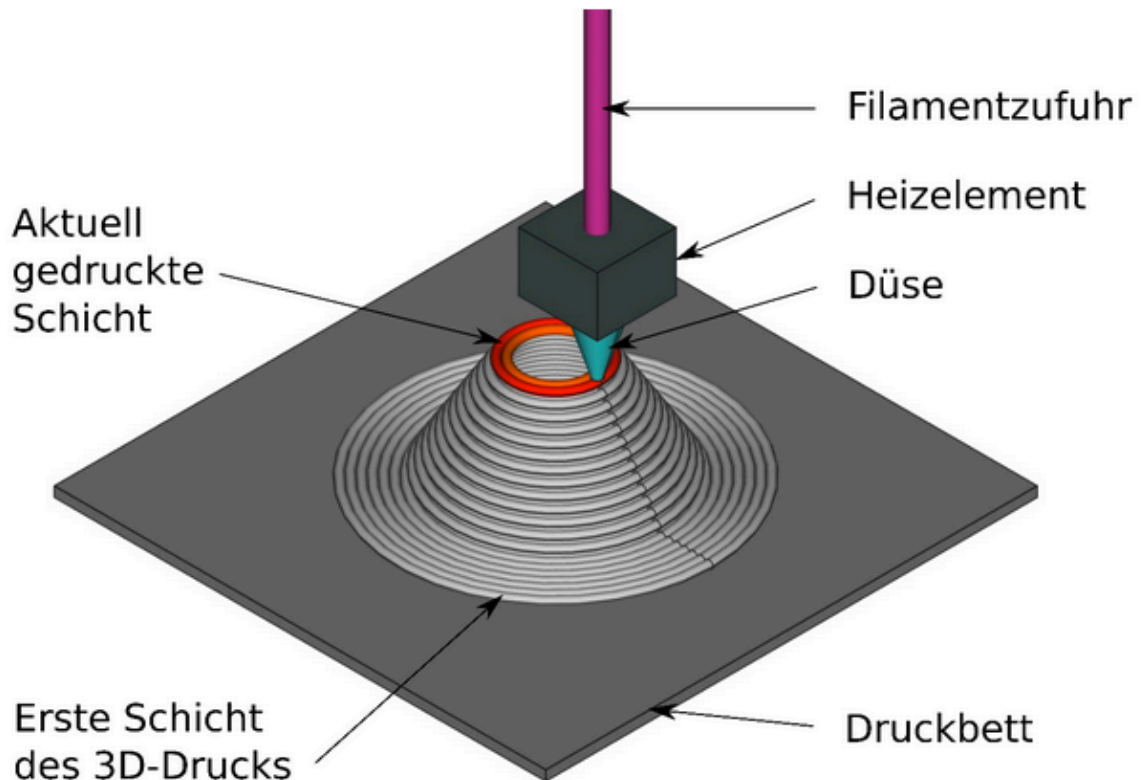


Abbildung 1: Prinzip des 3D-Drucks

(Quelle: [https://3d-erleben.kultus-bw.de/Lde/Startseite/3D-Druck/Fused+Deposition+Modeling+\\_FDM\\_](https://3d-erleben.kultus-bw.de/Lde/Startseite/3D-Druck/Fused+Deposition+Modeling+_FDM_))

Neben großen Industrieunternehmen, beschäftigen sich bereits auch viele kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in Deutschland mit dem Einsatz von 3D-Druckern.<sup>12</sup> Die Erfahrung im Umgang mit der Technologie wächst rasant. So haben laut einer Studie der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft Ernst & Young im Jahr 2019 63% der deutschen Unternehmen Erfahrungen mit 3D-Druck gesammelt. Drei Jahre zuvor waren es noch 37%. Die hohe Aktivität lässt sich auf den Umstand zurückführen, dass der 3D-Druck vielfältige Möglichkeiten für Branchen bietet, in denen die deutsche Wirtschaft stark vertreten ist, beispielsweise die Medizintechnik, der Maschinen- und Anlagenbau oder die Automobilindustrie.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 4

<sup>13</sup> Vgl. EY's Global 3D Printing Report 2019, S. 4

## 2.2 3D-Druck im Kontext von Industrie 4.0

Der Begriff *Industrie 4.0* wurde in Deutschland im Jahr 2011 geprägt und beschreibt die vierte industrielle Revolution.<sup>14</sup> Nach der Mechanisierung, der Elektrifizierung und der Automatisierung als Antriebskräfte früherer industrieller Revolutionen steht nun die Vernetzung von klassischen Prozessen und Produkten mit modernsten Informations- und Kommunikationstechnologien im Mittelpunkt. Die daraus resultierenden intelligenten Fabriken, auch *Smart Factories* genannt, versprechen eine Steigerung der Produktivität in Verbindung mit einer hohen Flexibilisierung der Fertigung mithilfe der Technologien des Internets. In diesem Zusammenhang wird auch vom *Internet der Dinge* gesprochen.<sup>15</sup>

In der Regel lassen sich mit individualisierten (Massen-)produkten höhere Margen als mit klassischen Serienprodukten erzielen. Die Umsetzung einer hochgradigen Individualisierung setzt allerdings eine fortschrittliche Produktionsinfrastruktur voraus.<sup>16</sup> Hierzu bilden cyber-physische Systeme (CPS) wichtige Bausteine einer Industrie 4.0, also Objekte, Geräte, Lager- und Transportmittel, Produktionsanlagen und Gebäude mit eingebetteten speicher-, datenverarbeitungs- und kommunikationsfähigen Systemen. Diese Systeme kommunizieren über das Internet, können auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zugreifen und über einer Vielzahl von Sensoren den aktuellen Zustand erfassen sowie über Aktoren physisch auf ihre Umgebung einwirken. In einer solchen Produktionsumgebung, die in der Lage ist, Komplexität zu beherrschen und auf kundenindividuelle Wünsche eingehen sowie Einzelstücke rentabel produzieren kann, dominieren vernetzte Maschinen, Roboter und 3D-Drucker.<sup>17</sup>

Für den Einsatz von 3D-Druckern in der Serienfertigung ist nach Ansicht von Feldmann et al. neben der Luftfahrt- und der Elektronikindustrie, die Automobilindustrie in besonderem Maße prädestiniert.<sup>18</sup> Dort wird der 3D-Druck bislang gerne für die Herstellung von Prototypen verwendet. Daneben gewinnt der 3D-Druck im Bereich der

---

<sup>14</sup> Vgl. Schönsleben (2016), S. 40

<sup>15</sup> Vgl. Glück (2016), S. 12

<sup>16</sup> Vgl. Schmertusch (5/2018), S. 69

<sup>17</sup> Vgl. Jodin et al. (2017), S. 133

<sup>18</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 8f.

Serienproduktion immer mehr an Bedeutung und kann sich in einer Industrie 4.0-Umgebung ganz entfalten. Die Anpassungsfähigkeit an individuelle Kundenwünsche durch eine große Variantenvielfalt und damit einhergehend die effiziente Produktion kleiner Stückzahlen bis hin zur Losgröße 1 stellen große Herausforderungen an Produktionsunternehmen dar und sind somit essenzielle Ziele von Industrie 4.0. Zur Erreichung dieser Ziele stellt der 3D-Druck ein wichtiges Element dar.<sup>19</sup> Die Implementierung von Industrie 4.0-Konzepten knüpft an die fortschreitende Digitalisierung von Prozesselementen an. So ist es beispielsweise durch den Einsatz von 3D-Druckern möglich, kurzfristig neue Gussformen am Standort der Spritzgießmaschine herzustellen, indem die Daten des Druckobjekts an den 3D-Drucker übermittelt werden.<sup>20</sup>

Die Idee von dezentralen und sich selbst organisierenden Steuerungseinheiten und Fertigungssystemen ist ein wichtiges Merkmal von Industrie 4.0. Bislang wurde ein zentraler und hierarchischer Ansatz gewählt, der nun allerdings als nicht ausreichend flexibel angesehen wird, um einer immer komplexer werdenden Umwelt gerecht zu werden. Grundvoraussetzung hierfür ist eine möglichst umfassende Vernetzung der Produktionseinheiten untereinander.<sup>21</sup> Die Vernetzung generiert einen enormen Austausch an Daten. Durch die Echtzeitanalyse von *Big Data*, also jener großen Datenmengen, aus der laufenden Prozessüberwachung resultieren schnelle Reaktionszeiten und eine verbesserte Nutzung von Ressourcen bzw. eine Reduktion von Verschwendung. Zudem können durch eine datengetriebene, vorrausschauende Wartung kritische Maschinenbauteile rechtzeitig ersetzt und damit kostspielige Stillstände vermieden werden. Im Zuge von Industrie 4.0 spricht hier Glück von Wertschöpfungssteigerungen von 30% in Produktion und Logistik und einer Verringerung der Time-to-Market von bis zu 50%. Der Begriff *Time-to-Market* beschreibt die Zeitspanne von der Entwicklung eines Produkts bis zu seiner Marktreife.<sup>22</sup> Der 3D-Druck befähigt Produktionsunternehmen diese Zeitspanne zu senken und an Wettbewerbsfähigkeit zu gewinnen.

---

<sup>19</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 67

<sup>20</sup> Vgl. Baumann et al. (2017), S. 194

<sup>21</sup> Vgl. Glück (2016), S. 14

<sup>22</sup> Vgl. Glück (2016), S. 21

## 3. Technologie des 3D-Drucks

### 3.1 Druckprozess

Die Ausprägung des Druckprozesses beruht sehr stark auf das eingesetzte Verfahren und dem konkreten Anwendungsfall. In diesem Kapitel soll dennoch eine allgemeinverständliche Definition der Prozesskette erarbeitet werden. Der Druckprozess lässt sich, trotz anwendungsspezifischen Faktoren, auf einige wesentliche Schritte herunterbrechen.

Wie in Abbildung 2 erkennbar, beginnt der Prozess mit der rechnergestützten Erzeugung einer Bauteilgeometrie mit einem CAD-Programm.<sup>23</sup> Dabei ist zu sagen, dass sich CAD-Programme nicht nur für die Erstellung digitaler Druckmodelle eignen, sondern darüber hinaus bei der Anwendungssimulation des fertigen 3D-Objekts eine nützliche Hilfestellung bieten. Auf diese Weise lässt sich bereits am Druckmodell erkennen, wie sich das Bauteil im Betrieb verhalten wird. Anhand dieser gewonnenen Daten und Erkenntnisse, kann eine Verbesserung der Geometrie vorgenommen werden, um die Leistungsfähigkeit des gedruckten Bauteils zu steigern.<sup>24</sup>

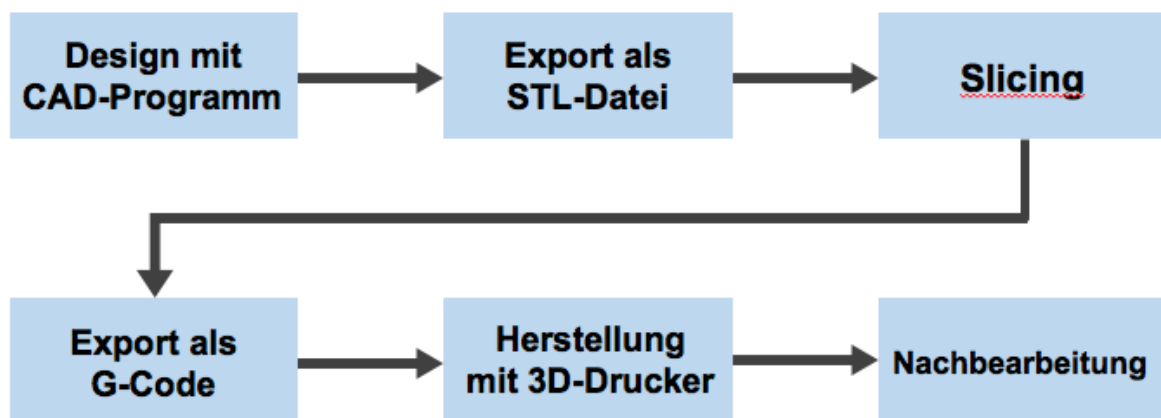


Abbildung 2: Prozess des 3D-Drucks (Quelle: Eigene Darstellung)

<sup>23</sup> Vgl. Arndt et al. (2018), S. 4

<sup>24</sup> Vgl. Gärtner et al. (5/2018), S. 50f.

Das fertige CAD-Modell wird als STL-Datei ausgegeben.<sup>25</sup> Neben der Erfindung des ersten 3D-Druckers definierte der Ingenieur Chuck Hull auch die STL-Schnittstelle, die für eine Kommunikation zwischen CAD-Programm und 3D-Drucker notwendig ist und einen Industriestandard darstellt.<sup>26</sup> Die Bedeutung des Akronyms *STL* ist in der Literatur nicht ganz so eindeutig. Es existieren verschiedene Namen, wie etwa *Surface Tessellation Language*, *Standard Triangulation Language* oder *Standard Tessellation Language*. Die STL-Datei eines Objekts besteht aus mehreren Punkten, die sich auf der Oberfläche des CAD-Modells befinden. Die Punkte werden zu Dreiecken verbunden, die die Oberfläche des Objekts bestimmen. Dieser Vorgang wird auch *Triangulation* genannt und ist in Abbildung 3 von links nach rechts mit einer immer feineren Auflösung dargestellt. Die Dreiecke beinhalten zudem die Information, was Vorder- und Rückseite ist. Auf diese Weise wird das Objekt eindeutig beschrieben. Dabei werden gekrümmte und runde Formen durch Dreiecke nur angenähert. Die Qualität des ausgedruckten Objekts wird dadurch nicht wesentlich gemindert, da die Genauigkeit einer STL-Datei im Allgemeinen höher ist als die Auflösung des 3D-Druckers.

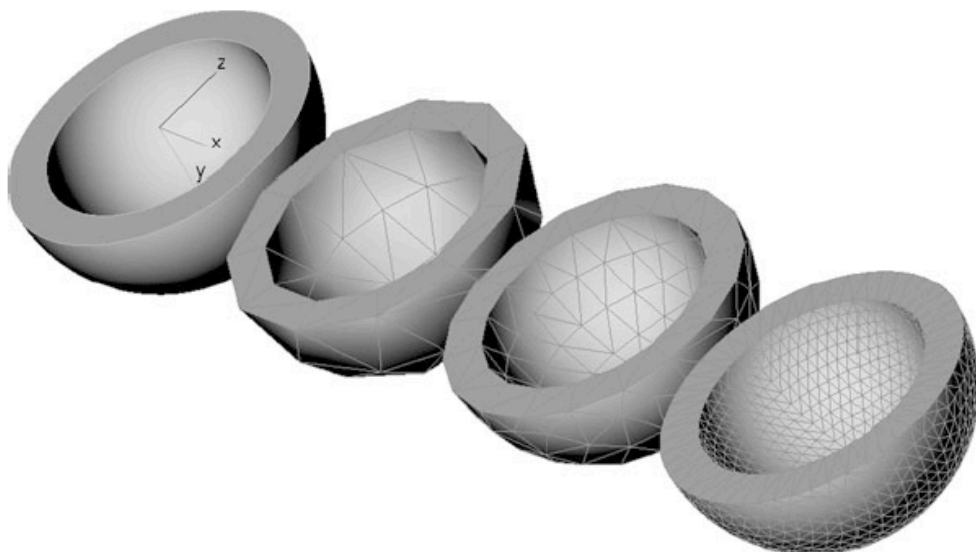


Abbildung 3: Triangulation eines CAD-Modells (Quelle: Fastermann (2016) S. 14)

Eine STL-Datei kann allerdings in dieser Form noch nicht an den 3D-Drucker gesendet werden, da der Drucker das Objekt aufgrund weiterhin fehlender Informationen noch

<sup>25</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 28

<sup>26</sup> Vgl. ebd., S. 13

nicht korrekt herstellen würde. Da das Modell schichtweise gedruckt wird, benötigt man noch ein Programm, das das CAD-Modell in einzelne Schichten zerlegt. Diesen Arbeitsschritt übernimmt eine Slicing-Software (von engl. *slice*, zu Deutsch *Scheibe*). Mithilfe eines solchen Programms werden die Parameter für die Schichtdaten festgelegt und weitere Informationen für den Druckprozess erzeugt. Wie Abbildung 4 zeigt, lässt sich mit der Slicing-Software auch die Dichte der inneren Füllung eines gedruckten Objekts bestimmen. Je höher die Dichte gewählt wird, desto stabiler wird das gedruckte 3D-Objekt. Aus der Slicing-Software heraus exportiert man einen G-Code, womit dann der 3D-Drucker angesteuert werden kann. G-Code ist ein Format, das auch von CNC-Maschinen verwendet wird.<sup>27</sup> Mittels einer USB-Schnittstelle, per WLAN oder einer SD-Karte wird der G-Code schließlich an den 3D-Drucker übertragen, wo der Bauprozess vorbereitet und durchgeführt wird.

