

3D-Druck für die Ersatzteilversorgung in der Automobil- und Luftfahrtindustrie

Additive Manufacturing for the supply
chain of spare parts in the automotive
and aircraft industry

Ersteller/-in: Lukas Paskert
Semester: Wintersemester 19/20
Prüfer/-in: Prof. Dr. Reinhard Koether
Anmeldedatum: 21.01.2020

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential des 3D-Drucks in konkreten Anwendungsgebieten der Ersatzteilversorgung der Automobil- und Luftfahrtindustrie aufzuzeigen. Bei der Betrachtung der Fragestellung wurde unterstellt, dass der Markt der beiden Industrien viele noch ungenutzte Potentiale bietet.

Der 3D-Druck hat sich in den letzten Jahren hinsichtlich Druckqualität und Druckzeit stark weiterentwickelt und hat den Sprung vom Fertigungsverfahren für Prototypen zum Fertigungsverfahren auch für die Serienproduktion geschafft. Die Luftfahrtindustrie zeigt bereits erste Beispiele von Serienteilen aus einem additiven Herstellungsprozess.

Mit einer detaillierten Betrachtung der vier Themengebiete 3D-Druck, Ersatzteile, Automobilindustrie, Luftfahrtindustrie sollen die wichtigsten Kriterien jedes Gebietes erklärt werden. Das Wissen aus den geführten Experteninterviews unterstützt die Wahl der betrachteten Merkmale jedes Themengebiets. Auf dessen Basis wurde ein Bewertungskatalog erstellt, in dem sich die angesprochenen Merkmale wiederfinden. Der Bewertungskatalog ist die Grundlage für die Analyse von Beispielen aus den beiden betrachteten Industrien, für das Potential den 3D-Druck für die Ersatzteilproduktion einzusetzen.

Die limitierte Literatur zu diesem speziellen Einsatzfall der noch neuen Fertigungstechnologie wurde mit Sekundärquellen und ingenieurmäßigen Abschätzungen komplementiert.

Die Analyse der Beispiele zeigt in der Automobilindustrie, dass der Einsatz des 3D-Drucks vor Allem durch eine Reduktion von Wertschöpfungskosten gerechtfertigt werden kann, aber auch durch das Schaffen von Individualität für Nischenmärkte. In der Luftfahrtindustrie haben zwar auch die Wertschöpfungskosten einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl der Fertigungsmethode, aber in starkem Maße auch die Faktoren Leichtbau und Wiederbeschaffungszeit.

Inhaltsverzeichnis:

I.	Abbildungsverzeichnis.....	V
II.	Abkürzungsverzeichnis.....	VI
III.	Tabellenverzeichnis	VII
1	Einleitung.....	1
2	Themeneingrenzung.....	2
2.1	Abgrenzung entlang der Wertschöpfungskette.....	3
2.2	Industrien.....	4
2.3	Materialien.....	5
3	Additive Herstellungsverfahren	6
3.1	Abgrenzung und Definition	6
3.2	Einteilung der additiver Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand des Rohmaterials.....	9
3.3	Additive Fertigung aus der flüssigen Phase - Laserstereolithografie	10
3.4	Additive Fertigung aus der festen Phase	12
3.4.1	Binder Jetting	12
3.4.2	Fused Layer Molding	13
3.4.3	Lasersintern	15
3.5	Überblick der additiven Fertigungsverfahren.....	17
4	Definition des Ersatzteilmarktes	18
4.1	Ersatzteilklassifikation.....	18
4.2	Ersatzteilmanagement.....	19
4.2.1	Ersatzteilproduktion	20
4.2.2	Ersatzteillagerung.....	22
4.2.3	Distribution von Ersatzteilen.....	23
4.3	Instandhaltungsstrategien	24
4.4	Produkthaftung im Ersatzteilgeschäft.....	26

4.5	Gesetzliche Rahmenbedingungen im Ersatzteilwesen	27
4.5.1	Patentschutz von Ersatzteilen	27
4.5.2	Markenschutz von Ersatzteilen	28
4.5.3	Designschutz von Ersatzteilen.....	29
5	Additive Fertigung für Ersatzteile	30
5.1	Neukonstruktion von Ersatzteilen	30
5.1.1	Das Konstruieren von komplexen Geometrien	31
5.1.2	Das Konstruieren von integrierten Geometrien.....	32
5.1.3	Das Konstruieren von integrierten Funktionen	33
5.2	Änderungen in der Supply Chain von Ersatzteilen durch additive Fertigung	34
6	Überblick der Supply Chain von Ersatzteilen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie .	36
6.1	Ersatzteilwesen in der Luftfahrtindustrie	36
6.2	Ersatzteilwesen in der Automobil-Industrie	36
7	Wichtige Kernaussagen von Experten aus der industriellen Praxis.....	37
7.1	Gründe für den Einsatz des 3D-Drucks in der Ersatzteilversorgung.....	38
7.2	Anwendungsgebiete des 3D-Drucks in der Ersatzteilproduktion	39
7.3	Besonderheiten der Automobil- und Luftfahrtindustrie	40
8	Entwicklung eines Bewertungsschemas mit Anwendungsbeispielen.....	40
8.1	Bewertungskategorien und Maßstäbe.....	41
8.2	Anwendungsbeispiele Automobilindustrie.....	44
8.2.1	Interieur Lampe	44
8.2.2	Frontstoßstangen Spoiler.....	48
8.3	Anwendungsbeispiele Luftfahrtindustrie	51
8.3.1	Lüftungskanäle	51
8.3.2	Blende für Gepäckfächer.....	53
9	Resümee und Ausblick	56
10	Literatur.....	59
11	Anhang.....	64

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnittmengendiagramm der untersuchten Themenfelder.....	2
Abbildung 2: Marktverteilung des additiven Drucks auf die verschiedenen Anwendungsgebiete (Dr. Mark J. Cotteleer, 1. Oktober 2014)	3
Abbildung 3: Umsatzerlöse des 3D-Druck in verschiedenen Sektoren (Dr. Mark J. Cotteleer 2014).....	5
Abbildung 4: Prozesskette der Additiven Fertigungsverfahren (Gebhardt 2019).....	7
Abbildung 5: Modellhafte Vereinfachung einer Kugel durch Dreiecks-Facettenstruktur (Mark3D UK Limited)	8
Abbildung 6: Automatisch generierte Stützstruktur eines Metallteils (Griffith Laura, 2019) ...	8
Abbildung 7: Klassifikation der additiven Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand (Fest und Flüssig) (Kumke, 2018).....	9
Abbildung 8: Laserstereolithographie - Prinzipdarstellung (Netz Konstrukteur, 2019).....	10
Abbildung 9: 3D-Drucken- Prinzipdarstellung (Zeidler Stephan, 2019).....	12
Abbildung 10: FLM- Prinzipdarstellung (3D-Druckcenter)	14
Abbildung 11: Laser-Sinter-Prinzipdarstellung (Netz Konstrukteur, 2019).....	15
Abbildung 12: Vergleich additiver Fertigungsverfahren	17
Abbildung 13: Systematik der Ersatzteilarten (Schröter, 2006)	18
Abbildung 14: Bewertung verschiedener Versorgungsansätze (Schröter, 2006).....	20
Abbildung 15: 3D-Netzstruktur (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019)	31
Abbildung 16: Beispielhafter konventioneller Produktionsprozess (Chua und Leong, 2017)	32
Abbildung 17: Vereinfachter additiver Fertigungsprozess (Chua und Leong, 2017)	32
Abbildung 18: 3D gedruckte Kraftstoffdüse einer Boing 737 Max (Chua und Leong, 2017)	33
Abbildung 19: Planetengetriebe gedruckt als ein Bauteil (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019)	34
Abbildung 20: Ergebnisse einer Simulation der Supply Chain Kosten in Euro (Li et al., 2016)	35
Abbildung 21: Interieur Lampe (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019).....	44
Abbildung 22: Audi RS4 Frontspoiler (Gebhardt, 2016).....	48
Abbildung 23: Zwei Bauteile eines Lüftungskanalsystems (EOS GMBH).....	51
Abbildung 24: Gepäckfachblenden (Materialise)	54

II. Abkürzungsverzeichnis

3DP	<i>3D-Drucken</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
SL	<i>Laser-Stereolithografie</i>

III. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Interieur Leuchte Bewertungskatalog</i>	46
<i>Tabelle 2: Frontstoßstange Spoiler Bewertungskatalog</i>	49
<i>Tabelle 3: Lüftungskanäle Bewertungskatalog</i>	52
<i>Tabelle 4: Gepäckfachblenden Bewertungskatalog</i>	55

1 Einleitung

Jeder Haushalt in Deutschland braucht einen 3D-Drucker, um Ersatzteile für alltägliche Produkte wie das Auto, die Waschmaschine oder den Fernseher schnell zu Hause drucken zu können. Ein Szenario, das zu Beginn dieses Jahrtausends mit der Entwicklung des 3D-Druckes in den Medien verbreitet wurde. Zwar sind die Kosten für privat genutzte 3D-Drucker in den letzten Jahren um circa die Hälfte gefallen (von circa 500 auf 250 Euro), trotzdem ist der Druck von Ersatzteilen im Privathaushalt aufgrund der hohen Materialkosten immer noch unwirtschaftlich und dementsprechend wenig weit verbreitet (Marx Uwe, 2. Januar 2020).

In der Industrie hingegen zeigt sich ein anderes Bild. Die additive Fertigung ist in der Herstellung von medizinischen Produkten ein fester Bestandteil. Zahnersatz, Prothesen oder Implantate stellen auch eine Art Ersatzteil dar, das schon heute in der Praxis häufig durch 3D- Druck kundenspezifisch hergestellt werden. Die Firma EOS GMBH, der Pionier der 3D-Druck Industrie, wirbt mit seinen Fähigkeiten, Ersatzteile in der Luftfahrtindustrie nach Kundenwunsch drucken zu können und die Automobilindustrie produziert Ersatzteile für Oldtimer (Edlund Peter, 2017, S. 14–18).

Die Entwicklung des 3D-Drucks ist damit aber bei Weitem noch nicht ausgereizt. Das Beratungsunternehmen PWC erwartet ein jährliches Wachstum von 13 bis 23 Prozent (Marx Uwe, 2. Januar 2020). Dieses Potential wird für das Produktionsverfahren 3D-Druck insgesamt erwartet. Diese Arbeit soll zeigen, in welchen Anwendungsgebieten der Ersatzteilversorgung der Automobil- und Luftfahrtindustrie das Potential des 3D-Drucks liegt. Die Vorgehensweise dieser Arbeit ist eine tiefgreifende Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren und eine vergleichende Bewertung der Herstellung von Ersatzteilen nach additiver bzw. konventioneller Methodik. Die vier verschiedenen Themengebiete und deren Zusammenspiel zeigt nachfolgende Abbildung 1: Schnittmengendiagramm der untersuchten Themenfelder:

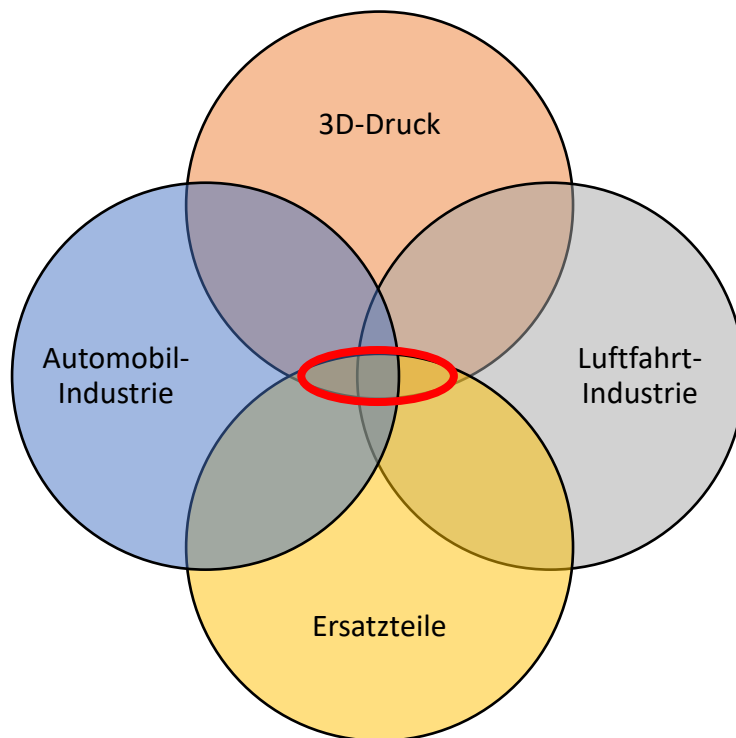


Abbildung 1: Schnittmengendiagramm der untersuchten Themenfelder

Zunächst werden die Prozesse und Methoden der aktuellen additiven Fertigungsverfahren erklärt und die Aufgaben und Herausforderungen im Ersatzteilmanagement aufgezeigt. Für die Anwendung dieser Kriterien auf die Automobil- und Luftfahrtindustrie werden die wichtigsten Eigenheiten der beiden Industrien herausgestellt, die für die Wahl des Produktionsverfahrens entscheidend sein können.

In der rot eingezeichneten Schnittmenge des obigen Schaubilds werden die wichtigsten Kriterien für eine Entscheidung für oder gegen den 3D-Druck in einen Bewertungskatalog zusammengefasst. Beispiele illustrieren mögliche Anwendungen der Potentialanalyse.

2 Themeneingrenzung

Für eine tiefgreifende Analyse des 3D-Drucks ist es erforderlich, sich auf ausgewählte Aspekte der Wertschöpfungskette, Industrien und Materialien zu fokussieren.

2.1 Abgrenzung entlang der Wertschöpfungskette

Die Wertschöpfungskette eines Unternehmens beginnt in der Industrie üblicherweise mit der Entwicklung. Nach Entwicklung eines Prototyps und ausreichenden Tests gelangt ein Produkt in die Produktion. Nach dem Verkauf/Vertrieb folgen im Lebenszyklus eines Produktes Service- und After Sale Aktivitäten. Die Anwendungshäufigkeit des 3D-Drucks lässt sich anhand der Wertschöpfungskette gut abgrenzen (Jackson, 2009, S. 37–41).

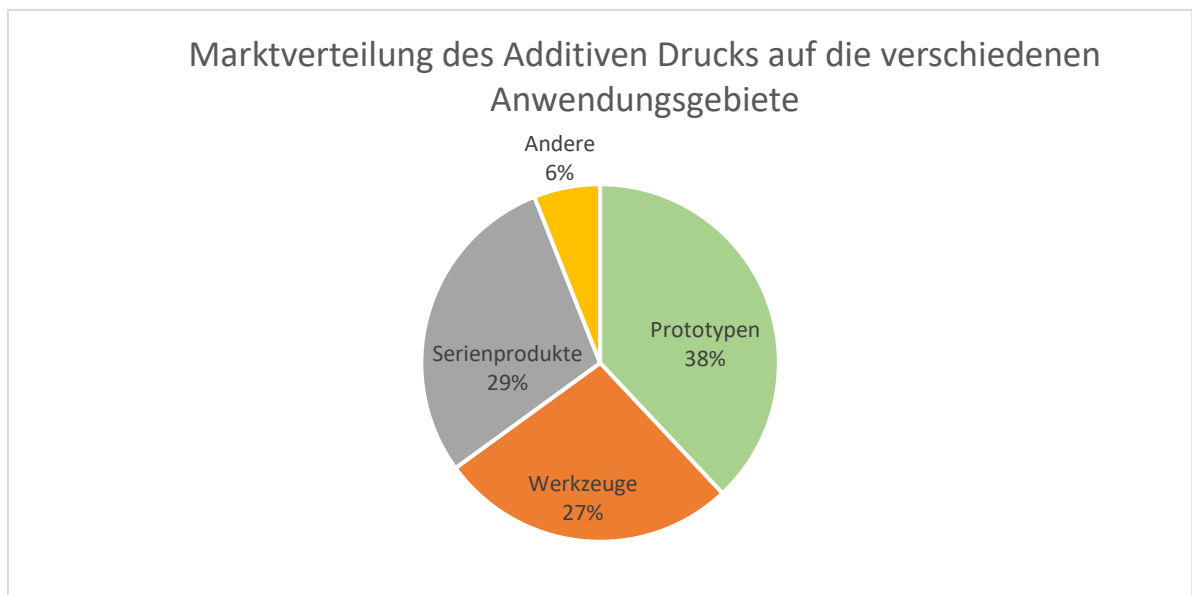


Abbildung 2: Marktverteilung des additiven Drucks auf die verschiedenen Anwendungsgebiete (Dr. Mark J. Cotteleer, 1. Oktober 2014)

Der 3D-Druck ermöglicht im Gegensatz zu den konventionellen Herstellungsverfahren Designideen kostengünstig und schnell zu produzieren. Eine schnelle und reale Darstellung einer Idee wird hauptsächlich im Bereich der Entwicklung zum Prototypenbaus (Anteil an der Marktverteilung: 38%) eingesetzt (Fischer und Rommel, 2015, S. 14). Diese Prototypen imitieren ein 3-dimensionales Bild oder Skulpturen eines Bauteils und können meist nicht physisch belastet werden. Sie dienen dazu, komplexe 3D-Zeichnungen zu veranschaulichen, meist auch in einen kleineren Maßstab.

Mit 27% das dritthäufigste Einsatzgebiet von additiven Fertigungsverfahren ist im Bereich der Produktion von Werkzeugen für die Fertigung eines Bauteils im konventionellen Herstellungsprozess. Dies umfasst die Herstellung von Kernen und Hohlräumen für den Gießprozess und die Herstellung von Einsätzen für Umform- und Spritzgusswerkzeuge.

In den Bereich der Serienproduktion, mit 29% der zweithäufigste Anwendungsfall, fallen nicht nur die Bauteile, die vom Hersteller in der Produktion erstmalig verbaut werden, sondern auch Ersatzteile, die ein Bauteil eines Endproduktes ersetzen. Gerade im Ersatzteilmereich wird in der Literatur dem 3D-Druck großes Wachstumspotential zugesprochen, weshalb dieser Bereich Gegenstand dieser Arbeit ist (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 7–13).