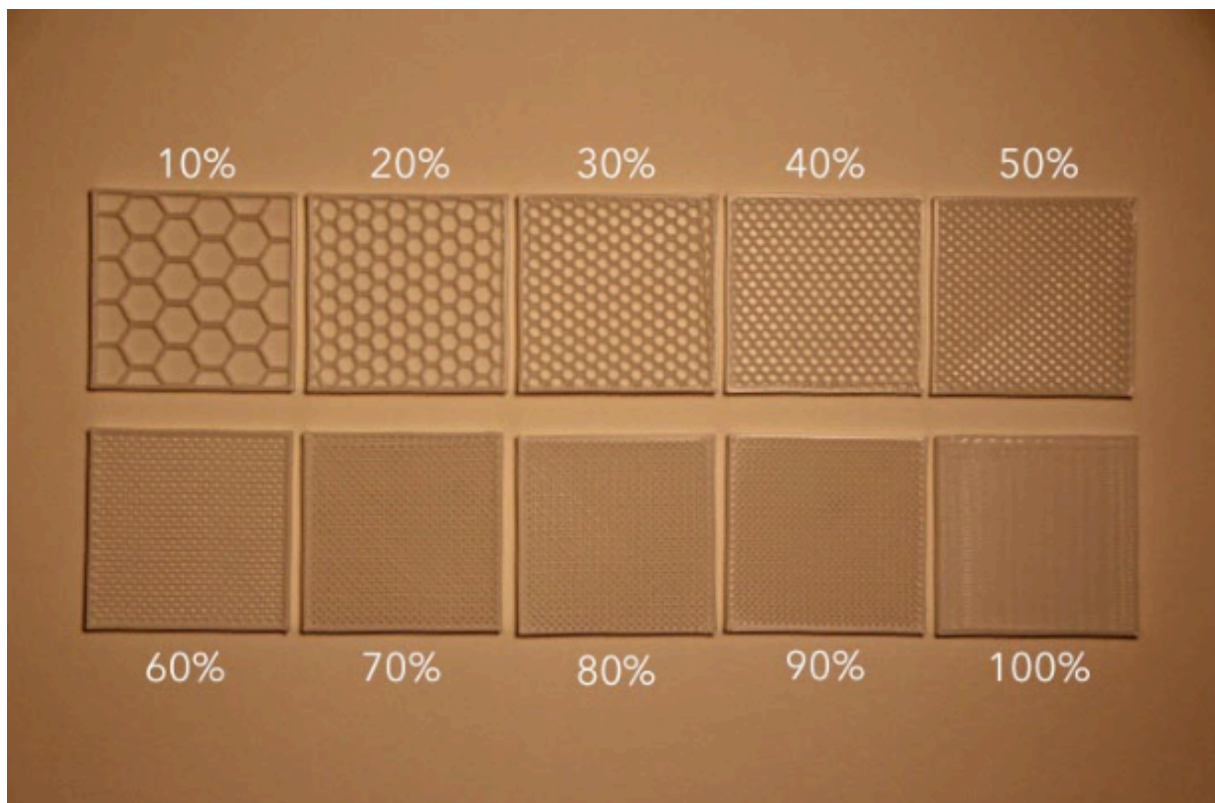


Abbildung 4: Unterschiedliche Dichten der Innenfüllung in Prozent  
(Quelle: <http://enablingthefuture.org/2014/11/13/tech-talk-thursday-intro-to-3d-printing/>)

<sup>27</sup> Vgl. Sommer (2018), S. 28f.

Einige 3D-Druckverfahren verwenden Stütz- bzw. Supportstrukturen, um das Druckobjekt während des eigentlichen Bauvorgangs zu stabilisieren, da nicht einfach in die Luft gedruckt werden kann. Abbildung 5 veranschaulicht den Einsatz dieser gitterförmigen Stützstrukturen, die ebenfalls gedruckt werden.



Abbildung 5: Bauteil mit Stützstrukturen

(Quelle: <https://www.materialise.com/de/cases/volum-e-Reduces-Metal-Support-Removal-e-Stage>)

Stützstrukturen werden auch benötigt, wenn sich ein 3D-Objekt aus flüssigem Kunststoff nach oben hin ausdehnt. Dann besteht aufgrund der Schwerkraft die Gefahr, dass das Material nicht mehr in Form bleibt, wenn der Überhangswinkel zu steil ist. Abbildung 6 verdeutlicht, dass ein Überhangswinkel kleiner oder gleich  $45^\circ$  unproblematisch ist. Bei mehr als  $45^\circ$  würde der flüssige Kunststoff beginnen nach unten abzusinken. Die Gefahr des Absinkens bleibt groß, solange die Bauteile noch nicht ihre Endfestigkeit erreicht haben.<sup>28</sup> Das lässt sich nur durch Stützmaterial verhindern. Als Stütze lässt sich dasselbe Material verwenden, mit dem das eigentliche 3D-Objekt auch gedruckt wird. Abhängig vom 3D-Drucker kann aber auch ein lösliches Stützmaterial gewählt werden. Die Berechnung des Stützmaterials ist eine weitere Aufgabe der Slicing-Software.<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Vgl. Berger et al. (2017), S. 20

<sup>29</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 32f.



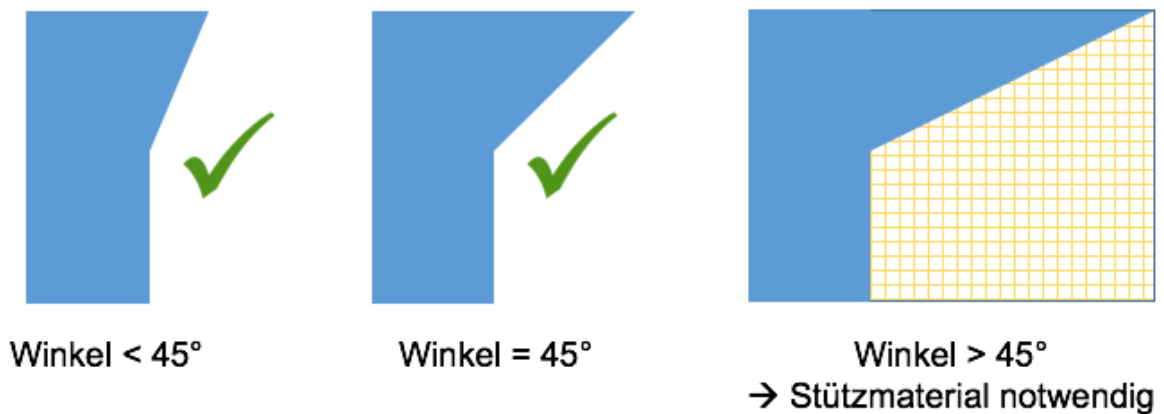


Abbildung 6: Unterschiedliche Überhangswinkel (Quelle: Eigene Darstellung)

Wenn Stützstrukturen benötigt wurden, erfordern die gedruckten 3D-Objekte in der Regel eine Nachbearbeitung, um das Material zu entfernen. Das gilt sowohl für festes als auch für lösliches Stützmaterial. Bei festem Stützmaterial muss das gedruckte Bauteil im Nachhinein gegebenenfalls noch durch Schleifen geglättet werden. Bei löslichen Stützmaterialien lässt sich das Material hingegen durch Einsatz von Chemikalien auflösen. Bei komplizierten inneren Strukturen kann es daher schwierig sein, das Material restlos zu entfernen, ohne das Modell zu beschädigen.<sup>30</sup>

Es kann festgestellt werden, dass für eine wirtschaftliche Interpretation des 3D-Drucks nicht nur die Gestaltungsphase mit dem CAD-Programm und der eigentliche Druckprozess des Bauteils in die Überlegung miteinbezogen werden muss, sondern auch die Phase der Nachbearbeitung.<sup>31</sup>

<sup>30</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 34

<sup>31</sup> Vgl. Kosche (2018), S. 174

## 3.2 Übersicht der dominierenden Druckverfahren

Im 3D-Druck existiert eine breite Vielfalt an Verfahren, die sich bzgl. Fertigungsweise und der verwendeten Materialien unterscheiden. Grundsätzlich lassen sich zwei Druckkonzepte unterscheiden:

1. *Selective Deposition-Drucker* lagern das Material selektiv ab. Sie spritzen, sprühen oder drücken Flüssigkeiten, Pasten oder pulverisierte Werkstoffe durch Spritzen oder Düsen, um das Material in der gewünschten Form schichtweise aufzubauen.
2. *Selective Binding-Drucker* benutzen einen Laser oder Bindemittel, um das flüssige oder pulverförmige Material schichtweise in die gewünschte Form zu schmelzen, zu härten oder zu binden. So wird das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut.<sup>32</sup>

Im Folgenden werden die gegenwärtig dominierenden Verfahren Stereolithografie (SLA), Fused Filament Fabrication (FFF), Selektives Lasersintern (SLS) und das Pulverdruckverfahren (3DP) vorgestellt und verglichen.

### 3.2.1 Stereolithografie (SLA)

Das Stereolithografie-Verfahren wurde einst von Chuck Hull entwickelt und ist das älteste aller 3D-Druckverfahren. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, befindet sich ein flüssiges Photopolymer in einem Becken. Diese photopolymere Flüssigkeit, die meistens ein synthetisch hergestelltes Harz ist, härtet unter der Einwirkung von Licht aus.<sup>33</sup> Meistens sind ultraviolette Lichtquellen dazu notwendig, aber es werden auch immer mehr Kunstharze angeboten, die ebenfalls mit sichtbarem Licht verarbeitet werden können. Ein Laserstrahl, der über ein bewegliches Spiegelsystem geführt wird, tastet die Oberfläche des flüssigen Kunstharzes ab. Dabei erhärtet das Harz an den

---

<sup>32</sup> Vgl. Lipson et al. (2014), S. 78

<sup>33</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 35

vom Laser berührten Stellen.<sup>34</sup> Danach wird die Hebebühne um die Dicke eines Layers, also einer erhärteten Schicht, abgesenkt und das flüssige Kunstharz fließt über die bereits ausgehärtete Schicht, so dass der Vorgang wiederholt werden kann. Auf diese Weise wird das Objekt schichtweise aufgebaut.

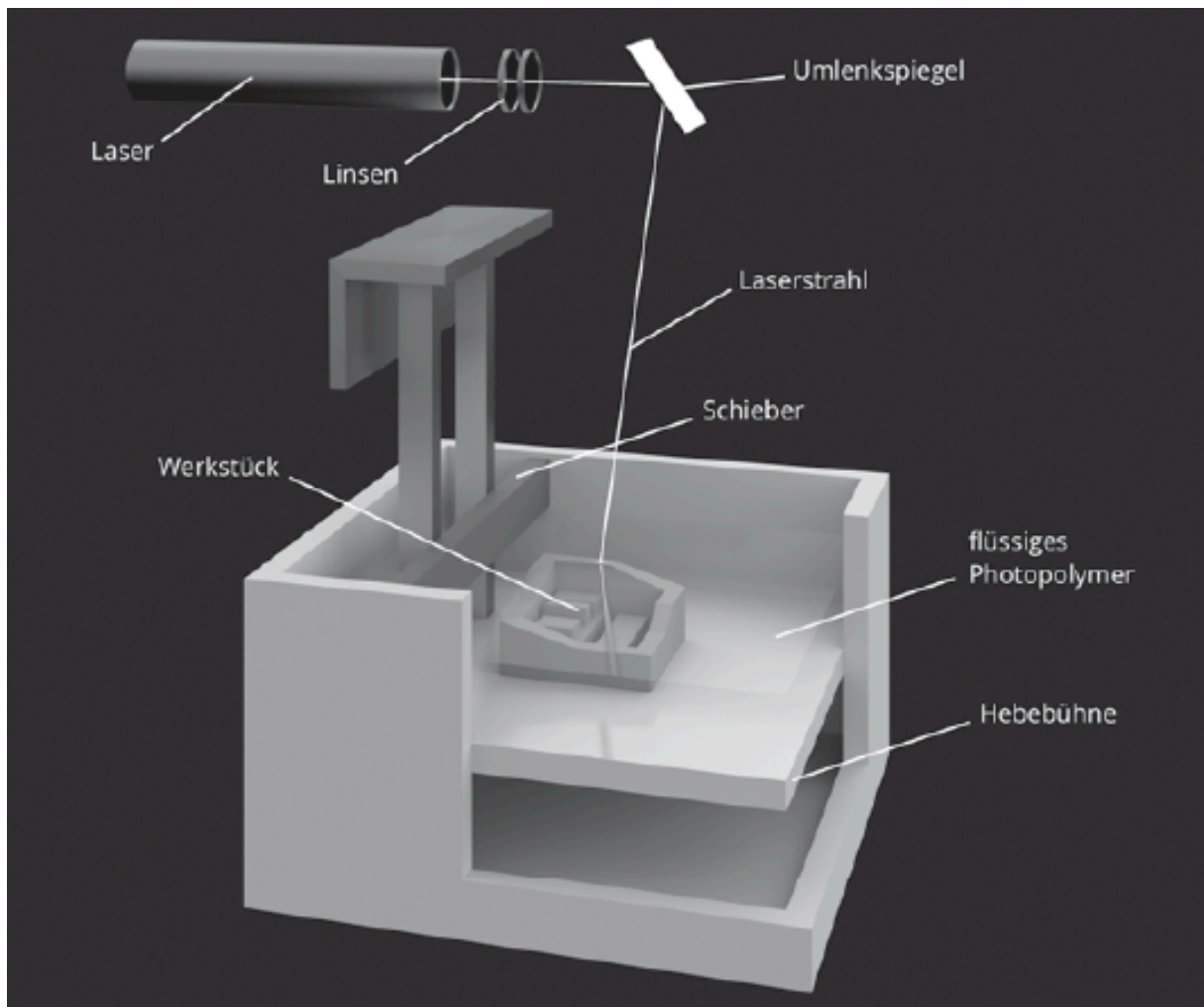


Abbildung 7: Schematische Zeichnung des SLA-Verfahrens (Quelle: Hagl (2015) S. 21)

Um Überhänge zu erzeugen, werden Stützstrukturen benötigt, welche im Nachgang entfernt werden müssen. Nach der kompletten Durchführung des Drucks, muss das 3D-Objekt oftmals noch in einem separaten Arbeitsvorgang nachgehärtet werden.<sup>35</sup> Das Stereolithografie-Verfahren ermöglicht sehr feine Auflösungen mit einer sehr guten Oberflächenqualität. In erster Linie werden mit diesem Verfahren Kunststoffe und Kunstharze verarbeitet.<sup>36</sup>

<sup>34</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 19

<sup>35</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 35f.