Bei der Auswahl, welche Ersatzteile für die Herstellung mit 3D-Druck geeignet sind, ist es wichtig zu klären mit welchem Fertigungsverfahren das zu ersetzende Teil produziert wurde. Wurde das zu ersetzende Teil in der Serienproduktion durch ein additives Fertigungsverfahren hergestellt, sind die gleichen Prozesse auch zur Herstellung des Ersatzteils anwendbar. Wurde dagegen bei der Entwicklung eines Bauteils für die Serienfertigung ein konventionelles Herstellungsverfahren ausgewählt, muss vor der erstmaligen Produktion des Ersatzteils mit additiven Herstellungsverfahren ein eigener Entwicklungsprozess (abweichend zur konventionellen Fertigung) durchlaufen werden und das Bauteil als Ersatzteil freigegeben werden (Kovacs und Kochan, 2013, S. 119). Dieser Entwicklungsprozess wird in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet, jedoch werden Faktoren wie Entwicklungszeit und –kosten in der späteren Bewertung berücksichtigt. Damit wird ein entwickelter und getesteter Datensatz, der den Richtlinien der Branche entspricht, für die Fertigung mit additiven Fertigungsverfahren vorausgesetzt. Die Produkteigenschaften, die das Ersatzteil erfüllen muss, um eine Freigabe für den Verkauf zu bekommen, sind je nach Bauteil und Branche sehr unterschiedlich. Sind spezielle Richtlinien einzuhalten, werden diese für jedes gewählte Praxisbeispiel im Kapitel „8“ einzeln betrachtet.

Des Weiteren definieren Feldmann, Schulz und Fernströning (2019) das „Rapid Repairing“. Bei diesem Verfahren werden Bauteile, die dem Verschleiß ausgesetzt sind, durch additiven Materialauftrag repariert (Feldmann, Schulz und Fernströning, 2019, S. 11–12). Dieser Einsatzfall des 3D-Drucks wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da dieses Verfahren nur in sehr speziellen Anwendungsfällen sinnvoll ist und in der Literatur daher sehr selten erwähnt wird.

2.2 Industrien

Eine Studie von Dr. Mark J. Cotteleer zeigt den Anteil der Umsatzerlöse von 3D-Druck Systemen je Industriesektor bzw. Industrie-Gruppen (Abbildung 3: Umsatzerlöse des 3D-Druck in verschiedenen Sektoren (Dr. Mark J. Cotteleer 2014)). Demnach verzeichnet

die Automobilindustrie mit 17% den größten Anteil an den Gesamterlösen auf dem 3D-Druck Markt, gefolgt von der Medizintechnik (14%) und der Luftfahrtindustrie (12%). Zum Vergleich, die 3 zuvor genannten Industrien (43%) haben insgesamt einen höheren Anteil als alle anderen Industrien zusammen, die industrielle Produkte und Konsumgüter herstellen (37%) (Dr. Mark J. Cotteleer, 1. Oktober 2014, S. 7).

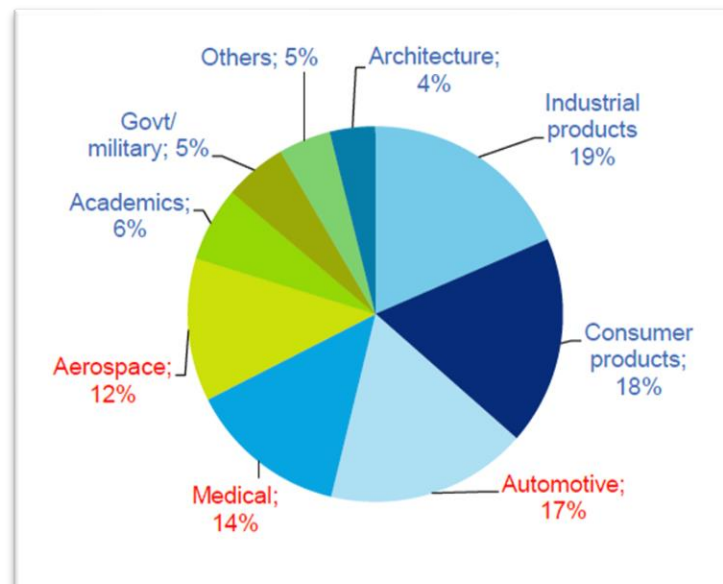


Abbildung 3: Umsatzerlöse des 3D-Druck in verschiedenen Sektoren (Dr. Mark J. Cotteleer 2014)

Für einen Vergleich der Anwendungsmöglichkeiten in zwei verschiedenen Industrien werden in dieser Arbeit, die Automobil- und die Luftfahrtindustrie näher betrachtet. Die Produkte dieser Branchen sind in einigen Punkten vergleichbar, in anderen Punkten wiederum abweichend.

2.3 Materialien

Der 3D-Druck wird bereits in vielen Industrien angewendet. Dadurch wächst der Markt für Anbieter von neuen Materialien und neuen Druckern weiter, obwohl der Markt bereits heute ein großes Spektrum an Werkstoffen und Produktionsverfahren aufweisen kann. Begonnen hat die additive Fertigung in der Verarbeitung von Kunststoff in den frühen 1990er Jahren. Später folgten Materialien wie Metall, Keramik, Verbundwerkstoffe, Beton bis hin zu Lebensmitteln (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 167–185).

Die betrachteten Industrien des Automobil- und Flugzeugbaus verarbeiten vornehmlich Produkte aus Metall und Kunststoff, aber auch aus Verbundwerkstoffen und Keramik (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 102–130). Um ein großes Spektrum an Ersatzteilen abzudecken ohne dabei die Vergleichbarkeit zu verlieren, befasst sich diese Arbeit ausschließlich mit Produkten aus Metall und Kunststoff.

3 Additive Herstellungsverfahren

3.1 Abgrenzung und Definition

Andreas Gebhardt definiert die Fertigungsverfahren anhand der Erzeugung von Geometrien. Unterschieden wird dabei zwischen:

- Subtraktiven Fertigungsverfahren, bei denen Material von einem Rohling mit Hilfe von Werkzeugen abgetragen wird, bis das Bauteil der gewünschten Geometrie entspricht.
- Formativen Fertigungsverfahren, die Werkzeuge verwenden, um die Formen und Eigenschaften der Bauteile durch Umformung herzustellen.
- Additive Fertigungsverfahren, die Form und Eigenschaften der Bauteile durch das „Aneinanderfügen von Volumenelementen“ erzeugen. Die Volumenelemente sind dabei einzelne Schichten, die aneinandergefügt werden (Gebhardt, 2016, S. 3–4).

Die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren unterscheiden sich durch unterschiedliche Prozessketten. Jedoch fußen sie alle auf dem gleichen Basis-Prozess mit den nachfolgenden vier Schritten (Abbildung 4: Prozesskette der Additiven Fertigungsverfahren (Gebhardt 2019)):

Schritt 1: Der Ausgangspunkt des Basis-Prozesses ist ein virtuelles 3D-CAD-Volumenmodell, welches das spätere Endprodukt darstellen soll. Die Erzeugung der CAD-Datei kann über 3 Verfahren durchgeführt werden (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 3–5):

- 3D-CAD- Software: Das Modell wird nach den vorgegebenen Maßen in einer CAD-Software erzeugt.

- 3D-Scannen: Das Scansystem erzeugt eine dreidimensionale Darstellung eines oder mehrerer Bauteile durch das Abtasten der Außenkontur (Yukhin, 2017).
- Computer Tomographie Scan: Das Bauteil wird mithilfe von Röntgentechnik zerstörungsfrei in Schichten aufgeteilt. Durch die Digitalisierung aller Innen- und Außenstrukturen dieser Schichten kann das Bauteil in ein CAD-Modell übertragen werden (Zeiss Industrielle Messtechnik).

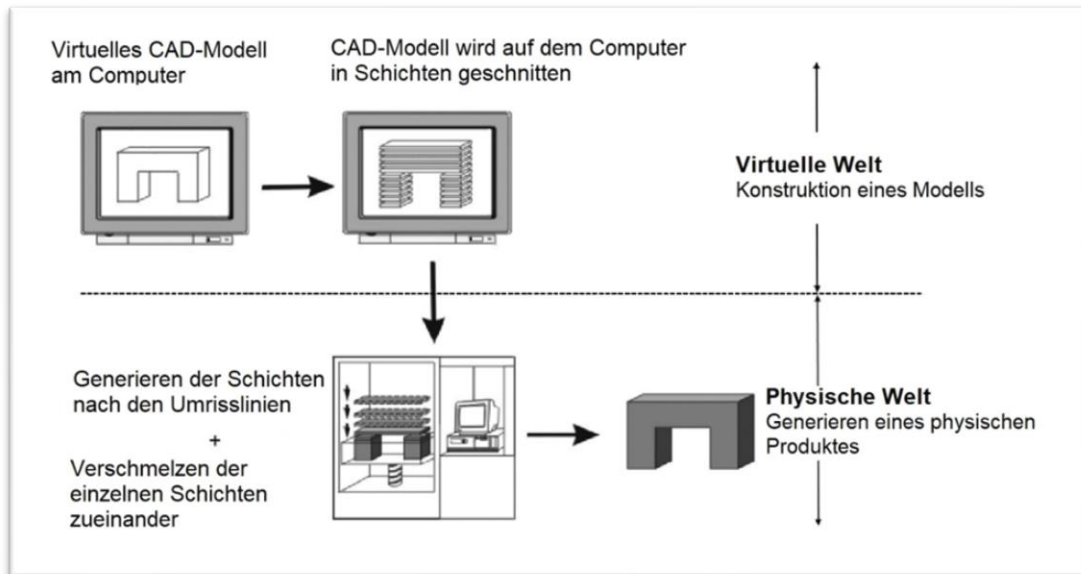


Abbildung 4: Prozesskette der Additiven Fertigungsverfahren (Gebhardt 2019)

Schritt 2: Unabhängig davon, wie das CAD-Modell erstellt wurde, wird das Modell mit einer speziellen 3D-DruckSoftware in ein Schichtenmodell zerschnitten. Neben dem Zerschneiden formatiert die Software die Modelloberfläche zu Dreiecks-Facetten (Abbildung 5: Modellhafte Vereinfachung einer Kugel durch Dreiecks-Facettenstruktur), da gekrümmte Flächen mit Dreiecks-Geometrien angenähert werden (Kumke, 2018, S. 9–11).