<sup>36</sup> Vgl. Berger et al. (2017), S. 136

### 3.2.2 Fused Filament Fabrication (FFF)

Fused Filament Fabrication, auch Schmelzschichtung oder thermoplastische Extrusion genannt, ist ein Fertigungsverfahren, welches ebenfalls Kunststoffe verarbeitet. Eine andere, weit verbreitete Bezeichnung ist Fused Deposition Modeling (FDM). Diese Bezeichnung ist allerdings ein geschützter Markenname des 3D-Druckunternehmens Stratasys Inc.<sup>37</sup>

Bei diesem Verfahren wird flüssiger Kunststoff erhitzt und unter Druck durch eine frei bewegliche Heizdüse auf eine beheizte Plattform extrudiert. Das Material wird als Filament, also in Drahtform oder als Granulat zugeführt. Entsprechend der STL-Datei wird das Objekt Schicht für Schicht aufgebaut. Je nach Modell wird entweder die Düse oder die darunter befindliche Plattform bewegt.

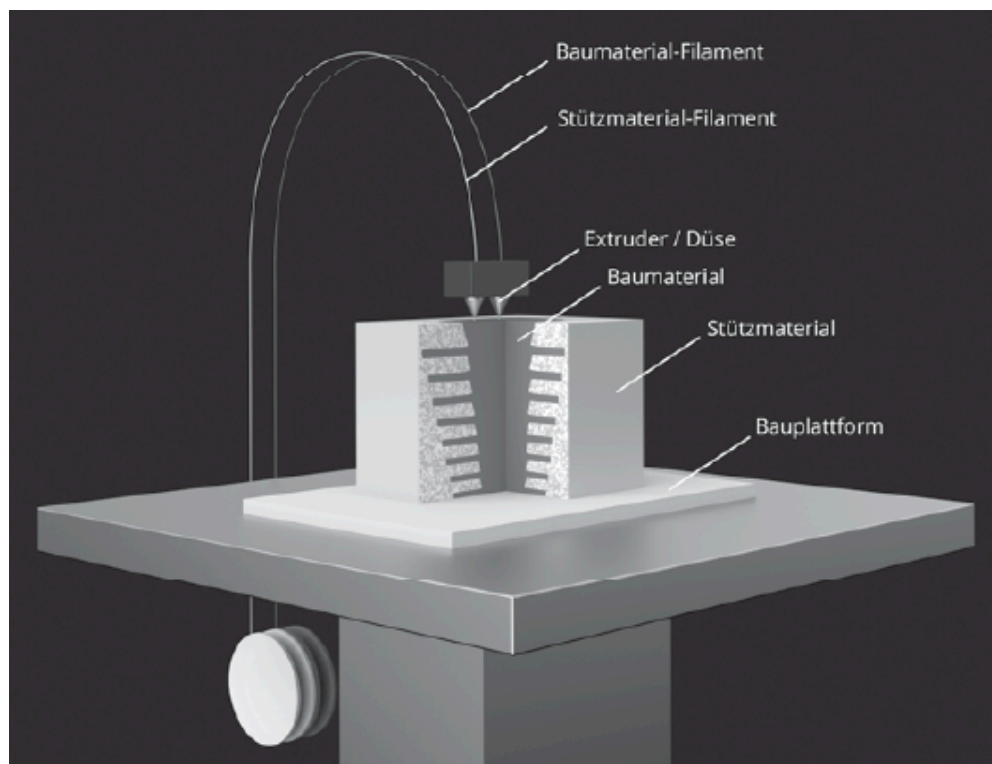


Abbildung 8: Schematische Zeichnung des FFF-Verfahrens (Quelle: Hagl (2015) S. 26)

Die Geschwindigkeit eines solchen Druckers wird dabei an die Zeit angepasst, die das verwendete Material zum Abkühlen und Härten benötigt. Durch das Hinzufügen von

<sup>37</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 25

mehreren Extrudern können Objekte mit mehreren Farben realisiert werden. Wie in Abbildung 8 veranschaulicht wird, sind beim FFF-Verfahren auch Stützstrukturen für Überhänge notwendig.<sup>38</sup> Das FFF-Verfahren zählt zu den günstigsten 3D-Druckverfahren und eignet sich sehr gut zur Erstellung von Prototypen.<sup>39</sup>

### 3.2.3 Selektives Lasersintern (SLS)

Beim Selektiven Lasersintern wird ein Pulverwerkstoff mithilfe eines Hochleistungslasers schichtweise versintert und so zu einem Objekt aufgebaut.<sup>40</sup> Wie in Abbildung 9 zu erkennen, wird wie beim Stereolithografie-Verfahren ein bewegliches Spiegelsystem verwendet, um den Laserstrahl zu lenken.

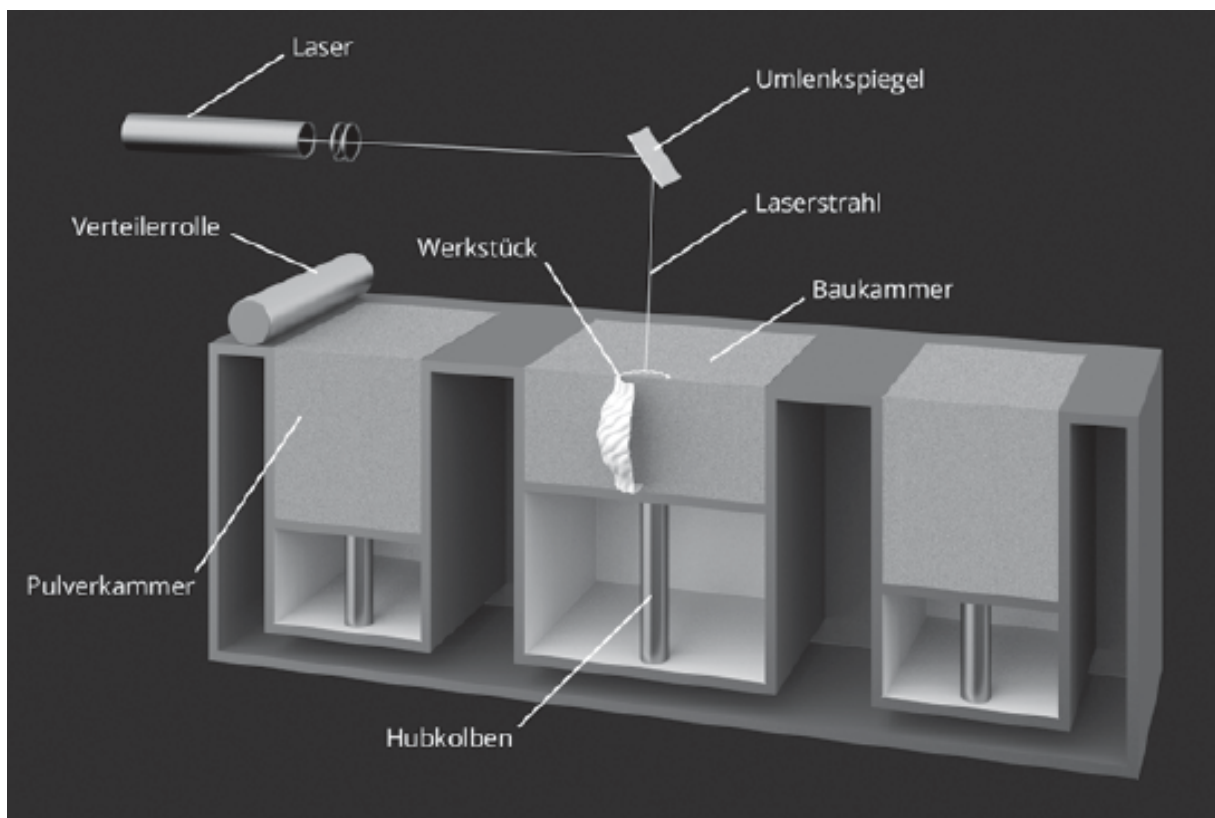


Abbildung 9: Schematische Zeichnung des SLS-Verfahrens (Quelle: Hagl (2015) S. 24)

Der Laserstrahl trifft auf feines Pulver und erhitzt es an den vorgegebenen Stellen soweit, dass die Pulverpartikel flüssig werden und miteinander verschmelzen. Beim

<sup>38</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 26f.

<sup>39</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 62

<sup>40</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 30

Drucken wird der Bauraum anschließend über einen Hubkolben um eine Schichtdicke gesenkt und eine neue dünne Pulverschicht wird mit einer Verteilerrolle auf die vorherige Schicht aufgetragen. Der Vorgang wiederholt sich solange bis das Objekt vollständig hergestellt ist. Es wird kein zusätzliches Stützmaterial benötigt, da in pulververarbeitenden Systemen das ungebundene Pulver die Bauteile stabilisiert.<sup>41</sup>

Da das SLS-Verfahren sich nicht nur für Kunststoffe, sondern auch für Metalle und keramische Materialien eignet, wird es gerne für die Herstellung von Endprodukten verwendet.<sup>42</sup> Im Vergleich zur Stereolithografie sind die Oberflächen der erzeugten Objekte sehr rau und bedürfen einer Nachbehandlung. Das Sintern verleiht dem Objekt bzw. Bauteil eine höhere Festigkeit, jedoch bleibt eine gewisse Porosität erhalten, wobei zu sagen ist, dass in den letzten Jahren große Fortschritte bei der Oberflächenveredelung und der Reduzierung der Porosität erzielt wurde.<sup>43</sup>

Das Selektive Laserschmelzen (SLM) ist dem SLS-Verfahren sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass beim SLM-Verfahren nur Metalle verarbeitet werden und das Pulver nicht gesintert, sondern lokal aufgeschmolzen wird. Auf diese Weise kann eine höhere Dichte des Ausgangsmaterials erreicht werden, wenn dies erwünscht ist.<sup>44</sup>

### 3.2.4 Pulverdruckverfahren (3DP)

Das Pulverdruckverfahren wurde vom *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* entwickelt und ist grundsätzlich mit dem SLS-Verfahren verwandt. Unterschiedlich ist die Materialbearbeitung, denn es wird nicht mit einem Laserstrahl gebrannt, sondern mittels eines Druckkopfs flüssiges Bindemittel in den Fertigungsprozess gegeben.<sup>45</sup> Zuerst wird Pulver schichtweise auf das Druckbett aufgetragen wird. In Abbildung 10 wird aufgezeigt, dass ein Druckkopf ein Bindemittel an die entsprechenden Stellen des Pulvers aufträgt. An diesen Stellen verklebt das Pulver und härtet aus. Danach wird mithilfe einer Verteilerrolle eine neue, dünne Pulverschicht über die Baukammer

---

<sup>41</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 46

<sup>42</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 3

<sup>43</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 24

<sup>44</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 32

<sup>45</sup> Vgl. ebd., S. 29

gezogen. Vor jeder Wiederholung bewegt sich das Druckbett um die Dicke eines Layers nach unten.

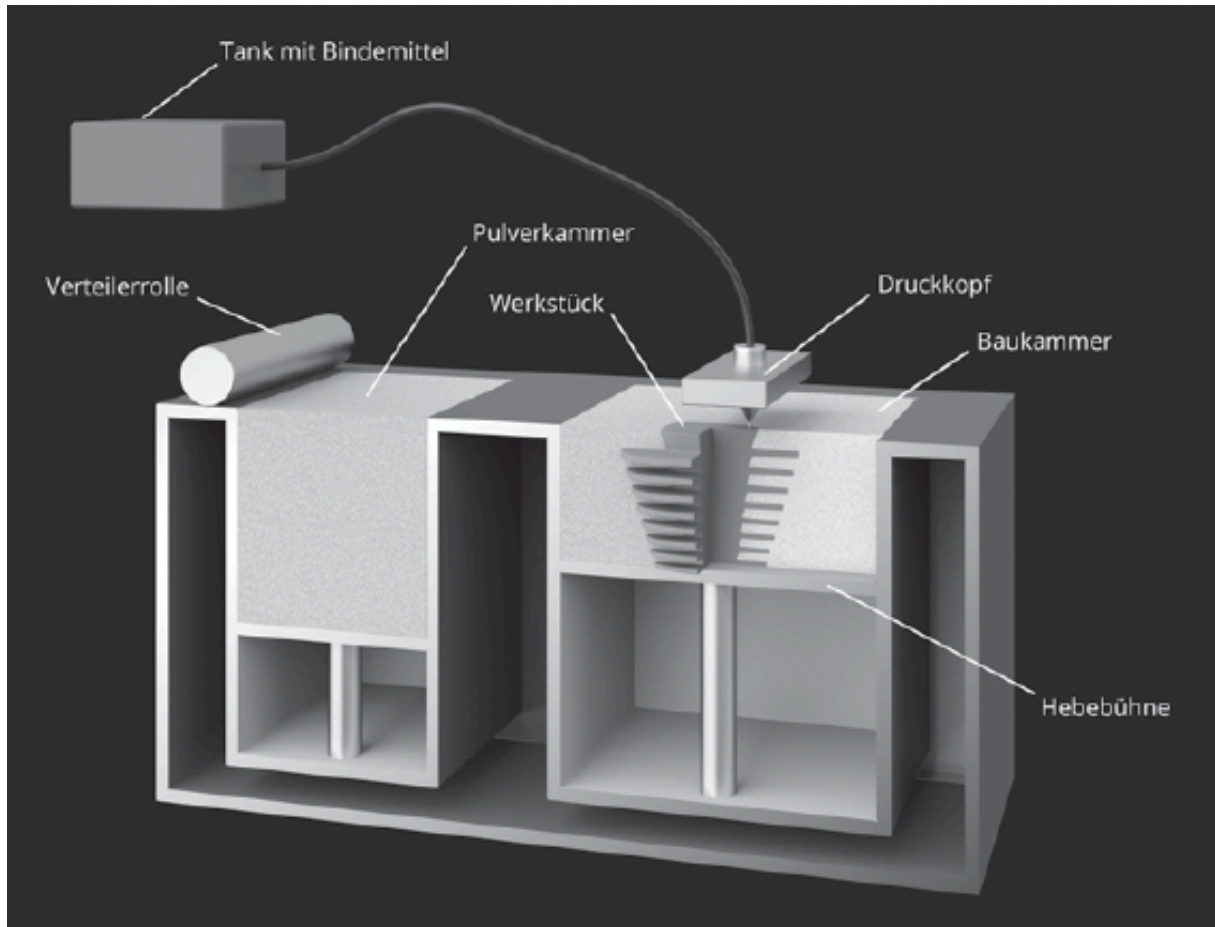


Abbildung 10: Schematische Zeichnung des 3DP-Verfahrens (Quelle: Hagl (2015) S. 30)

Das Pulverdruckverfahren zeichnet sich durch seine relativ schnelle Auftragungsgeschwindigkeit des Materials aus, welches aber zulasten der Belastbarkeit geht. Ähnlich dem SLS-Verfahren ist bei diesem Verfahren kein Stützmaterial erforderlich. Das nicht verklebte Pulver dient als Auflage für die neue Pulverschicht und ist damit automatisch Stützmaterial. Das übrig gebliebene Pulver kann im Anschluss durch Abklopfen oder mit einer Pressluftpistole entfernt werden und steht dem nächsten Druckvorgang zur Verfügung. Neben Kunststoff eignen sich hier Metalle, Gips, Keramik und Glas als Druckmaterialien.<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 41f.

Abbildung 11 veranschaulicht die Merkmale der vorgestellten Verfahren und zeigt auf, dass keine 3D-Drucktechnologie für alle Anwendungen optimal geeignet ist. Jedes der 3D-Druckverfahren bietet individuelle Stärken und Schwächen. Während also beispielsweise das SLS-Verfahren Bauteilen eine hohe Belastbarkeit verleihen kann und gut für die Serienproduktion geeignet scheint, sind glatte und filigrane Oberflächen damit nicht auf Anhieb möglich. Dafür schafft das SLA-Verfahren qualitative Oberflächen, jedoch sind die Bauteile wenig belastbar. Abhängig vom Einsatzbereich und den Randbedingungen, wie etwa Bauteilgröße, Standzeit, Toleranzen, Oberflächenanforderungen und den verarbeiteten Materialien, müssen Kompromisse geschlossen und das geeignete Verfahren ausgewählt werden.<sup>47</sup>

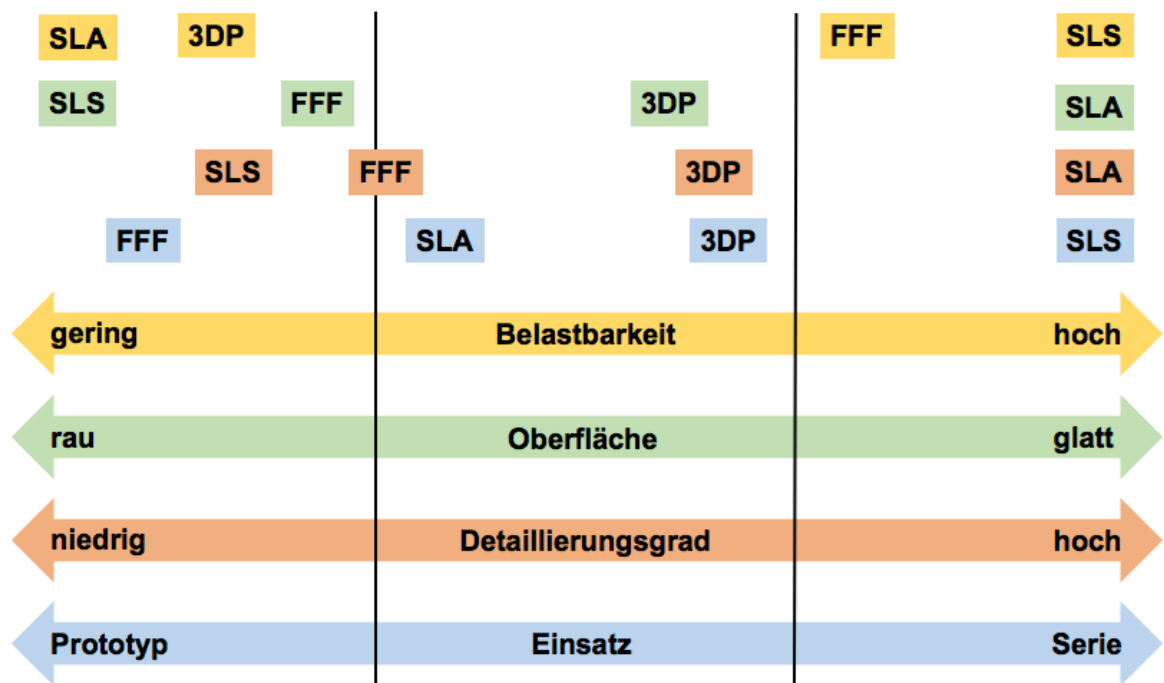


Abbildung 11: Merkmale der 3D-Druckverfahren (Quelle: Eigene Darstellung nach Sommer et al. (2018) S. 61)

Es lässt sich beobachten, dass Unternehmen ein zunehmend tieferes Verständnis für die Leistungsfähigkeiten und Anforderungen unterschiedlicher 3D-Druckverfahren entwickeln, weshalb die Technologie heute sehr gezielt und entsprechend ihrer Vorzüge eingesetzt wird.<sup>48</sup>

<sup>47</sup> Vgl. Pöhler et al. (11/2018), S. 45

<sup>48</sup> Vgl. Stein (4/2018), S. 32



Ein Blick auf Abbildung 12 verrät, dass neben den Merkmalen auch hinsichtlich der Investitionssumme enorme Unterschiede existieren. Der relativ günstige Preis eines FFF-Druckers, macht ihn auch für den Heimgebrauch beliebt.<sup>49</sup> Einige Praxisbeispiele in Kapitel 5 zeigen, dass Automobilhersteller sehr gerne auf das SLS- bzw. SLM-Verfahren setzen.

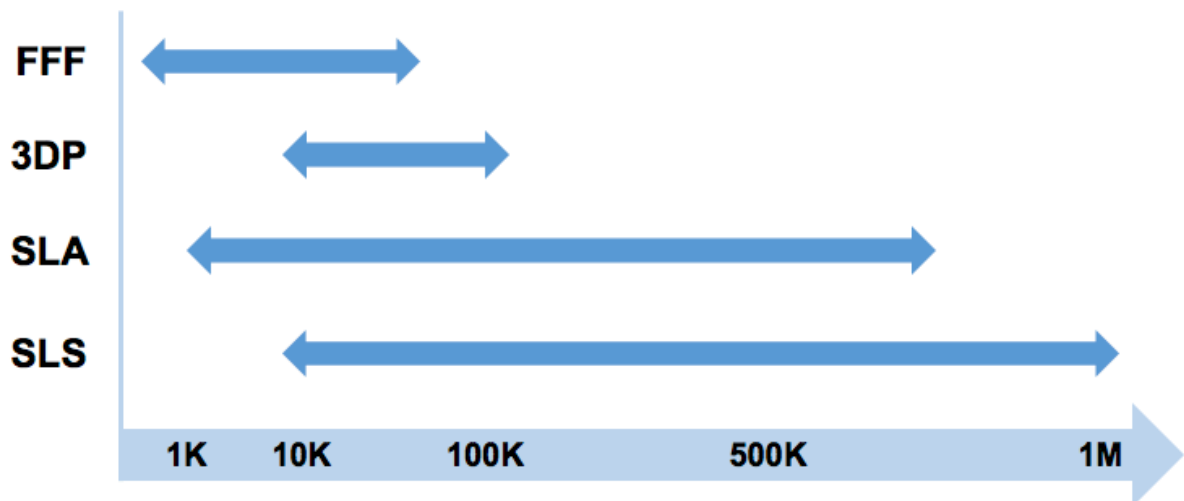


Abbildung 12: Druckerkosten (Quelle: Eigene Darstellung nach Sommer et al. (2018) S. 62)

### 3.3 Materialien

Materialien sind beim 3D-Druck ein zentrales Thema und bestimmen maßgeblich, ob 3D-Drucker für den Verarbeitungsprozess eingesetzt werden können oder nicht. Die Materialforschung hat in den letzten Jahren viele Materialien mit vielfältigen Eigenschaften hervorgebracht, die Quelle neuer Innovationen sein können.<sup>50</sup>

Verwendet können neben Metallen und Kunststoffen auch weitere Materialien wie Keramik, Wachs, Sand oder Gips. Kunststoffe kommen beim 3D-Druck am häufigsten zum Einsatz. Man unterscheidet dabei zwischen Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren. Thermoplaste sind Kunststoffe, die ab einem bestimmten Temperaturbereich zu schmelzen beginnen und sich auf diese Weise verformen lassen. Dabei bleibt ihre innere Beschaffenheit unverändert, d.h. dass sich der Vorgang des Abkühlens und des Erhitzens beliebig oft wiederholen lässt, solange nicht

<sup>49</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 34

<sup>50</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 37

eine thermische Zersetzung des Materials durch eine Überhitzung hervorgerufen wird. Duroplaste verfestigen sich hingegen beim Erhitzen und können anschließend nicht mehr verformt werden. Ihre innere Beschaffenheit verändert sich durch die Wärmeeinwirkung, so dass Duroplaste nicht erneut in eine flüssige Form gebracht werden und ein weiteres Mal verwendet werden können. Elastomere sind formfeste Kunststoffe mit elastischen Eigenschaften. Wirken Zug- oder Druckbelastungen auf Elastomere ein, verformen sie sich elastisch, bevor sie danach wieder in ihre ursprüngliche Gestalt zurückfinden. Elastomere werden oftmals für die Herstellung von Gummiobjekten verwendet, wie etwa Reifen und Dichtungsringen.

In der Anfangszeit des 3D-Drucks konnten nur Kunststoffe, aber keine Metalle verwendet werden. Das war der Grund, weshalb einige Skeptiker den 3D-Druck als neue Technologie zunächst ablehnten, denn in ihren Augen musste eine echte Fertigungsmaschine auch die Fähigkeit besitzen Metall zu verarbeiten. Mittlerweile sind 3D-Drucker in der Lage Stahl, Titan und sogar Wolfram zu drucken, also Hartmetalle die mit herkömmlichen Produktionsmethoden schwer zu formen sind.<sup>51</sup>

Während 3D-Drucker also schon Kunststoff und Metall mit guten Ergebnissen verarbeiten können, bereitet das Drucken von Glas den Herstellern noch große Probleme. Die Applikation über eine Düse bietet bislang die einzige Möglichkeit Glas zu drucken. Jedoch ist die Oberfläche sehr rau, das Objekt sehr porös und voller unerwünschter Hohlräume. Das Interesse am Glasdruck bleibt aber seitens der Automobilindustrie weiterhin groß, insbesondere im Bereich der Beleuchtung, so dass in dieser Richtung mit weiteren Fortschritten zu rechnen ist.<sup>52</sup>

Es bleibt noch zu sagen, dass wenig zur Langlebigkeit und zu Gesundheitsrisiken von 3D-Druckmaterialien bekannt ist, da bisher noch keine Ergebnisse von Langzeitstudien zur Verfügung stehen und verhältnismäßig wenig Erfahrungswerte vorliegen.<sup>53</sup>

---

<sup>51</sup> Vgl. Lipson et al. (2014), S. 93f.

<sup>52</sup> Vgl. Bauer (10/2017), S. 73

<sup>53</sup> Vgl. Hagl (2015), S. 37

## 4. Anwendungsebenen des 3D-Drucks

### 4.1 Rapid Prototyping

In der Produktentwicklung ist der 3D-Druck schon seit Jahrzehnten im Einsatz, da der Druck von Prototypen den positiven Effekt hat, die Zeit von der ersten Idee eines Produkts bis zu seiner Marktreife stark zu verkürzen.<sup>54</sup> Aufgrund der dynamischen Entwicklung auf den Märkten, ist die Produktionszeit für viele Unternehmen ein wichtiger Effizienzmaßstab, den es zu reduzieren gilt. Die Erstellung eines Prototyps mithilfe eines 3D-Druckers ist ein vergleichsweise schnelles und kostengünstiges Verfahren, um zu überprüfen, ob ein Design funktioniert oder nicht. Eine weit verbreitete Dienstleistung von Unternehmen, die auf 3D-Druck spezialisiert sind, ist die Erstellung von Prototypen für Automobilhersteller.<sup>55</sup> Denn vor allem in der Automobilindustrie gilt eine kurze Time-to-Market durch verkürzte Entwicklungszeiten und schnellere Serienreife der Autos als wichtiger Wettbewerbsvorteil.<sup>56</sup> Abbildung 13 verdeutlicht den Zeitgewinn, der durch das Rapid Prototyping im Vergleich mit herkömmlicher Prototypenentwicklung erzielt werden kann.

#### Herkömmliche Prototypenentwicklung



#### Rapid Prototyping

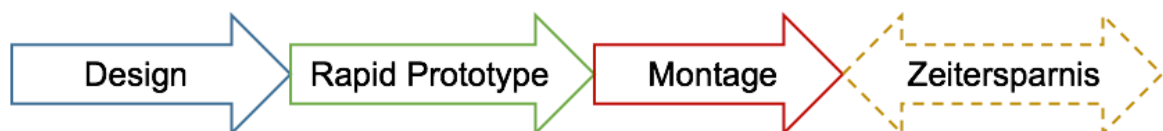


Abbildung 13: Zeitersparnis durch Rapid Prototyping  
(Quelle: Eigene Darstellung nach Berger et al. (2017) S.28)

<sup>54</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 8

<sup>55</sup> Vgl. Lipson et al. (2014), S. 42

<sup>56</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 65

Rapid Prototyping umfasst alle Verfahren, die zu Prototypen, Modellen oder zur Visualisierung von Ideen und Konzepten führen. Zur Anwendungsebene des Rapid Prototypings können zwei Unterebenen festgestellt werden:

1. *Solid Imaging* zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts bzw. einer Skulptur und *Concept Modeling* zur Herstellung eines Konzeptmodells.
2. *Functional Prototyping* zur Herstellung eines Funktionsprototyps.

Solid Imaging und Concept Modeling erzeugen eine Bauteilfamilie, anhand dessen eine Verifizierung eines Basiskonzepts durchgeführt werden soll. Die Teile sind dreidimensionale Anschauungsmodelle, die zur Vermittlung eines räumlichen Eindrucks und zur Beurteilung der allgemeinen Erscheinung und der Proportionen dienen. Meistens können sie nicht belastet werden. Maßstabsgetreue Konzeptmodelle werden gerne eingesetzt, um komplexe CAD-Zeichnungen zu veranschaulichen und bieten eine Grundlage für interdisziplinäre Diskussion, etwa hinsichtlich der Verpackung.<sup>57</sup> Abbildung 14 zeigt ein durch Rapid Prototyping erzeugtes Modell eines Cabriooverdecks.