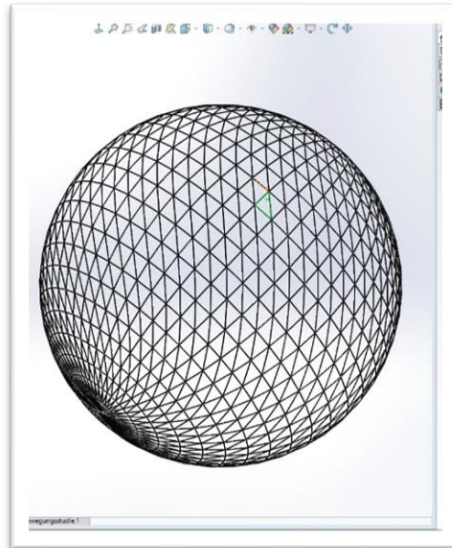


Abbildung 5: Modellhafte Vereinfachung einer Kugel durch Dreiecks-Facettenstruktur (Mark3D UK Limited)

Schritt 3 in der Basis - Prozesskette der additiven Fertigung liegt im Übergangsbereich zwischen der virtuellen und der physischen Welt (Abbildung 6: Automatisch generierte Stützstruktur eines Metallteils). Das Bauteil wird für den Druckprozess im Bauraum des Drucks positioniert („Nesting“). Für den Druck kann ein Bauteil Stützstrukturen benötigen, die das Bauteil während des Drucks stabilisieren oder bei der Wärmeabfuhr helfen.

Schritt 4 besteht in dem eigentlichen Druck des Bauteils. Dieser läuft vollautomatisch



Abbildung 6: Automatisch generierte Stützstruktur eines Metallteils (Griffith Laura, 2019)

und variiert je nach Fertigungsverfahren. Die additiven Fertigungsverfahren werden in Kapitel 3.3 Additive Fertigung aus der flüssigen Phase und Kapitel 3.4 Additive Fertigung aus der festen Phase näher beschrieben.

3.2 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand des Rohmaterials

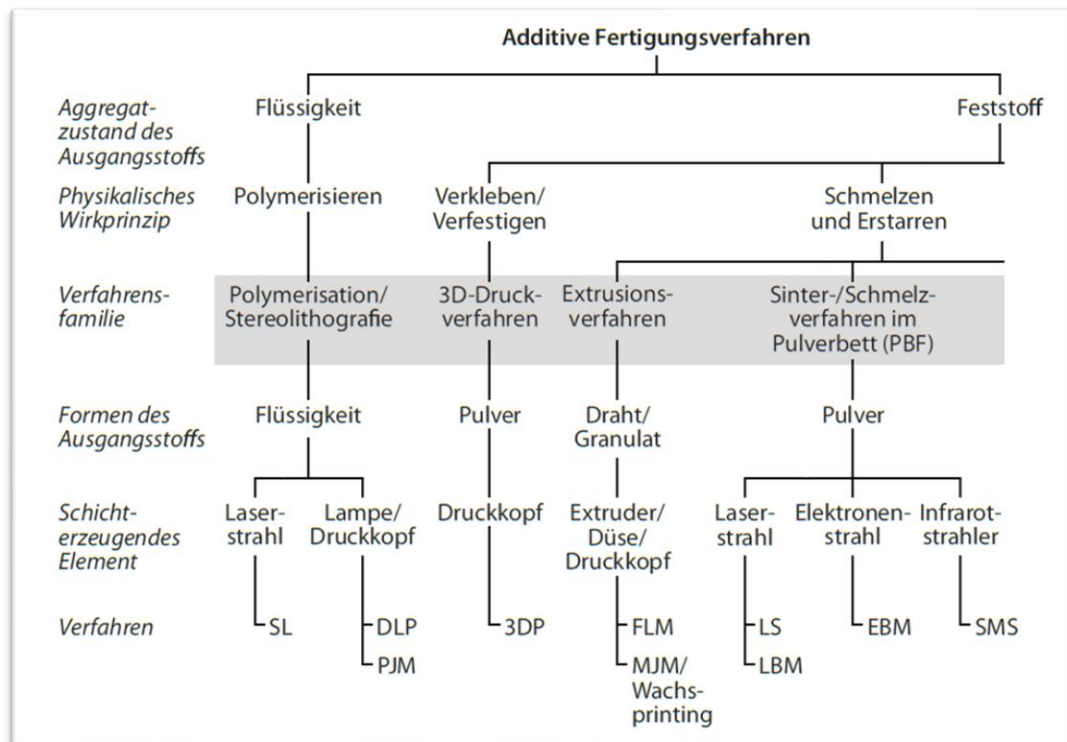


Abbildung 7: Klassifikation der additiven Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand (Fest und Flüssig) (Kumke, 2018)

Bei der Einteilung der Verfahren wird die Struktur von Gebhardt (2016) herangezogen, da diese Einteilung sich in der Wissenschaft und Praxis durchgesetzt hat (Kumke, 2018, S. 12). Er unterteilt die additiven Fertigungsverfahren nach dem „Aggregatzustand des Ausgangsmaterial“

- Additive Fertigung aus der flüssigen Phase
- Additive Fertigung aus der festen Phase
- Additive Fertigung aus der gasförmigen Phase (wird aufgrund der geringen Anwendung im Folgenden nicht weiter betrachtet)

Unabhängig vom Aggregatzustand des Rohmaterials, arbeiten alle additiven Fertigungsverfahren in zwei Teilschritten:

1. Erzeugen einer Schicht im 2-dimensionalen Bereich
2. Verbinden der Schichten zu einem 3-dimensionalen Bauteil.

Das Verbinden der Schichten geschieht bei allen additiven Fertigungsverfahren (außer dem Schicht-Laminat-Verfahren) nach demselben Wirkprinzip. Die Prozesstemperatur, die benötigt wird, um das Rohmaterial auf Betriebstemperatur zu bringen, wird so eingestellt, dass die untere Schicht die nötige Energie behält, um sich mit der nachfolgenden Schicht zu verbinden. Bei Druckverfahren, die mit Bindemittel arbeiten, muss der Trocknungsprozess so eingestellt werden, dass sich die Schichten noch miteinander verbinden können (Gebhardt, 2016, S. 47).

Die Darstellung ausgewählter Verfahrensprinzipien folgt im nächsten Kapitel. Abgegrenzt nach ihrer Phase wird je ein Verfahren einer Verfahrensfamilie (Abbildung 7: Klassifikation der additiven Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand (Fest und Flüssig)) beispielhaft beschrieben.

3.3 Additive Fertigung aus der flüssigen Phase - Laserstereolithografie

Die additiven Fertigungsverfahren, die mit einer flüssigen Phase arbeiten, basieren auf dem Wirkprinzip der Polymerisation. Die Polymerisation verkettet in einer chemischen Reaktion Monemere zu Polymeren. Angetrieben wird diese chemische Reaktion durch punktförmig eingebrachtes Licht, dass die flüssigen Harze in der Polymerisation fest werden lässt. Additive Fertigungsverfahren, die auf dem Verfahrensprinzip der

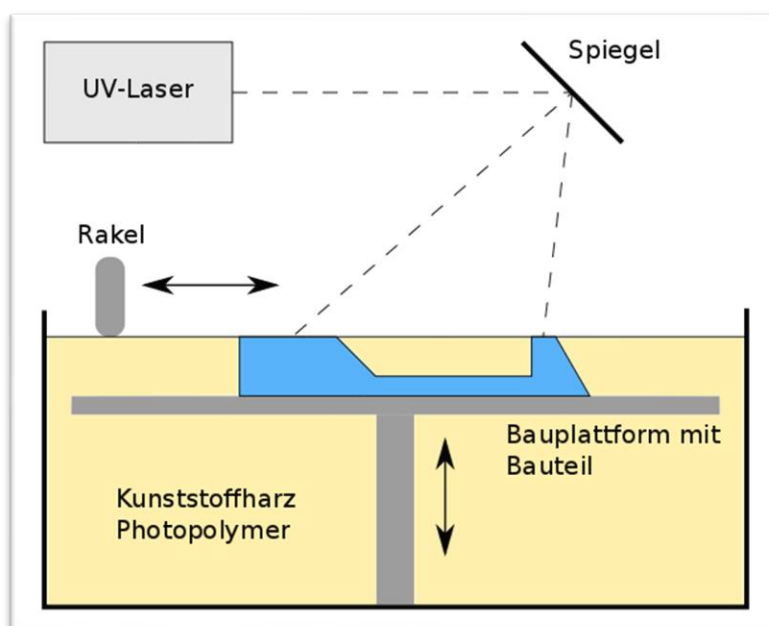


Abbildung 8: Laserstereolithografie - Prinzipdarstellung (Netz Konstrukteur, 2019)

Polymerisation beruhen, gehören zu der Verfahrensfamilie der Stereolithografie. Unterschieden wird in der Verfahrensfamilie anhand der eingesetzten Lichtquelle.

Als Lichtquelle wird in der Stereolithografie am häufigsten der Laser eingesetzt. Der Strahl des Lasers wird über ein Spiegelsystem an die gewünschte Stelle auf das Bauteil umgelenkt (Abbildung 8: Laserstereolithographie - Prinzipdarstellung).