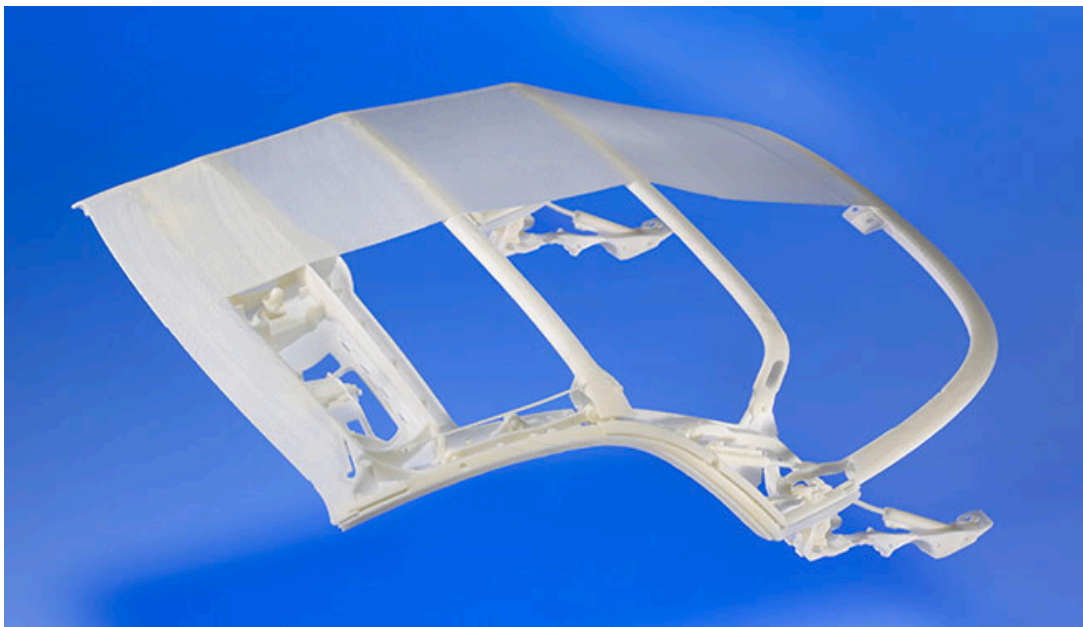


Abbildung 14: Ergebnis vom Rapid Prototyping (Quelle: <http://cp-gmbh.de/projektbeispiele.php>)

<sup>57</sup> Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 7ff.

Mittels Functional Prototyping werden Funktionsprototypen erzeugt, um eine oder mehrere voneinander getrennte Funktionen des späteren Produkts darzustellen und zu überprüfen. Das kann beispielsweise ein Modell eines verstellbaren Luftauslassgitters einer Klimaanlage sein, um den Mechanismus und die Luftverteilung im Raum zu analysieren.<sup>58</sup>

Ein wichtiges Ziel bei der Herstellung von Prototypen ist es, mögliche Fehler des späteren Produkts frühzeitig zu erkennen und zu beheben, bevor es in die Serienproduktion geht.<sup>59</sup> Weiterhin sollen jedwede Änderungen in einem späteren Stadium vermieden werden, weshalb es notwendig ist, das Produkt früh genug in allen Ausprägungen zu kennen, etwa in Hinsicht auf die Geometrie, der Haptik, der Einbau- und Befestigungsmöglichkeit. Die verantwortlichen Ingenieure und Entwickler wollen das Produkt zur besseren Bewertung in den Händen halten. Das ist entscheidend, um Änderungen so früh wie möglich durchführen zu können. Je fortgeschrittener der Entwicklungsprozess ist, desto weniger werden Änderungswünsche berücksichtigt, da die Kosten mit jeder Entwicklungsstufe ansteigen. Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, verursacht jede spätere Änderung etwa 10x mehr Kosten als in der vorherigen Stufe.

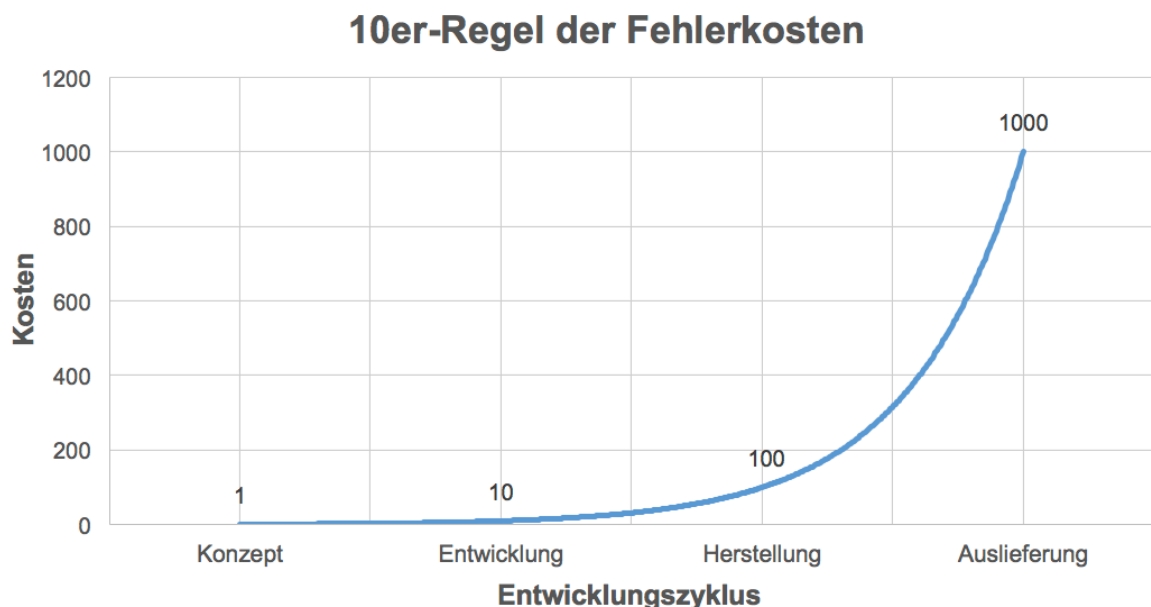


Abbildung 15: Änderungskosten (Quelle: Eigene Darstellung nach Sommer et al. (2018) S. 64)

<sup>58</sup> Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 10

<sup>59</sup> Vgl. Weinmann et al. (2/2018), S. 76

Irgendwann besteht die Gefahr, dass zu einem späten Zeitpunkt aus Angst vor hohen Kosten auf die optimale Lösung verzichtet wird. Sehr kritisch wird es, wenn die Produktion bereits angelaufen ist oder die Auslieferung sogar schon begonnen hat und weiterhin neue Änderungswünsche im Raum stehen.<sup>60</sup>

In der Praxis existieren zahlreiche Beispiele, bei denen sich die Hersteller aufgrund mangelnder Qualität gezwungen sahen, eine Rückrufaktion ihrer Fahrzeuge zu veranlassen. Im Jahr 2015 ordnete das Kraftfahrtbundesamt in Flensburg 326 Rückrufaktionen wegen Sicherheitsmängeln an, bei denen 1,65 Millionen Autofahrer betroffen waren. Neben den Reparaturkosten können auch noch Schadenersatzforderungen und staatliche Strafzahlungen auf die Automobilhersteller zukommen. Oftmals erleidet auch die Reputation des betroffenen Autobauers einen großen Schaden.<sup>61</sup>

---

<sup>60</sup> Vgl. Sommer et al. (2018), S. 64

<sup>61</sup> Vgl. Dudenhöffer (2016), S. 40ff.

## 4.2 Rapid Tooling

Zur Anwendungsebene des Rapid Toolings gehören alle additiven Fertigungsprozesse, die zur Herstellung von Formen und Werkzeugeinsätzen führen.<sup>62</sup> Mithilfe dieser Formen und Werkzeuge können Serienteile produziert werden. Oftmals ist die Herstellung innerhalb von wenigen Tagen möglich. Klassische Folgeprozesse sind u.a. Spritzgießen oder Druckgießen. Als Werkstoffe für die Werkzeuge werden sowohl Metalle, als auch Kunststoffe und Minerale verwendet.<sup>63</sup>

Der schichtweise Aufbau der additiven Fertigung ermöglicht beispielsweise die Erzeugung werkzeuginterner Hohlstrukturen, wie in Abbildung 16 zu sehen ist. Auf diese Weise können u.a. Formeneinsätze mit inneren Kühlkanälen hergestellt werden, die der Kontur des Werkzeugeinsatzes unterhalb dessen Oberfläche folgen.

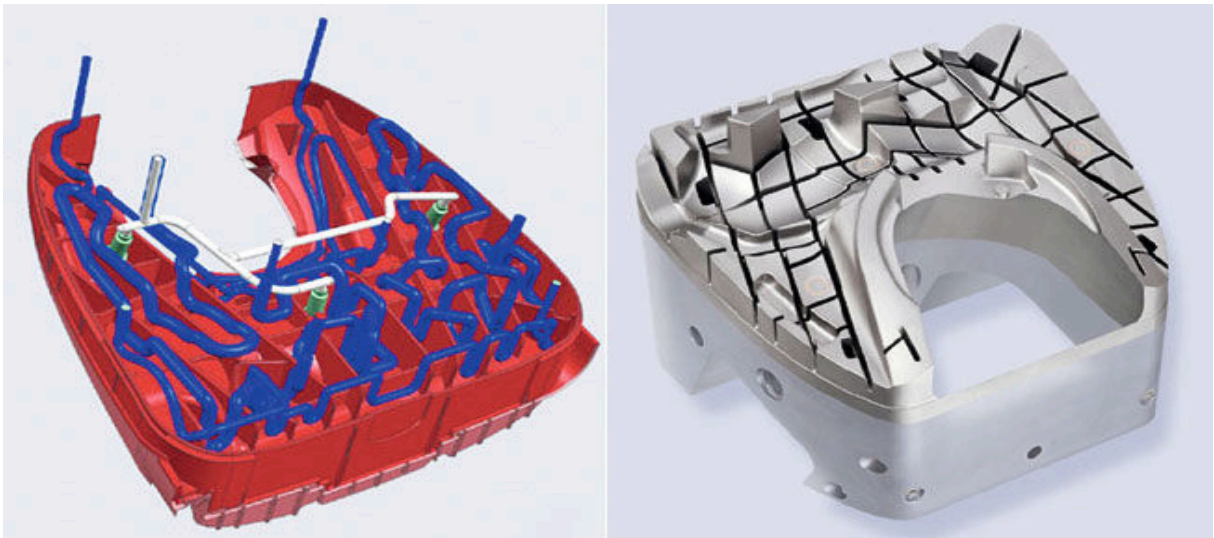


Abbildung 16: Formeneinsatz mit konturangepassten Kühlkanälen (Quelle: Gebhardt et al. (2016) S. 15)

Diese konturangepasste Kühlung kann die Zykluszeit für ein Kunststoff-Spritzgussbauteil stark verkürzen und so die Produktivität deutlich steigern. Außerdem kann durch eine intelligente Anordnung von Heiß- und Kühlkanälen ein angemessenes Wärmeverteilungssystem konstruiert und damit leistungsfähigere Werkzeuge gestaltet werden.

<sup>62</sup> Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 14

<sup>63</sup> Vgl. Berger et al. (2017), S. 34f.

### 4.3 Rapid Manufacturing

Die Anwendungsebene *Rapid Manufacturing* umfasst alle Verfahren, die Endprodukte oder Bauteile erzeugen, die im Anschluss zu einem serienfertigen Produkt montiert werden.<sup>64</sup>

Die Frage, wann vom Rapid Prototyping und wann vom Rapid Manufacturing gesprochen wird, also wann es sich um einen Prototypen und wann um ein Produkt handelt, bestimmen weder die verwendeten Materialien noch das gewählte 3D-Druckverfahren. Entscheidend sind die Anforderungen der Konstruktion, die vom Bauteil erfüllt werden müssen.<sup>65</sup> Prototypen sind wie bereits veranschaulicht dreidimensionale Visualisierungen, die über ausgewählte Funktionen verfügen können. Dagegen müssen Serienteile alle Funktionen vorweisen, die in der Konstruktionsphase festgeschrieben wurden.<sup>66</sup> Es lässt sich zudem sagen, dass keine starre Verbindung zwischen einer spezifischen Anwendung oder einer Branche und einem bestimmten additiven Fertigungsprozess existiert.<sup>67</sup>

Während die Anzahl der Verfahren und Materialien im Bereich des 3D-Drucks steigen, gibt es im Bereich der Serienfertigung nach wie vor nur wenige geeignete Verfahren und Materialien. Das liegt an den höheren Anforderungen im Serenumfeld, vor allem in Bezug auf die Qualitätssicherung und Kostenstruktur der Bauteile. An dieser Stelle lässt sich sagen, dass der 3D-Druck von Metallen mittlerweile eine höhere Qualität und Wirtschaftlichkeit aufweist, als mit Kunststoffen.<sup>68</sup>

Erfahrungsgemäß hängen die Stückkosten bei traditionellen Verfahren immer von der Stückzahl ab. Je mehr von einem Bauteil produziert wird, desto geringer fallen die Stückkosten aus, da beispielsweise die Werkzeugkosten pro Teil im Spritzguss sinken. Beim 3D-Druck hingegen sind die Stückkosten konstant und zu Beginn niedriger im Vergleich zu traditionellen Verfahren, da keine Skaleneffekte ausgenutzt werden und

---

<sup>64</sup> Vgl. Gebhardt et al. (2016), S. 12

<sup>65</sup> Vgl. ebd., S. 101

<sup>66</sup> Vgl. ebd., S. 139f.

<sup>67</sup> Vgl. ebd., S. 101

<sup>68</sup> Vgl. Keßling (10/2018), S. 74



keine weiteren produktspezifischen Investitionen anstehen, sobald man einen 3D-Drucker besitzt. Abbildung 17 hebt hervor, dass der 3D-Druck einen Kostenvorteil bei Kleinserien hat und daher die bessere Wahl ist, wenn eine gewisse Menge an Stückzahlen nicht überschritten wird. Diese Erkenntnis unterstützt ein Geschäftsmodell, bei dem kleine Stückzahlen an kundenindividuellen Einzelfertigungen mit hohen Gewinnspannen verkauft werden.

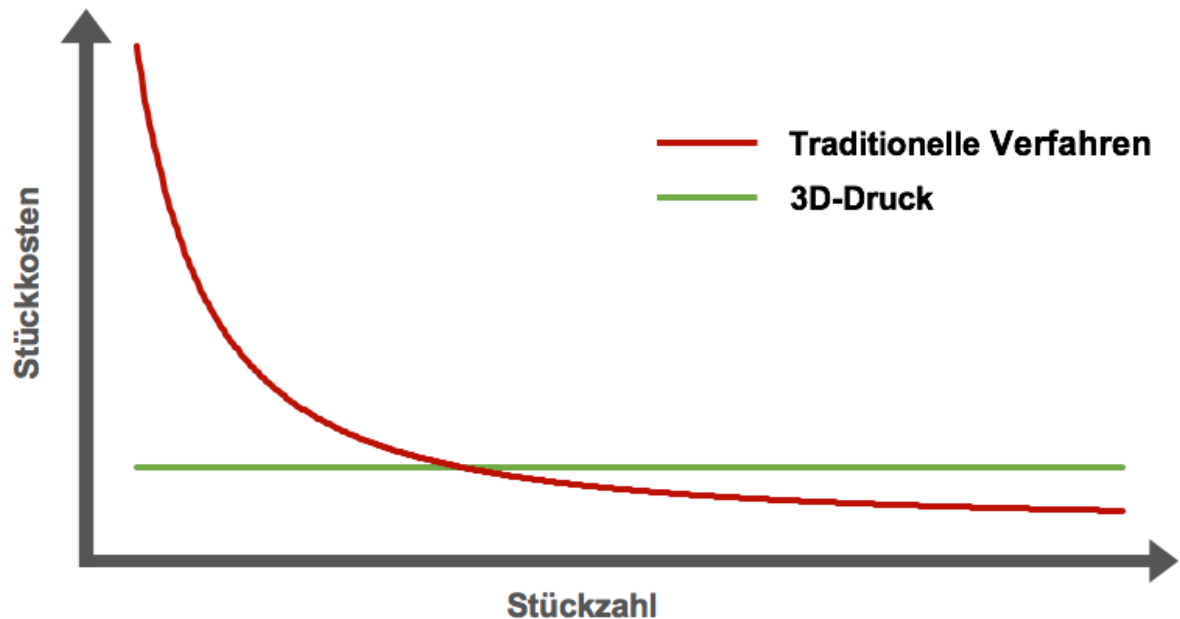


Abbildung 17: 3D-Druck und traditionelle Verfahren im Stückkostenvergleich  
(Quelle: Eigene Darstellung nach Sommer et al. (2018) S. 66)

## 5. Chancen und Herausforderungen des 3D-Drucks für Automobilhersteller unter Berücksichtigung der Wertschöpfungskette

### 5.1 Wertschöpfungskette eines Automobilherstellers

Die Globalisierung und der weltweite Wettbewerb der letzten Jahrzehnte haben in der Automobilindustrie zu kürzeren Produktlebenszyklen und einer höheren Modellvielfalt geführt, um dem Bedarf der Kunden zu entsprechen. Der Kostendruck, der durch eine starke und globale Konkurrenz verursacht wurde, hat Auswirkungen auf die Supply Chains der Automobilhersteller gezeigt.