Das Bauteil liegt in einem Bad aus Harz des Monomers auf einer Bauplattform. Die oberste Schicht des Bauteils ist dabei immer von einer dünnen Schicht des Harzes bedeckt. Die Dicke der Schicht wird über den Abstreifprozess mit der Rakel eingestellt.

Die Spiegeleinheit lässt den Laserstrahl die Kontur der zu erzeugenden Schicht abfahren. Die Energie des Lasers startet die Polymerisation des Monomers. Das Harz verhärtet sich. Für das Bedecken des Bauteils mit einer neuen Schicht des flüssigen Harzes senkt sich die Bauplattform um eine Schichtdicke nach unten ab und der Prozess startet von vorne, bis das Bauteil vollständig erzeugt wurde (Kumke, 2018, S. 222–223).

Vorteile der Stereolithografie:

- Trotz eingeschränkter Materialauswahl durch die notwendige Reaktivität des Monomer Harzes sind Kunststoffe in verschiedenen Farben (auch durchsichtig) und Härtestufen erhältlich.
- Die Genauigkeit der Fertigung ist nur abhängig von der Genauigkeit der Lichtquelle und der eingestellten Schichtdicke der Rakel. Diese Parameter können je nach Anforderungen eingestellt werden.

Nachteile der Stereolithografie:

- Durch die Einschränkung auf UV-aktive Materialien müssen Anforderungen an die Festigkeit hintenangestellt werden.
- Viele Drucker fordern einen zusätzlichen Schritt nach dem eigentlichen Druckvorgang. Nachdem das Bauteil gereinigt wurde, muss es zum Nachhärten unter eine UV-Lampe. Zudem müssen eingesetzte Stützstrukturen entfernt werden.

Eingesetzt wird die Laserstereolithografie für die Herstellung von Designprototypen und Funktionsprototypen, aber auch in geringerem Maße für die Serienproduktion (Gebhardt, 2016, S. 57–58).

3.4 Additive Fertigung aus der festen Phase

3.4.1 Binder Jetting

Binder Jetting (3DP) ist ein additives Pulver-Binder-Verfahren, bei dem die Schichten eines Modells durch das Einspritzen eines flüssigen Bindemittels in ein Pulverbett entstehen (Abbildung 9: 3D-Drucken- Prinzipdarstellung). Das Bindemittel wird aus einem oder mehrere Druckköpfe in kleiner Tropfenform auf das Pulver geschossen. Durch die Verwendung mehrerer Druckköpfe kann das Bindemittel eingefärbt werden. Somit lassen sich mehrfarbige Bauteile erzeugen.

Das flüssige Bindemittel wirkt wie ein Kleber und lässt die einzelnen Pulverkörner kristallisieren. Das Pulver kann aus unterschiedlichen pulverförmigen Materialien bestehen,

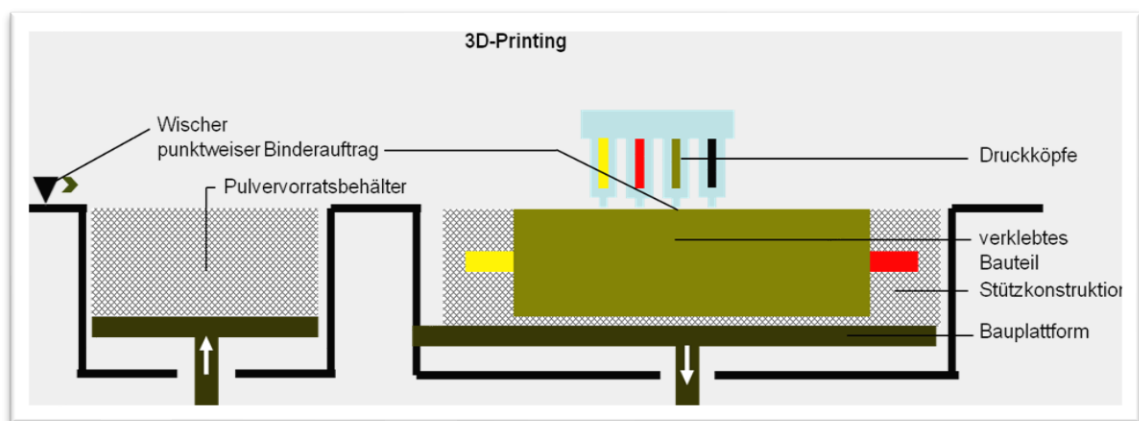


Abbildung 9: 3D-Drucken- Prinzipdarstellung (Zeidler Stephan, 2019)

vorrangig Kunststoffe, Metallpulver (meist Edelstahlpulver), Kalkpulver oder Gipspulver. Formsand wird beim Binder Jetting für die Herstellung von Formen für den Sandguss verwendet

Ähnlich wie bei der Laserstereolithografie wird die Bauplattform für jede Schicht abgesenkt. Ein Wischer bringt eine neue Pulverschicht aus dem Pulvervorratsbehälter auf das Bauteil auf. Ist der Druck abgeschlossen, wird das überschüssige Pulver um das Bauteil abgesaugt und kann für einen neuen Herstellungsprozess verwendet werden (Fastermann, 2012, S. 117–119).

Das erzeugte Bauteil, der so genannte Grünling, kann bei Verwendung von Metallpulver einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Der Grünling kann dadurch eine vergleichbare mechanische Belastbarkeit aufweisen wie ein Bauteil aus einem Metall-Druckgussverfahren (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 53–54).

Vorteile:

- Die verklebte Pulverschicht wächst Schicht für Schicht im Pulverbett heran und wird gleichzeitig durch das überschüssige Pulver gestützt. Somit sind keine zusätzlichen Stützstrukturen notwendig.
- Kostengünstiges und schnelles Verfahren im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren
- Durch das Einfärben des Bindemittels ist ein vollfarbiges Modell realisierbar.

Nachteile:

- Das Binder Jetting hat sehr große Toleranzen. Das Bindematerial bewirkt Anhaftungen, wodurch die Oberflächen sehr rau sind.
- Unabhängig von dem verwendeten Material ist eine Nachbearbeitung notwendig (Feldmann, Schulz und Fernströning, 2019, S. 118; Wirth, 2017, S. 17).

3.4.2 Fused Layer Molding

Fused Layer Molding (FLM) gehört zur Verfahrensfamilie der extrudierenden Fertigungsverfahren. Die verwendeten Materialien sind meist thermoplastische Kunststoffe oder Harze, die als Draht auf eine Spule aufgewickelt werden (Abbildung 10: FLM-Prinzipdarstellung). Für den Druckprozess wird der Draht in den Extruder über Transportrollen eingezogen. In der beheizten Düse im Extruder wird der Draht aufgeschmolzen und durch eine Düse auf die Bauplattform aufgetragen. Das Auskühlen auf der Bauplattform bewirkt eine Verfestigung des Materials. Ist eine Schicht vollständig gedruckt, senkt sich

die Plattform um die aufgetragene Materialschichtdicke nach unten, damit die nächste Schicht aufgetragen werden kann.

Trotz des schnellen Aushärtens des Materials sind Stützstrukturen notwendig. Viele Drucker haben für die Erzeugung der Stützstrukturen eine zweite Extrusionsdüse. Diese er-

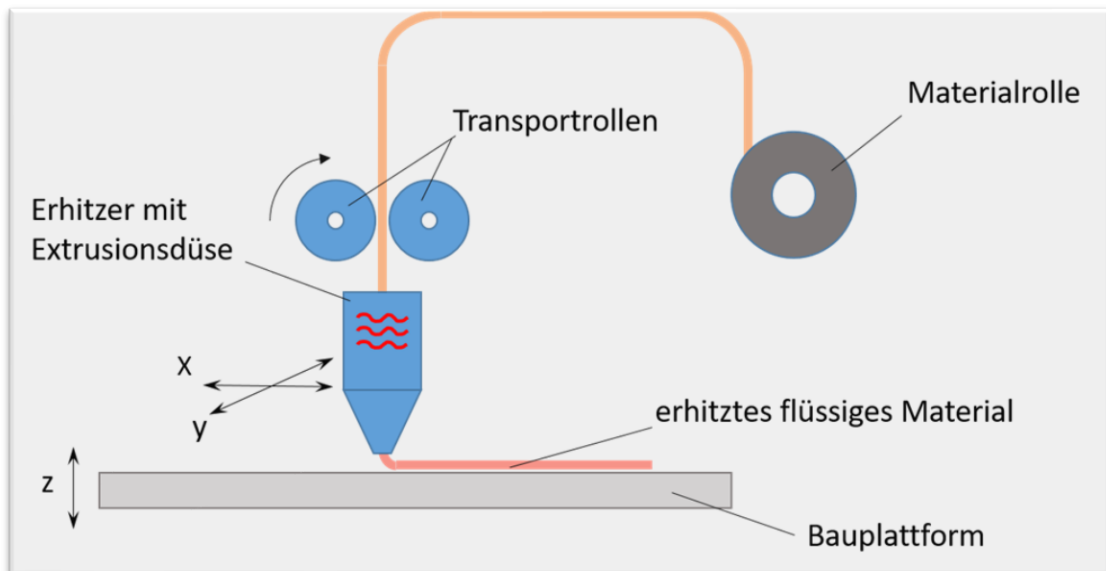


Abbildung 10: FLM- Prinzipdarstellung (3D-Druckcenter)

möglicht die Verwendung eines abweichenden Materials, das meist spröde ist, um es nach dem Druck besser entfernen zu können. Durch den Einsatz weiterer Düsen können auch verschiedene Materialien in einem Bauteil verwendet werden. Es ist sogar möglich das Material innerhalb einer Schicht zu wechseln (Horsch, 2013, S. 112; Gebhardt, 2016, S. 71–72).

Vorteile:

- Extrudierende Verfahren erlauben große Volumenmengen in kurzer Zeit aufzubringen.
- Es können eine Vielzahl verschiedener Materialien verwendet werden. Die Materialeigenschaften können dabei den der konventionellen Verfahren sehr nahe kommen.

Nachteile:

- Strukturen, die dünner sind als die Breite der Extrusionsdüse können nicht erzeugt werden

- Der Anfang einer Schicht ist immer mit einem punktförmigen Start verbunden. Selbst wenn der Druckprozess der Schicht an diesem Punkt endet, wird es Unregelmäßigkeiten in der Kontur geben (Gebhardt, 2016, S. 74).

3.4.3 Lasersintern

Lasersintern (LS) gehört zur Verfahrensfamilie der „Sinter-/Schmelzverfahren im Pulverbett“. Die Verfahren dieser Familie unterscheiden sich durch die unterschiedlichen Methoden zur Erzeugung der Energie, die zum Schmelzen des Pulvers benötigt wird. Neben dem Laser werden Elektronen- und Infrarotstrahlen als Energiequelle genutzt.

Das Lasersintern vereint Strukturen des Binder Jettings mit dem der Laserstereolithografie. Pulver wird mit einer Rakel aus dem Pulverbehälter auf die Bauplattform gestrichen (wie beim Binder Jetting). Der Laserstrahl wird über eine Spiegeleinheit selektiv auf die Bauplattform gerichtet. Über die Bewegung des Spiegels wird die zu erzeugende Kontur des Bauteils mit dem Laserstrahl abgefahren (wie Laserstereolithografie). Die Bauplattform senkt sich nach der Fertigstellung einer Schicht um eine Schichtdicke ab (Abbildung 11: Laser-Sinter-Prinzipdarstellung).

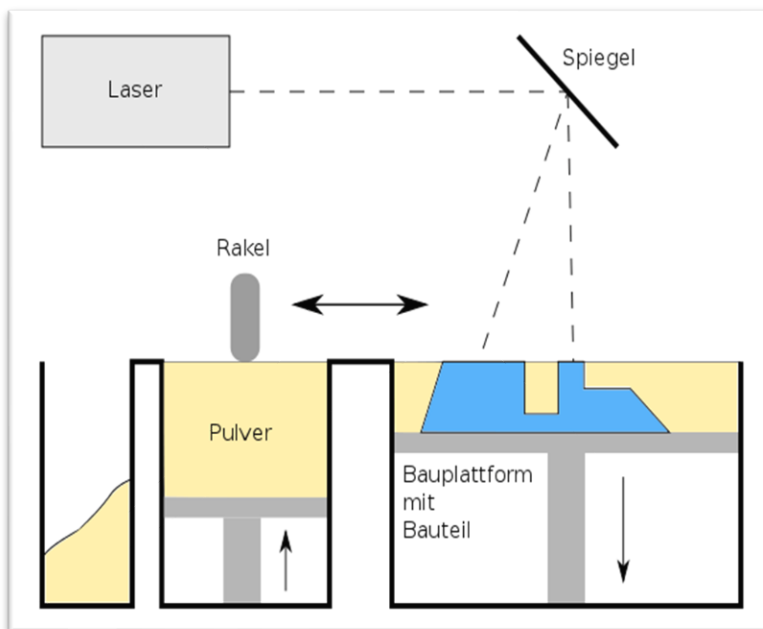


Abbildung 11: Laser-Sinter-Prinzipdarstellung (Netz Konstrukteur, 2019)

Das Lasersintern ist ein einstufiges Verfahren, das heißt, dass keine Nachbearbeitung am Bauteil geleistet werden muss. Das überschüssige Pulver im Pulverbett, das sich um das Bauteil befindet, sorgt für die notwendige Stützkraft am zu druckenden Bauteil, so dass

keine Stützstrukturen benötigt werden. Als Werkstoff können thermoplastische Kunststoffe, Metall, Keramik und Sand in Pulverform eingesetzt werden (Gebhardt, 2016, S. 61–68).

Vorteile:

- Lasersintern ist mit einer Vielzahl von Materialien möglich, die sich thermoplastisch verhalten.
- Die erzeugten Bauteile sind thermisch und mechanisch belastbar. Sie können als Endprodukt eingesetzt werden.
- Eine Nacharbeitung ist nicht notwendig. Das Absaugen des überschüssigen Pulvers und das Reinigen mit dem Pinsel genügt grundsätzlich.

Nachteile:

- Hohe Temperaturen beim Schmelzen des Pulvers (vor allem Metallpulver) zwingt zu Abkühlphasen der Maschine. Der Bauprozess kann dadurch zeitintensiv sein.
- Das Pulver ist sehr fein und daher eine Gefahr für die Atemwege. Das Absaugen des Pulvers und das Reinigen der Bauteile erfordert daher besondere Sicherheitsvorkehrungen.
- Überschüssiges Pulver kann durch die hohen Temperaturen ungewollt am Bauteil haften bleiben (Fischer und Rommel, 2015, S. 72; Gebhardt, 2016, S. 66–67).

3.5 Überblick der additiven Fertigungsverfahren

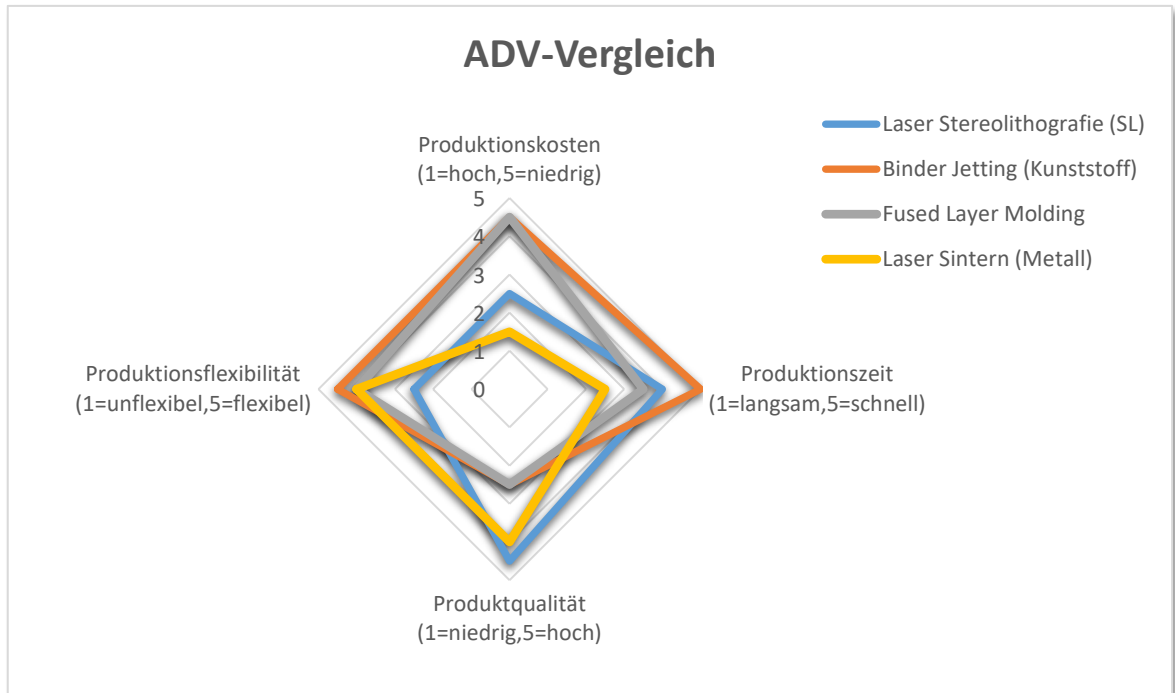


Abbildung 12: Vergleich additiver Fertigungsverfahren

Die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren haben alle ihre Existenzberechtigung. Es gibt für jedes Verfahren Einsatzmöglichkeiten, in denen die Anforderungen an das Bauteil am besten zu einem Fertigungsverfahren passen. Ein Vergleich in vier Bewertungsgruppen zeigt die Abbildung 12: Vergleich additiver Fertigungsverfahren (Bewertung nach (KOETHER, 2017; Rapidobjects, 2020)).

Der Vergleich zeigt, dass die Verarbeitung von Metall im Lasersinter Prozess hohe Kosten und eine lange Produktionszeit benötigt. Die Produktqualität und die Produktionsflexibilität sind dafür sehr gut. Die Prozessverfahren Binder Jetting und Fused Layer Molding überzeugen durch geringe Produktionskosten und eine schnelle bis sehr schnelle Verarbeitungszeit, dafür müssen Abstriche in der Produktqualität gemacht werden. Die Laserstereolithografie liegt im Mittelfeld bei den Produktionskosten und der Produktionszeit. Limitiert ist dieser Prozess in der Flexibilität durch einen hohen Prozessaufwand bei einem Materialwechsel. Dafür besticht die Laserstereolithografie durch die höchste Produktqualität in diesem Vergleich. Genauere Werte dieses Vergleichs befinden sich im Anhang (11.2 Anhang Tabellen).

4 Definition des Ersatzteilmarktes

4.1 Ersatzteilklassifikation

Nach DIN 24420 sind Ersatzteile „Teile (Einzelteile), Gruppen (Baugruppen oder Teilegruppen) oder vollständige Erzeugnisse, die dazu bestimmt sind, beschädigte, verschlissene oder fehlende Teile, Gruppen oder Erzeugnisse zu ersetzen“ (Wannenwetsch, 2014, S. 373).