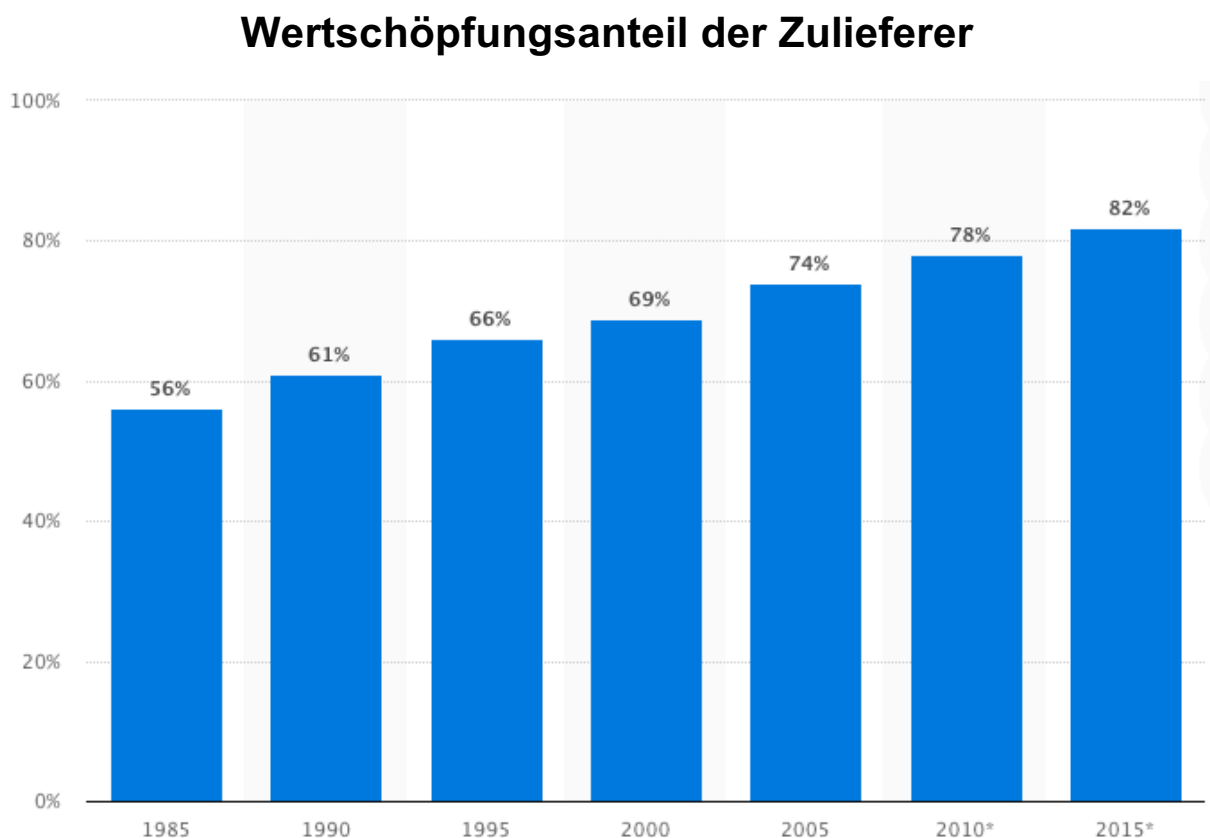


Abbildung 18: Wertschöpfungsanteil der Automobilzulieferer  
(Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162996/umfrage/wertschoepfungsanteil-der-automobilzulieferer-am-automobilbau-weltweit/>)

Auf der Suche nach besseren Produktionsbedingungen wurde im großen Stil Outsourcing betrieben, also viele Produktionsstandorte und damit Wertschöpfungsaktivitäten in Länder mit günstigeren Lohnstrukturen verlegt. Lohnkostenunterschiede von teils über 95% versprachen Automobilherstellern große Sparmöglichkeiten.<sup>69</sup> Aus diesem Umstand heraus haben sich globale Liefernetzwerke mit Lieferanten und Abnehmern gebildet, die sich räumlich in weit voneinander entfernten Regionen befinden und über logistische Warenströme miteinander verbunden sind.<sup>70</sup> Abbildung 18 verdeutlicht den stetig wachsenden Wertschöpfungsanteil am weltweiten Automobilbau seit 1985 mit 56 Prozent auf 82 Prozent im Jahr 2015.

In der Beschaffungsstrategie einer Supply Chain, die die Wertsteigerung eines Produkts zum Ziel hat, folgt die Lieferantenstruktur der Produktstruktur. Aus Sicht des Endproduktherstellers, dem *Original Equipment Manufacturer (OEM)*, sind die Lieferanten entsprechend in Stufen, sogenannten Tiers, angeordnet.

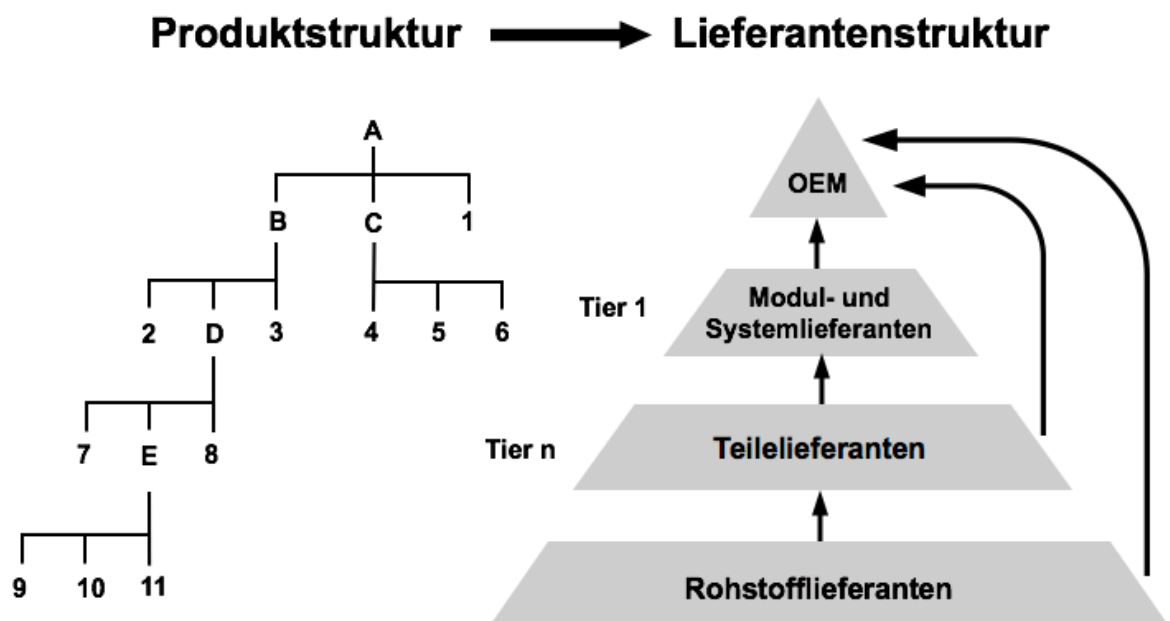


Abbildung 19: Produktstruktur folgt Lieferantenstruktur  
(Quelle: Eigene Darstellung nach Schönsleben (2016) S. 73)

<sup>69</sup> Vgl. Klug (2018), S. 135

<sup>70</sup> Vgl. Thissen (2019). S. 1

Abbildung 19 zeigt ein Beispiel für das Endprodukt A, welches aus den Bauteilen B, C und 1 besteht. Zur Herstellung dieser Bauteile, werden die Teile 2, D, 3, 4, 5 und 6 benötigt und vom Tier 1-Lieferanten, dem Modul- und Systemlieferanten, bezogen. Dieses Prinzip setzt sich bis zum Rohstofflieferanten durch.<sup>71</sup> Dabei ist der Automobilhersteller in der Supply Chain als fokales Unternehmen anzusehen, da er im Wesentlichen die Koordinationsfunktionen für das Netzwerk übernimmt und Entscheidungen trifft.<sup>72</sup>

Vorherrschend in der Zusammenarbeit zwischen Zulieferer und Produzent ist das Prinzip *Just-In-Time (JIT)*, das im Rahmen des *Toyota-Produktionssystem* geprägt wurde. Das JIT-Konzept bzw. die bedarfssynchrone Beschaffung sieht eine bedarfsorientierte Bereitstellung der Waren an die nachgelagerte Stufe in der Wertschöpfungskette vor. Auf diese Weise lassen sich Lagerbestände reduzieren und die direkte Anlieferung in die Produktion ermöglichen. Hohe Lieferfrequenzen kleiner Mengen sind hierbei die wesentlichen Merkmale.<sup>73</sup> JIT soll Bestände abbauen, ohne die Versorgungssicherheit zu gefährden. Große Automobilhersteller mit globalen Supply Chains sind einer Vielzahl von Risiken ausgesetzt, wie z.B. Versorgungsunterbrechungen, Versorgungsverspätungen, Bedarfsschwankungen, Preis- und Wechselkursrisiken und Qualitätsschwankungen.<sup>74</sup> Um diese Risiken abzufangen, werden in der Praxis oftmals Sicherheitsbestände angelegt.

## 5.2 Produktdifferenzierung

Neben einem Anstieg der ausgelagerten Wertschöpfung, hatte die Globalisierung eine Erweiterung der Absatzmärkte zur Folge, die mit kürzeren Produktlebenszyklen und einer zunehmenden Produktdifferenzierung einherging. Automobilhersteller versuchen damit, den unterschiedlichen Bedürfnissen aller Kundensegmente und dem allgemeinen Wunsch nach Individualität nachzukommen.<sup>75</sup> Abbildung 20 stellt die Entwicklung der Fahrzeugvarianten seit Mitte der 1960er Jahre dar. Von ursprünglich vier Varianten existieren mittlerweile weit mehr als ein Dutzend.

---

<sup>71</sup> Vgl. Schönsleben (2016), S. 73

<sup>72</sup> Vgl. Thissen (2019), S. 30

<sup>73</sup> Vgl. Schulte (2017), Logistik. S. 372

<sup>74</sup> Vgl. Thissen (2019), S. 30

<sup>75</sup> Vgl. Schade et al. (2014), S. 139



Abbildung 20: Erweiterung der Variantenvielfalt (Quelle: Eigene Darstellung nach Schade et al. (2014) S. 139)

Die verfügbaren Fahrzeugvarianten haben sich in diesem Zeitraum also mehr als verdreifacht. 70% der Automobilzulieferer geben dazu passend an, dass in den letzten Jahren die gefertigten Varianten aufgrund der Produktdifferenzierung zugenommen hat.<sup>76</sup>

Eine Vergrößerung der Variantenvielfalt hat auch eine Vergrößerung der Teilevielfalt zur Folge, d.h. dass auch der Aufwand für Entwicklung, Konstruktion, Prototypenbau, Produktionsplanung Werkzeuge, Verwaltung sowie Lagerhaltung steigt.<sup>77</sup> Wiederum hat eine Vergrößerung der Teilevielfalt negative Auswirkungen auf die Risiken innerhalb der Supply Chain. Für die internationale Produktions- und Transportlogistik von Automobilherstellern ergibt sich dadurch im Verlauf der Zeit eine gestiegene Komplexität der Wertschöpfungskette.

<sup>76</sup> Vgl. ebd., S. 147

<sup>77</sup> Vgl. Ihme (2006), S. 20

## 5.3 Chancen

### 5.3.1 Kostensenkungspotenziale

Der 3D-Druck gewährt Chancen, um der gestiegenen Komplexität der globalen Koordination von Produktions- und Logistikprozessen zu begegnen. Großes Potenzial hat der 3D-Druck hinsichtlich der Lager- und Transportkosten. Wenn Bauteile erst bei konkreter Nachfrage mit dem 3D-Drucker produziert werden, kann auf das groß angelegte Lagern und Verschrotten unverkaufter Bestände von Autoteilen verzichtet werden.<sup>78</sup> Zudem sinkt die Anzahl der Transporte und damit die Transportkosten für Automobilhersteller, wenn direkt am Ort des Gebrauchs gedruckt wird. Zusätzlich könnte die Umweltbilanz verbessert werden, wenn auf viele Transporte kleiner Mengen unterschiedlichster Teile verzichtet werden könnte und stattdessen größere Mengen an Rohmaterial für den Druck geliefert werden würde. Wie die Strategieberatung *Strategy&* in ihrer Analyse zum 3D-Druck feststellt, wird so aus einer JIT-Lieferung ein On-Demand-3D-Druck.<sup>79</sup> Es lassen sich zudem Rüstkosten sowie Kosten für Werkzeuge, Vorrichtungen und Formen reduzieren, die bei Spritzguss- oder subtraktiven Fertigungsverfahren aufkommen. Auf Mengendegressionseffekte braucht keine Rücksicht mehr genommen werden, da kleine Stückzahlen kundenindividueller Produkte nun wirtschaftlich werden. Das Ausnutzen dieser Effekte hatte immer hohe Stückzahlen und Bestände zur Folge, denen keine konkrete Nachfrage gegenüberstand.<sup>80</sup> Ersatzteile bieten in diesem Zusammenhang ein ideales Betätigungsfeld für den 3D-Druck. In Zusammenarbeit mit 3D-Druckdienstleistern sind Automobilhersteller in der Lage Ersatzteile bei konkretem Bedarf am Ort des Gebrauchs zu drucken. Daimler hat in Zusammenarbeit mit einem 3D-Druckerhersteller Ersatzteile aus Metall und Kunststoff für Omnibusse identifiziert, die sich für eine Herstellung durch additive Verfahren eignen. Gefertigt werden die Teile durch das SLS-Verfahren.<sup>81</sup> Es besteht sogar die Chance, die Ersatzteile

---

<sup>78</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 19

<sup>79</sup> Vgl. <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/2018/3d-druck.html>

<sup>80</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 9f.

<sup>81</sup> Vgl. Zimmer (1/2018), S. 22

---

leistungsfähiger als die Originale zu gestalten, indem man das Bauteil nachträglich per CAD-Programm an den Bruchstellen verstärkt.<sup>82</sup>

### 5.3.2 Designfreiheit

Der hohe Freiheitsgrad beim Produktdesign stellt ein besonderes Leistungsmerkmal des 3D-Drucks dar. Fast alle denkbaren Formen sind realisierbar, auch solche, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren gar nicht oder nur unter großem Aufwand umzusetzen sind. Diese neuen Freiheiten erfordern allerdings auch ein Umdenken bei den Konstrukteuren, die nun nicht mehr an Restriktionen wie Rechtwinkligkeit, Grad-, Eben- und Rundheit, Parallelität und Montagegerechtigkeit gebunden sind.<sup>83</sup> Ein direkter Zusammenhang zwischen Produktkomplexität und Herstellungskosten ist nicht gegeben, da eine hohe Komplexität des Werkstücks nicht mit einer höheren Komplexität der Werkzeuge oder Fertigungsschritte einhergeht. Auch die Kombination aus verschiedenen Materialien ist dabei möglich. Somit können individuelle Kundenwünsche und kleine Marktsegmente profitabel bedient werden ohne über eine große Vielzahl von spezialisierten Fertigungsanlagen verfügen zu müssen. Dem Trend zur kundenindividuellen Massenfertigung kann mithilfe des 3D-Drucks auf qualifizierte Art und Weise begegnet werden, so dass eine Losgröße 1 denkbar wird.<sup>84</sup>

Anhand eines umgestalteten *T1 Bulli* zeigt VW die Möglichkeit auf, durch den 3D-Druck bionische Strukturen, also organisch anmutende und der Natur entlehnte Formen, in das Design zu implementieren. Der Spiegelhalter und die Felge auf den Abbildungen 21 und 22 sind im Rahmen der Gestaltungsprinzipien des *generativen Designs* entstanden. Dabei entwirft kein Designer mehr die Form, sondern eine Software errechnet anhand von vorgegebenen Parametern und Restriktionen bzgl. der physikalischen Leistungsfähigkeit mehrere mögliche Designvarianten eines Bauteils. Die Vorschläge, die von 3D-Druckern ohne großen Aufwand gedruckt werden können, weisen ein geringeres Gewicht auf, ohne an Festigkeit und Leistung einzubüßen. Das sind beides wichtige Kriterien für Automobilhersteller.<sup>85</sup>

---

<sup>82</sup> Vgl. Klotz (1/2018), S. 39

<sup>83</sup> Vgl. Gärtner et al. (5/2018), S. 50

<sup>84</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 9

<sup>85</sup> Vgl. <https://www.autodesk.de/redshift/zukunft-automobildesign-generatives-design/>



Abbildung 21: Spiegelhalter aus dem 3D-Drucker  
(Quelle: <https://www.autodesk.de/redshift/zukunft-automobildesign-generatives-design/>)



Abbildung 22: Generatives Design einer Felge  
(Quelle: <https://www.autodesk.de/redshift/zukunft-automobildesign-generatives-design/>)



### 5.3.3 Gewichtseinsparung

In der Fahrzeugentwicklung gewinnt der Leichtbau seit Jahren immer mehr an Bedeutung. Die meisten Automobilhersteller sehen die Bewältigung des Leichtbaus als einen wichtigen Faktor, um nachhaltig erfolgreich zu sein und streben in diesem Gebiet die Technikführerschaft an.<sup>86</sup> Das wird zur Herausforderung, da angesichts der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebs und dem hohen Gewicht einer Batterie, die mehrere hundert Kilogramm betragen kann, mit einer Erhöhung der Fahrzeugmasse zu rechnen ist. Das wirkt sich wiederum negativ auf die Reichweite aus. Die Senkung der Fahrzeugmasse ist auch sofern von Bedeutung, da sie einen wichtigen Hebel zur Reduktion des Energiebedarfs bietet. Neben den direkten Einspareffekten ergeben sich sekundäre Einsparpotenziale, die sich aus der Anpassung von anderen Fahrzeugkomponenten auf die reduzierte Fahrzeugmasse ergeben. Durch die Anpassung von Motoren, Bremsen und Getriebe sind im Schnitt zusätzlich weitere 30% Gewichtseinsparung realisierbar. Ein reduziertes Fahrzeuggewicht geht auch mit Ressourcen bzw. Kraftstoffeinsparungen einher. So lässt sich mit einer Verringerung der Fahrzeugmasse von konventionell betriebenen Fahrzeugen um 100 Kilogramm eine Kraftstoffeinsparung von 0,3 bis 0,4 Liter pro 100 Kilometer erzielen.<sup>87</sup> Das hilft dabei die immer strengeren Vorgaben zu CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erfüllen.

Der 3D-Druck bietet Möglichkeiten gewichtsoptimierte Autoteile zu schaffen. Durch das Drucken von Werkstücken mit bionischen Strukturen und Hohlräumen kann zudem Gewicht eingespart werden. Die Objekte werden so weniger massiv als beim Spritzguss- oder subtraktiven Fertigungsverfahren. Das wiederum hilft dabei den Treibstoffverbrauch beim operativen Betrieb des Fahrzeugs zu senken und Ressourcen zu schonen.

Ein Beispiel in der Praxis ist hier der französische Lastkraftwagenhersteller Renault Trucks, der zur Herstellung eines Prototyps der neuen Motorengeneration vollständig auf den 3D-Druck zurückgreift. Dadurch konnten die Entwickler positive Ergebnisse in

---

<sup>86</sup> Vgl. Hillebrecht et al. (2014), S. 158

<sup>87</sup> Vgl. Schade et al. (2014), S. 110f.

Bezug auf Größe und Gewicht des Motors erzielen. Das Gewicht eines Vier-Zylinder-Motors konnte nämlich um 25 Prozent bzw. 120 Kilogramm reduziert werden.<sup>88</sup>

Ein weiteres Beispiel der Leichtbautechnologie ist eine Cabrio-Dachhalterung aus Aluminium für den BMW i8 Roadster. Unter Verwendung des SLM-Verfahrens hat der Automobilhersteller ein Fahrzeugteil hergestellt, das etwa 44 Prozent leichter ist als das ursprüngliche Design aus Kunststoff. Abbildung 23 zeigt von links nach rechts die Evolution beim Design der Metallkomponente.<sup>89</sup>



Abbildung 23: Entwicklungsstadien einer Dachhalterung  
(Quelle: <https://3druck.com/nachrichten/bmw-erhaelt-altair-enlighten-award-fuer-3d-gedruckte-metall-dachhalterung-0473122/>)

Die Einsparung an Material sind deutlich zu erkennen. 3D-Druck erlaubt es, optimierte Strukturen zu fertigen, welche auf einem konventionellen Fertigungsweg nur schwer herzustellen wären.

<sup>88</sup> Vgl. Zimmer (1/2018), S. 23

<sup>89</sup> Vgl. <https://3druck.com/nachrichten/bmw-erhaelt-altair-enlighten-award-fuer-3d-gedruckte-metall-dachhalterung-0473122/>

### 5.3.4 Funktionsintegration

Der 3D-Druck ermöglicht es, separate Bauteile direkt als komplette Baugruppe zu drucken und somit die Anzahl der Einzelteile zu verringern. Dieser Vorgang wird auch als Funktionsintegration bezeichnet. Die Funktionsintegration steigert die Maschinenproduktivität, indem nachfolgende Prozessschritte, wie beispielsweise das Fügen oder die Montage von Bauteilkomponenten entfallen.<sup>90</sup> Diese Integration einer zu montierenden Baugruppe zu einem einzigen Teil würde eine geringere Anzahl an Teilen und Fertigungsschritten und damit eine kleinere Anzahl an Wertschöpfungsstufen der unternehmensübergreifenden Supply Chain bedeuten, so dass neben Lohn- und Montagekosten auch Koordinationskosten mit globalen Zulieferern entfallen oder zumindest weniger werden.<sup>91</sup> In Abbildung 24 ist links eine herkömmliche Sitzhalterung und rechts eine neu entwickelte Sitzhalterung für Elektroautos abgebildet, die General Motors per 3D-Druck hergestellt hat.



Abbildung 24: Alte und neue funktionsintegrierte Sitzhalterung

(Quelle: <https://cdn1.vogel.de/zmADuGMClhgRI1tVtOguFbA7qhQ=/images.vogel.de/vogelonline/bdb/1572700/1572786/original.jpg>)

<sup>90</sup> Vgl. Hopmann (11/2018), S. 23

<sup>91</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 18

---

Sie ist 40 Prozent leichter und 20 Prozent stabiler als die bisherige Version und besteht zudem nicht mehr aus acht miteinander verschweißten Teilen, sondern nur noch aus einem Einzelteil.<sup>92</sup> Durch die Funktionsintegration und einem Insourcing von Prozessschritten durch den 3D-Druck wäre eine Steigerung der eigenen Wertschöpfungstiefe für Automobilhersteller wieder denkbar. Dies wäre auch im Sinne mächtiger Betriebsräte, die sich angesichts der Abkehr von fossilen Brennstoffen und einer voraussichtlich verminderten Nachfrage nach Dieselautos und Benzinern eine Integration ausgelagerter Wertschöpfung wünschen, um Jobs zu erhalten.<sup>93</sup>

Würden Fahrzeugteile weniger zugekauft, sondern vielmehr selbst gefertigt werden, bräuchten Automobilhersteller das Rohmaterial, etwa das Metallpulver nur noch direkt von einem Lieferanten zu beziehen. Die Verkürzung der Wertschöpfungskette würde viel geringere Risiken aufweisen als eine komplexe Supply Chain mit vielen Akteuren.

---

<sup>92</sup> Vgl. <https://blogs.autodesk.com/presse-center-deutschland/2019/04/01/general-motors-entwickelt-erste-3d-gedruckte-sitzhalterung-fur-autos/>

<sup>93</sup> Vgl. Fichtner et al. (44/2019), S. 22

## 5.4 Herausforderungen

### 5.4.1 Technische Herausforderungen

Ein wesentlicher Nachteil des 3D-Drucks ist die sehr geringe Druckgeschwindigkeit. Wesentlich ist hierbei der Zeitbedarf, der für das Aushärten einer Schicht benötigt wird, bevor die nächste Schicht aufgetragen werden kann. Traditionelle Verfahren sind in dieser Hinsicht im Vorteil, weil sie hohe Stückzahlen in kurzer Zeit herstellen können.<sup>94</sup> Automobilhersteller müssten dies durch die Verwendung einer Vielzahl von 3D-Druckern kompensieren. Die Komplexität der Objektgeometrie und die Geschwindigkeit des Druckverfahrens bzw. eingesetzten Druckers bestimmen dabei den Zeitbedarf zur Fertigung eines Werkstücks.<sup>95</sup>

Weiterhin sind viele CAD-Programme für konventionelle Fertigungsverfahren, wie z.B. Spritzguss ausgelegt, insbesondere auf kreisförmige Objekte und geraden Linien. Somit können die geometrischen Freiheitsgrade mittels 3D-Druck nur bedingt ausgenutzt werden. Zudem sind viele CAD-Programme eher benutzerunfreundlich.<sup>96</sup>

An der Oberfläche können aufgrund des schichtweisen Aufdrucks und der Verwendung von Pulverpartikel beim SLS-Verfahren Stufen entstehen. Das erfordert eine Nachbearbeitung, wie etwa ein Abstrahlen oder eine chemische Nachbehandlung der Fahrzeugteile.<sup>97</sup> Auch das Entfernen von Stützmaterial bei einigen Verfahren erfordert eine Oberflächenbehandlung und Reinigung, um die Reste durchweg zu entfernen.<sup>98</sup>

Die Größe der druckbaren Fahrzeugteile ist weitere eine Einschränkung, die mit der Dimensionierung des Bauraums des 3D-Druckers einhergeht. Momentan auf dem Markt erhältliche 3D-Drucker sind oftmals zu klein, um größere Objekte in einem Stück zu drucken.<sup>99</sup> Auch das Einhalten von Toleranzen und die genaue Maßhaltigkeit von

---

<sup>94</sup> Vgl. Feldmann et al. (2016), S. 11

<sup>95</sup> Vgl. ebd., S. 43

<sup>96</sup> Vgl. ebd., S. 11

<sup>97</sup> Vgl. Keßling (10/2018), S. 72f.

<sup>98</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 21

<sup>99</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 4

---

Objekten bei großer Stückzahl ist ein großer Kritikpunkt, an denen die Hersteller von 3D-Druckern ansetzen müssen. Die genaue Reproduzierbarkeit hat bei einigen 3D-Druckverfahren noch ihre Schwächen.

Das erkennen auch die Entwickler bei BMW, die nach eigenen Angaben seit 1990 im Bereich des 3D-Drucks forschen und additive Fertigungsverfahren beispielsweise für Prototypen und hochexklusive Modelle wie dem Sportwagen *i8 Roadster* anwenden. Obwohl BMW im 3D-Druck mit seiner vielseitigen Formgebung und den Möglichkeiten zur Personalisierung von Fahrzeugteilen große Chancen sieht, ist der Automobilkonzern momentan der Ansicht, dass die additive Fertigung für Großserien noch nicht ausgereift ist.<sup>100</sup>

Um reproduzierbare Maßhaltigkeiten und eine hohe Oberflächengüte zu gewährleisten und gleichzeitig die Bauteilkomplexität nicht zu limitieren, können subtraktive Fertigungsverfahren mit dem 3D-Druck kombiniert werden. Am Institut für Kunststoffverarbeitung der Universität RWTH Aachen wurde ein solches Hybridverfahren erfolgreich implementiert.<sup>101</sup> Das könnte den Geschwindigkeitsnachteil des 3D-Drucks gegenüber anderen Fertigungsverfahren ausgleichen. So könnte etwa ein Grundkörper mit großem Volumen zuerst gefräst werden, um daraufhin per 3D-Druck den additiven Aufbau einer komplexen Geometrie zu erhalten. Weiterhin wäre es vorstellbar, insbesondere auch für Zulieferer, Varianten mit hohen Stückzahlen und konstanter Nachfrage mit einem schnellen subtraktiven oder formgebenden Fertigungsverfahren herzustellen. Andere Varianten, die nur eine geringe Nachfrage haben, könnten mit dem langsameren 3D-Druck gefertigt werden. Auf diese Weise lassen sich zeitraubende Umrüstungen der Maschinen für Langsamdreher vermeiden.<sup>102</sup>

---

<sup>100</sup> <https://www.bmw.com/de/innovation/3d-druckerei.html>

<sup>101</sup> Vgl. Hopmann et al. (11/2018), S. 23

<sup>102</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 21

## 5.4.2 Standards und Zertifizierungen

Für die künftige Fortentwicklung des 3D-Drucks sind weiterführende Standards und Zertifizierungen notwendig. Für Rohmaterialien und Maschinen, Fertigungsprozesse etc. müssen branchenweite Standards festgelegt werden. Auch Testmethoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von 3D-Druckteilen müssen entwickelt und normiert werden. Ebenso braucht es Richtlinien für die Zertifizierung von Mitarbeitern und das Recycling der Materialien.<sup>103</sup> Herstellern von 3D-Druckern, Forschungseinrichtungen und auch der Automobilindustrie ist hier die Möglichkeit gegeben einen konstruktiven Beitrag zu leisten, um allgemein anerkannte Standards festzusetzen.