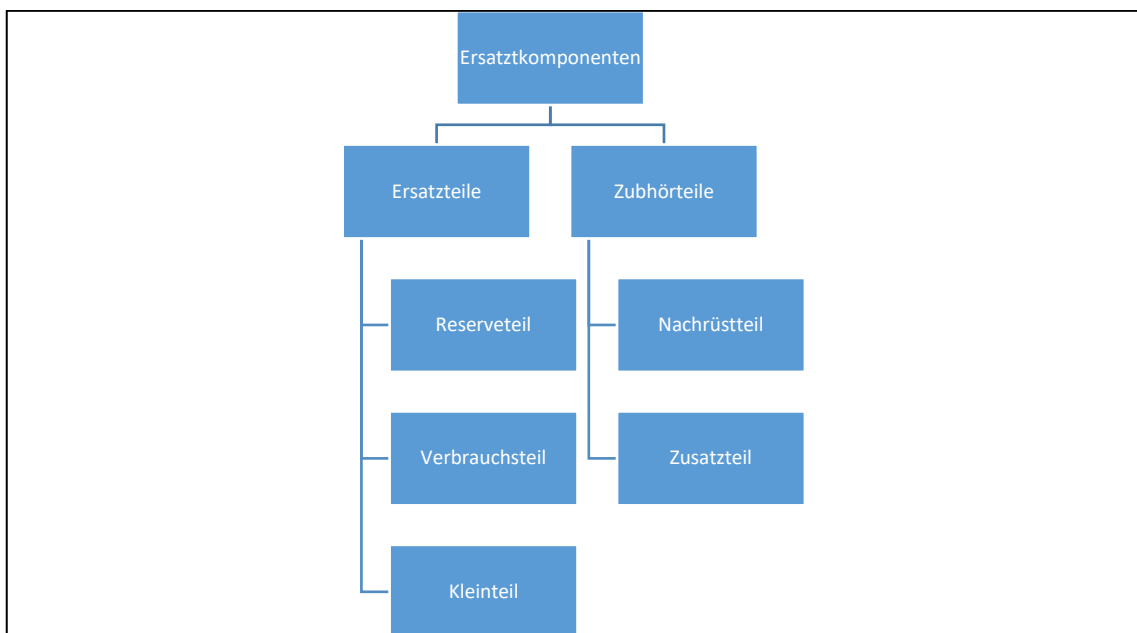


Abbildung 13: Systematik der Ersatzteilarten (Schröter, 2006)

Das Ersatzteil unterscheidet sich in dieser Hinsicht von einem Zubehörteil. Zubehörteile erweitern das Primärprodukt und sind nicht Teil der Grundausstattung. Nachrüstteile, eine Unterkategorie der Zubehörteile, verändern die Funktion des Primärproduktes und sollen in der Regel eine Leistungssteigerung bewirken. Zusatzteile hingegen werden aus ästhetischen Gründen von Kunden erworben und haben keinen subjektiven Zusatznutzen (Schröter, 2006, S. 89–90).

In dieser Arbeit werden die Zubehörteile in den erweiterten Kreis der Ersatzteile mit einbezogen. Lediglich für die Analyse der Supply Chain von Ersatzteilen werden Zubehörteile nicht einzeln betrachtet, da die Anforderungen an die Supply Chain hinsichtlich Kosten und Lieferzeit geringer sind.

Beide Gruppen von Zubehörteilen sind für die Funktionsfähigkeit des Primärproduktes nicht erforderlich. Ihre Notwendigkeit als Ersatzteil wird als unkritisch gesehen.

Biedermann verwendet im Werk „Ersatzteilmanagement (2008)“ bei der Definition des Ersatzteils weitere Unterbegriffe:

- Reserveteil: Ersatzteil, das einer oder mehreren Anlagen zugeordnet ist, in diesem Sinne nicht selbstständig genutzt und zum Zweck der Instandhaltung disponiert und bereitgehalten wird.
- Verbrauchsteil: Ersatzteil, das sich aufgrund seiner Konzeption bei der Nutzung verzehrt und in der Regel nicht wirtschaftlich instandgesetzt werden kann.
- Kleinteil: Ersatzteil, das allgemein verwendbar, vorwiegend genormt und von geringem Einzelwert ist (Biedermann, 2008, S. 3).

4.2 Ersatzteilmanagement

Betrachtet man das Ersatzteilgeschäft in produzierenden Unternehmen, die Ersatzteile für ihre Produkte anbieten, findet man meist eine oder mehrere Abteilungen, die sich mit dem Ersatzteilmanagement befassen.

Das Ersatzteilmanagement in Verbindung mit dem Kundendienst hat eine hohe Bedeutung für Fertigungsunternehmen. Nach einer Studie von Deloitte (2006) erzielen Fertigungsunternehmen im Durchschnitt 46 Prozent ihres Gewinns mit den Kundendienstleistungen. Das Servicegeschäft ist im Durchschnitt um circa 75% profitabler als die gesamte Profitabilität des Unternehmensdurchschnitts (Koudal, 2006, S. 1).

Das Ersatzteilmanagement ist dafür verantwortlich, dass alle betriebswirtschaftlichen Aufgaben erfüllt werden, die für den Einkauf der Rohmaterialien, die Produktion und die Distribution von Ersatzteilen notwendig sind (Schröter, 2006, S. 91–92).

In dieser Arbeit wird der Focus auf der Produktion und der Distribution von Ersatzteilen liegen.

4.2.1 Ersatzteilproduktion

Hersteller von Endprodukten stehen schon vor Produktionsbeginn einer Serie vor der Entscheidung, wie das Ersatzteilmanagement für ihre Produkte aussehen wird. Einen entscheidenden Faktor bildet die Wahl, ob ein Bauteil oder Baugruppe für die Primärproduktion selbst gefertigt wird oder als Zukaufteil bezogen wird.

Eine Eigenproduktion mit hoher Fertigungstiefe in der Primärproduktion bringt den Kundendienst in eine gute Ausgangslage. Das Fertigungs-Knowhow für Ersatzteile liegt nur bei dem Erstausrüster und ist somit gut geschützt. Deshalb setzen PrimärproduktHersteller traditionell auf die Eigenfertigung und nutzen schon in der Primärproduktion die Stückkostendegression für die gleichzeitige Produktion auch von Ersatzteilen (Hofbauer und Rau, 2011, S. 182). Diese Vorproduktion am Ende einer Serie (Abbildung 14: Bewertung verschiedener Versorgungsansätze) ist jedoch nur eine von insgesamt vier Möglichkeiten, die in der Literatur beschrieben werden.

	Fertigung in der laufenden Serie desselben Erzeugnisses	Fertigung eines Langzeitbedarfs bei Serienauslauf	Integration in die laufende Fertigung anderer Erzeugnisse	Fertigung in separater Ersatzteil-Werkstatt
Lagerbestand	gering	sehr hoch	gering	kein
Absatzrisiko	kein	hoch	gering	kein
Beeinträchtigung der Lieferbereitschaft	zeitweise möglich	langfristig möglich	schwankend	niedrig
Aufwand für Fertigungsplanung	kein	kein	Umstrukturierung	evtl. Neuplanung
Aufwand für Fertigungssteuerung	gering	sehr gering	störend	eigene
Investitionen	keine	keine	Zusatzinvestitionen	hohe Investitionen
Herstellkosten	gering	gering	mittel	hoch

Versorgung während Serienproduktion Versorgung nach Ende der Serienproduktion

Steigender Planungsaufwand

Abbildung 14: Bewertung verschiedener Versorgungsansätze (Schröter, 2006)

Den Versorgungsansatz mit dem geringsten Planungsaufwand und den geringsten Kosten stellt das Beibehalten eines Bauteils von einer Serie zur nächsten dar (Abbildung 14: Bewertung verschiedener Versorgungsansätze 1. Spalte). Mit dieser Strategie kann die Ersatzteilproduktion komplett umgangen werden.

Die Nachfertigungsstrategie für Ersatzteile in der laufenden Fertigung anderer Erzeugnisse zeichnet sich dadurch aus, dass die Produktion der Ersatzteile auch noch nach dem Ende der Serienproduktion möglich ist. Eine Voraussetzung für die Nachfertigung ist die Kompatibilität der Herstellungsprozesse der Nachfolgegeneration zur vorhergehenden Generation. Die Vorteile dieser Strategie liegen insbesondere in der Flexibilität der Produktion von Ersatzteilen. Dadurch können die zu lagernden Bestände gering gehalten werden, der Bedarf aber trotzdem relativ zeitnah befriedigt werden.

Ist die Nachfertigungsstrategie in der laufenden Fertigung anderer Erzeugnisse aufgrund von produktionstechnischen Faktoren nicht möglich, ist eine weitere Option die Nachfertigung in einer separaten Ersatzteilwerkstatt. Diese Strategie sieht vor, dass die Ersatzteile entweder in einer gesonderten Produktionsabteilung im Unternehmen gefertigt werden oder bei einem Zulieferer. Bei einer unternehmensinternen Lösung werden Investitionen zum Aufbau der Fertigungseinrichtungen erforderlich. Aufgrund geringer Produktionsmengen fallen häufig hohe Stückkosten an, da aufgrund der meist kleinen Mengen an produzierten Ersatzteilen die Vorteile einer Stückkostendegression nicht greifen (Schröter, 2006, S. 107–113).