## 5.4.3 Schutz des geistigen Eigentums

Mit dem Einsatz von 3D-Druckern erhöht sich für Automobilhersteller auch das Risiko der Produktpiraterie, da zur Herstellung unterschiedlicher Fahrzeugteile theoretisch ein einziger Drucker ausreicht. Anhand einer kopierten CAD-Druckvorlage oder sogar unrechtmäßig erworbener CAD-Originaldaten sind Produktpiraten in der Lage das entsprechende Bauteil auszudrucken und es zu verwenden bzw. zu verkaufen.<sup>104</sup> Die Verwendung von 3D-Scannern erlaubt ebenfalls die Erstellung eines digitalen Modells und verkürzt für den Kopierer sogar noch die Time-to-Market, da Forschungs- und Entwicklungszeit sowie -kosten eingespart werden.<sup>105</sup> Diese Gefahr der illegalen Kopien betrifft nicht nur Automobilhersteller, sondern auch deren Zulieferbetriebe. In dieser Hinsicht müssen Automobilhersteller Maßnahmen zur Vorbeugung erarbeiten und ihre Mitarbeiter für dieses Thema sensibilisieren, um ihre Ideen und Bauteile vor Diebstahl zu schützen und somit den Unternehmenserfolg zu wahren.

In Zusammenarbeit mit 3D-Druckdienstleistern müssen Automobilhersteller daher rechtliche Rahmenbedingungen klären und durch Verträge sicherstellen, dass sie weiterhin die vollen Rechte über ihre Daten behalten und Dritten einen Zugriff darauf nur gewähren, wenn sämtliche rechtliche sowie technischen Anforderungen dafür

---

<sup>103</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 23

<sup>104</sup> Vgl. ebd., S. 24

<sup>105</sup> Vgl. Fastermann (2016), S. 98

---

erfüllt sind. Nur so kann das Risiko illegaler Kopien minimiert werden. Das schließt eventuelle digitale Neukonstruktionen bestehender Bauteile seitens der 3D-Druckdienstleister mit ein, die zur Nutzung der Vorteile des 3D-Drucks durchgeführt werden.<sup>106</sup>

Um minderwertige und lebensgefährdende Kopien von Fahrzeugkomponenten zu identifizieren, haben Automobilhersteller die Möglichkeit auf technische Lösungen zurückzugreifen, wie etwa das Implementieren von Nanokristallen in das zu schützende Objekt. Diese Kristalle stellen eine physische und nicht kopierbare Signatur zur Herkunftsüberprüfung dar.<sup>107</sup>

---

<sup>106</sup> Vgl. Leupold (05/2018), S. 32

<sup>107</sup> Vgl. Feldmann et al. (2019), S. 24



## 6. Abschlussbetrachtung

Der 3D-Druck ist ein additives Fertigungsverfahren, um dreidimensionale Bauteile mittels flüssiger oder fester Materialien und unter Anwendung physikalischer oder chemischer Härtungs- oder Schmelzprozesse schichtweise aufzubauen. Dieses Fertigungsverfahren steht im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren, in denen Werkstücke durch eine abtragende Bearbeitung in die gewünschte Form gebracht werden. Durch die additive Fertigungsweise des 3D-Drucks lassen sich Abfälle reduzieren und damit Ressourcen einsparen. Es kann auf verschiedene 3D-Druckverfahren zurückgegriffen werden, die alle ihre Vor- und Nachteile haben.

Mit 3D-Druckverfahren lassen sich auch individualisierte und kundenspezifische Produkte in kleinen Stückzahlen zu relativ geringen Kosten herstellen. Auch für Bauteile, die über eine komplexe Form verfügen und wo die Herstellung von wenigen Stückzahlen durch konventionelle Fertigungsverfahren wirtschaftlich nicht standhält, eignet sich der 3D-Druck. Damit erfüllt der 3D-Druck wichtige Kriterien einer Industrie 4.0, indem durch eine Flexibilisierung der Fertigung eine hohe Variantendichte und kleine Stückzahlen bis zur Losgröße 1 wirtschaftlich umsetzbar werden. Eine Evaluation, welche Autoteile sich für den 3D-Druck und den unterschiedlichen Herstellverfahren aus wirtschaftlicher Sicht eignen, ist in jedem Fall von dem Automobilhersteller vorzunehmen. Dabei sollte auch der Aufwand berücksichtigt werden, der für eine Nachbearbeitung der frisch gedruckten Bauteile benötigt wird.

Während der 3D-Druck zur Erzeugung von Prototypen schon etabliert ist, zeigen die Praxisbeispiele, dass die meisten Automobilhersteller aktuell den 3D-Druck als noch nicht ausgereift genug für die Großserie bzw. die kundenindividuelle Massenfertigung betrachten. Konventionelle Verfahren sind hier immer noch effizienter. Die Entwicklung der Druckqualität zeigt zwar kontinuierliche Verbesserungen auf und auch auf eine Qualitätsverbesserung und Verringerung der Kosten für Druckmaterialien können Automobilhersteller in Zukunft hoffen, allerdings muss die Druckgeschwindigkeit für einen Einsatz in der Großserienfertigung noch deutlich ansteigen. Konventionelle Verfahren sind hier schneller, so dass Skaleneffekte ausgenutzt werden können. Die Aussicht auf immer größere Bauräume, in denen größere oder mehrere Bauteile

---

gleichzeitig gedruckt werden, sprechen für den 3D-Druck. Die Chancen, die der 3D-Druck den Automobilherstellern zum jetzigen Zeitpunkt eröffnet, sind in der Einzelfertigung und der Kleinserie zu suchen. Der Verkauf kleiner Stückzahlen mit der Umsetzung kundenindividueller Gestaltungswünsche zu hohen Preisen ist die Strategie, die Automobilhersteller derzeit mit dem 3D-Druck verfolgen sollten. Darin liegt die Stärke des 3D-Drucks. Daneben ergibt sich im After Sales die Möglichkeit, modifizierte Ersatzteile auf Wunsch vor Ort auszudrucken. Damit können Bestände reduziert und die Kundenzufriedenheit gesteigert werden. Aus dem JIT-Konzept wird ein flexibles On-Demand-Konzept. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichend große Produktionskapazität.

Der Leichtbau in der Automobilindustrie kann als wichtiger Treiber für die Entwicklung des 3D-Drucks angesehen werden. Durch bionische Hohlstrukturen lassen sich neuartige und komplexere Designs realisieren und Material sowie Gewicht einsparen. Angesichts der Elektromobilität ist das ein wichtiger Aspekt, weil der elektrische Antrieb schwere Batterien erfordert, die die Fahrzeugmasse erhöhen. Da die Produktstruktur der Lieferantenstruktur folgt, können Automobilhersteller ihre Supply Chains mithilfe des 3D-Drucks vereinfachen, indem separate Bauteile durch eine Funktionsintegration als komplette Baugruppe gedruckt werden. Das verringert die Anzahl der Einzelteile und die damit verbundenen Lohn- und Montagekosten. Denkbar wäre auch ein Insourcing von Produktionsprozessen, welches von Betriebsräten forciert wird, um Arbeitsplätze bei den Automobilkonzernen zu erhalten, die durch zurückgehende Absatzzahlen von Dieselautos und Benzinern bedroht werden könnten. Für viele Zulieferer hieße das, dass sie sich gegenüber den Zukunftstrends der Mobilität neu positionieren müssten, um in der neuen Umgebung weiterhin Wertschöpfung generieren zu können. Vermutlich entstehen neue Betätigungsfelder für 3D-Druckdienstleister, die zu Partnern von Automobilherstellern werden. Die Bereitstellung von Rohmaterial für die Druckmaschinen ist ein wichtiges und vielversprechendes Betätigungsfeld im Ökosystem des 3D-Drucks. Aber auch auf die additive Fertigung von Serienteilen könnten sich Zulieferer spezialisieren, denn trotz des Potenzials eines Insourcings kann ein Fremdbezug von 3D-Druckteilen für Automobilhersteller immer noch sinnvoll sein, um von der Innovationskraft der Zulieferbetriebe zu profitieren. Diesbezüglich sollte neben den Qualitätsanforderungen

---

auch rechtliche Fragen zum Schutz des geistigen Eigentums vorher vollständig geklärt werden.

Abschließend kann man sagen, dass der 3D-Druck nicht als Konkurrent, sondern als sinnvolle Ergänzung zu konventionellen Fertigungsverfahren betrachtet werden sollte. In einer ausgeprägten Industrie 4.0-Umgebung werden für Automobilhersteller sowohl fortschrittliche 3D-Drucktechniken als auch konventionelle Fertigungsverfahren wichtige Instrumente darstellen, um individuelle Kundenwünsche massentauglich in die Wertschöpfungskette einzubinden.

---

# Quellenverzeichnis

## Literaturquellen

Arndt, Alexander; Anderl, Reiner; Kegelmann, Kai; Kleiner, Sven: *Automatisierung in der kundenindividuellen Additiven Serienfertigung*, in: Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian; Kaierle, Stefan (Hrsg.): *Additive Serienfertigung. Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung*, Berlin (Springer Vieweg), 2018

Baumann, Sabine; Eulenstein, Oliver; Wunck, Christoph: *Digitalisierte Wertschöpfungsarchitekturen im Spannungsfeld von Standardisierung und Flexibilisierung – Eine Untersuchung am Beispiel der Kunststoffbranche*, in: Winkler, Herwig (Hrsg.): *Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management. Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0*, Berlin (Logos Verlag), 2017

Berger, Uwe; Hartmann, Andreas; Schmid, Dietmar: *3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren*, 2. Auflage, Haan (Verlag Europa-Lehrmittel), 2017

Dudenhöffer, Ferdinand: *Wer kriegt die Kurve? Zeitenwende in der Autoindustrie*, Frankfurt am Main (Campus Verlag), 2016

Fastermann, Petra: *3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*, 2. Auflage, Berlin (Springer Vieweg), 2016

Feldmann, Carsten; Pumpe, Andreas: *3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit. Entscheidungsunterstützung für Unternehmen*, Wiesbaden (Springer Gabler), 2016

Feldmann, Carsten; Gorj, Anneliese: *3D-Druck und Lean Production. Schlanke Produktionssysteme mit additiver Fertigung*, Wiesbaden (Springer Gabler), 2017

---

Feldmann, Carsten; Schulz, Colin; Fernströning, Sebastian: *Digitale Geschäftsmodell-Innovationen mit 3D-Druck. Erfolgreich entwickeln und umsetzen*, Wiesbaden (Springer Gabler), 2019

Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Thurn, Laura: *3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, 2. Auflage, München (Carl Hanser Verlag), 2016

Glück, Markus: *Industrie 4.0. 100 Fragen - 100 Antworten*, Düsseldorf (Symposion Publishing), 2016

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

Hillebrecht, Martin et al.: *Leichtbau für mehr Energieeffizienz*, in: Siebenpfeiffer, Wolfgang (Hrsg.): *Leichtbau-Technologien im Automobilbau. Werkstoffe – Fertigung – Konzepte*, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014

Ihme, Joachim: *Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*, München (Carl Hanser Verlag), 2006

Jodin, Dirk; Landschützer, Christian: *Smart Logistics: Intelligente Logistik für flexible Fabriken*, in: Winkler, Herwig (Hrsg.): *Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management. Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0*, Berlin (Logos Verlag), 2017

Klug, Florian: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*, 2. Auflage, Berlin (Springer Vieweg), 2018

Kosche, Thomas: *Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile*, in: Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian; Kaieler, Stefan (Hrsg.): *Additive Serienfertigung. Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung*, Berlin (Springer Vieweg), 2018

---

Lipson, Hod; Kurman, Melba: *Die neue Welt des 3D-Drucks*, Weinheim (WILEY-VCH Verlag), 2014

Schade, Wolfgang et. al.: *Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030*, Berlin (edition sigma), 2014

Schönsleben, Paul: *Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*, 7. Auflage, Berlin (Springer Vieweg), 2016

Schulte, Christof: *Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain*, 7. Auflage, München (Verlag Franz Vahlen), 2017

Sommer, Werner; Schlenker, Andreas; Lange-Schönbeck, Claus-Dieter: *Faszination 3D-Druck. Alles zum Drucken, Scannen, Modellieren*, 2. Auflage, Burgthann (Markt+Technik Verlag), 2018

Thissen, Sarah: *Planung von logistischen Maßnahmen für globale Liefernetzwerke. Identifikation, Parametrierung, Kombination und Bewertung von beschaffungslogistischen Maßnahmen zur operativen Engpassvermeidung am Beispiel der Automobilindustrie*, in: Kuhn, Axel (Hrsg.): *Unternehmenslogistik*, Dortmund (Verlag Praxiswissen), 2019

Zanker, Christoph; Som, Oliver; Kinkel, Steffen: *Innovationen in der Produktion. Ein multiperspektivischer Ansatz*, Stuttgart (Fraunhofer Verlag), 2013

## **Zeitschriften**

Bauer, Markus: *Wachsende Ersatzteile*, in: *Lastauto Ombibus. Test – Technik – Trends*, 10/2017, S. 72-73

Fichtner, Ullrich et al.: *Motorschaden*, in: *DER SPIEGEL*, 44/2019, S. 10-22

Gärtner, Ralf; Lohn, Johannes: *Additive Fertigung in der metallverarbeitenden Industrie*, in: *Konstruktion. Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieurwerkstoffe*, 5/2018, S. 50-52

Hopmann, Christian: *Schichtweise vom Granulat zum Bauteil*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 11/2018, S. 22-25

Keßling, Oliver: *Additive Adoleszenz*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 10/2018, S. 66-74

Klotz, Karlhorst: *Willkommen in der 3D-Wunderwelt*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 1/2018, S. 38-39

Leupold, Andreas: *Wenn Daten zu Produkten werden*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 5/2018, S. 32-33

Pöhler, Frank Michael; Bauer, Sebastian; Feucht, Thomas: *Gedruckte Spritzgießformen für kleine Stückzahlen*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 11/2018, S. 45-47

Schmertusch, Thomas: *Digitale Weichenstellung*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 5/2018, S. 65-69

Stein, Andreas: *Technologiesprung in die Zukunft*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 4/2018, S. 31-33

Weinmann, Sandra; Benz, Johannes; Bonten, Christian: *Die Mischung macht's nicht besser*, in: *Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Anwendung*, 2/2018, S. 76-78

Zimmer, Knut: *Dreidimensionale Zukunft*, in: *Werkstatt aktuell. Das Magazin für Nutzfahrzeugwerkstätten*, 1/2018, S. 22-23

---

## Berichte

Ernst & Young GmbH: *EY's Global 3D Printing Report 2019*, Oktober 2019

## Internetquellen

<https://www.autodesk.de/redshift/zukunft-automobildesign-generatives-design/>

(Zugriff am: 07.01.2020)

<https://blogs.autodesk.com/presse-center-deutschland/2019/04/01/general-motors-entwickelt-erste-3d-gedruckte-sitzhalterung-fur-autos/>

(Zugriff am: 07.01.2020)

<https://www.bmw.com/de/innovation/3d-druckerei.html>

(Zugriff am: 17.12.2019)

<https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/2018/3d-druck.html>

(Zugriff am: 19.12.2019)

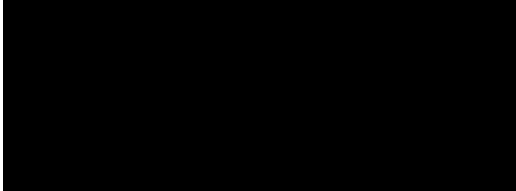


---

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 30.01.2020



Kelly Liao

## Einverständniserklärung

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass ein Exemplar meiner Bachelor-Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird; Rechte Dritter werden dadurch nicht verletzt.

Hamburg, den 30.01.2020



Kelly Liao