Wird die Entscheidung für die Vergabe als Zukaufsteil getroffen, muss der Primärprodukt hersteller ebenfalls schon bei der Primärproduktion die spätere Ersatzteilversorgung planen. Die Verträge mit den Zulieferern spielen dabei eine zentrale Rolle. Es ist sinnvoll unterschiedliche Konditionen mit dem Zulieferer zu verhandeln. Der Vertrag sollte zwei Phasen der Produktion abdecken:

1. Für die Belieferung in der Phase der Primärproduktion sollte ein kurz- bis mittelfristiger Vertrag mit günstigem Preis in großer Losgröße vereinbart werden.
2. Für die Belieferung des Kundenservice des Primärprodukt herstellers nach der Serienfertigung sollte ein langfristiger Vertrag mit hoher Verfügbarkeit und kleinen Losgrößen für die Ersatzteile vereinbart werden.

Unabhängig von der gewählten Strategie der Bezugsquelle von Ersatzteilen will der Primärprodukt hersteller die „economies of scale“ nutzen. Dabei werden durch Großvolumen Synergien der Serienproduktion genutzt, verbunden mit einer anschließenden Einlagerung der Ersatzteile (Hofbauer und Rau, 2011, S. 182–183).

4.2.2 Ersatzteillagerung

Lagerhaltung ist grundsätzlich mit zusätzlichen Kosten verbunden. Sie hat aber auch Vorteile. Durch die Abhängigkeiten der Menschen von maschinellen Produkten verursacht der Ausfall einer Maschine einen Betriebsstopp auch in anderen abhängigen Unternehmenssystemen. So kann zum Beispiel der Ausfall einer Maschine in der Fließfertigung zu einem Produktionsstopp auch an anderen Maschinen führen. Aber auch der Ausfall eines Transportmittels wie Auto, Zug oder Flugzeug für den Transport von Menschen und Material kann zu Verzögerungen im Betriebsablauf führen. Die Betriebsunterbrechung kann zu erheblichen Kosten durch Umsatzeinbußen führen (Biedermann, 2008, S. 1). Die schnelle Verfügbarkeit von Ersatzteilen ist für den Kunden (der Primärproduktbesitzer) daher ein wichtiger Faktor. Eine schnelle Bereitstellung von Ersatzteilen ist meist nur zu gewährleisten, wenn das Bauteil den Fertigungsprozess bereits abgeschlossen hat und in einem Lager auf einen Bestellabruf wartet (Hofbauer und Rau, 2011, S. 173–174). In der Praxis wird die Aufgabe der Ersatzteilbereitstellung oft an den Lieferanten der Primärproduktion übertragen, da dieser die Synergieeffekte anderer Ersatzteile besser nutzen kann (sofern das Primärbauteil zugekauft wurde).

Bis das Ersatzteil durch einen Bestellabruf dem Lager entnommen wird, verursacht das Ersatzteil Lagerkosten (hauptsächlich kalkulatorische Lagerkosten). Die größten Kosteneinflussfaktoren sind:

- Bestandskosten, wie kalkulatorischer Zins oder Versicherungsprämien für die Bestände
- Lagerkapazitätskosten, wie zum Beispiel kalkulatorische Abschreibungen oder kalkulatorische Zinsen auf die Lagereinrichtung und das Lagergebäude
- Durchlauf- und Handlingkosten, wie Personalkosten oder Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe
- Bewirtschaftungskosten, die für den Betrieb und zur laufenden Pflege des Bestands- und Bewirtschaftungsinformationssystems anfallen (Biedermann, 2008, S. 101).

4.2.3 Distribution von Ersatzteilen

Das Ziel der Ersatzteildistribution ist es, die richtige Menge an Ersatzteilen, am richtigen Ort mit dem instand zu haltenden Primärprodukt zusammenzubringen. Die Anforderungen an die Mengenerbereitstellung der Ersatzteile und die Distribution der Ersatzteile zum richtigen Ort unterliegen beide der limitierenden Größe „Zeit“. Damit kann die Distribution von Ersatzteilen in die zwei kritischen Faktoren der „Mengen/Zeit“- Problematik einerseits und der „Raum-/Zeit“-Problematik andererseits eingeteilt werden (Hofbauer und Rau, 2011, S. 175, Baumbach und Stampfl, 2002, S. 88).

Die Mengen/Zeit- Problematik für Ersatzteile wird durch die kürzeren Produktlebenszyklen und die gestiegene Variantenvielfalt vieler Produkte immer gravierender. Der Kundenservice muss anhand von drei Faktoren entscheiden, ob und wie viele Ersatzteile im Lager vorhanden sein sollen.

- Wirtschaftlicher Faktor: Wird das Ersatzteil nicht mehr häufig bestellt, können hohe Lagerkosten eine lange Bevorratung der Teile unwirtschaftlich machen.
- Kundenbeziehung: Ein Lieferstopp von Ersatzteilen für Produkte, die von Kunden noch nachgefragt werden, kann zu Verärgerungen beim Kunden und damit zu einer Störung der Kundenbeziehung führen.
- Gesetzes- und Hersteller- spezifische Vorschriften: Hersteller von technischen Industrieprodukten können gesetzlich festgeschriebene Zeiträume haben, in denen sie Ersatzteile anbieten müssen. Zudem räumen Hersteller Ersatzteil-Garantiezeiträume ein, in denen sie sich zur Lieferung von Ersatzteilen verpflichten.

Durch das Erstellen von Ersatzteilplänen auf Basis von Prognosen und durch die Entwicklung von Auslaufkonzepten für die Ersatzteilversorgung lassen sich die Faktoren am besten vereinen.

Die Raum/Zeit-Problematik ist das Zurücklegen der Distributionsstrecke von Ersatzteilen in einer vorgegebenen Zeit. Vertreibt beispielsweise ein Hersteller seine Produkte weltweit, muss er für seine Kunden die Versorgung mit Ersatzteilen und Serviceleistungen ebenfalls weltweit sicherstellen. Unternehmen mit einem breiten Ersatzteilsortiment und kurzen Lieferzeiten werden damit vor logistische Herausforderungen gestellt. In der Ersatzteildistribution werden zwei verschiedene Strategien angewendet, die Postponement

Strategie und die Speculation Strategie, abhängig vom Wert und der Gängigkeit des Ersatzteils.

Die Postponement Strategie oder Verzögerungsstrategie ist geeignet für Ersatzteile, die eine geringe Gängigkeit oder einen hohen Warenwert haben. Ziel der Strategie ist es, die kundenspezifische Fertigung und Montage zeitlich nach hinten zu verschieben. Die Ersatzteile sollen möglichst zentral und kundenunspezifisch gelagert werden. Erst nach dem Auftragseingang soll das Ersatzteil einem Kunden zugeordnet werden. Trotz der Bevorratung in Zentral- anstelle von Regionallagern und der damit verbundenen längeren Transportwege darf die vorgeschriebene Transportzeit nicht überschritten werden. Die Vorteile der Postponement Strategie sind die geringeren Lagerbestände und die damit verbundenen geringeren Lagerhaltungskosten. Außerdem können Kosten im Handling durch das schlankere Distributionssystem, ohne Regionallager, eingespart werden.

Die Speculation Strategie in der Ersatzteildistribution basiert auf Prognosen. Diese Strategie eignet sich für Ersatzteile, die einen geringen Warenwert oder eine hohe Gängigkeit haben. Das Bauteil wird in einem versandbereiten Zustand gelagert, dadurch sind bei Bestellungseingang keine Produktionsschritte mehr erforderlich (Hofbauer und Rau, 2011, S. 175–182).

4.3 Instandhaltungsstrategien

Im Gegensatz zum Kapitel „4.2.3 Distribution von Ersatzteilen“, das die Planung der Distribution des Ersatzteilproduzenten beschreibt, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Einkaufsplanung des Ersatzteilkonsumenten. Beide Parteien im Ersatzteilprozess verfolgen ein gemeinsames Ziel. Sie wollen beide den Prozess der Ersatzteilversorgung möglichst präzise beherrschen und im Voraus planen, um die Kosten des Ersatzteilmanagements zu senken.

Die Strategie des Ersatzteilproduzenten ist dabei abhängig von der Strategie des Ersatzteilkonsumenten, in wie weit dieser seinen Ersatzteilbedarf im Voraus planen kann. Die Vorgehensweise des Ersatzteilkonsumenten bei der Planung von Instandhaltungen kann in drei verschiedene Strategien unterschieden werden:

- Vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie: Ziel der vorausbestimmten Instandhaltung ist es, Ausfälle eines Produktes zu minimieren oder sogar vollständig zu verhindern. Die Strategie ist charakterisiert durch das regelmäßige und geplante

Tauschen von Produktkomponenten. Ein Nachteil ist, dass Komponenten auch getauscht werden, obwohl sie ihren maximalen Abnutzungsgrad noch nicht erreicht haben.

Der Verbrauch von Ersatzteilen ist bei dieser vorbeugenden Instandhaltung sehr einfach vorherzusagen. Die Komponenten werden in regelmäßigen Abständen benötigt (Alcalde Rasch, 2000, S. 187–190).

- Zustandsorientierte/vorausschauende Instandhaltungsstrategie (Predictive Maintenance): Ziel der zustandsorientierten Instandhaltung ist wie auch bei der vorausbestimmten Instandhaltung die Minimierung/ Vermeidung von Ausfällen eines Produktes. Die Strategien unterscheiden sich in der Planung des Zeitpunktes der Instandhaltungsmaßnahmen. Der Zeitpunkt bei der zustandsorientierten Instandhaltung wird aus dem aktuellen qualitativen Zustand und aus dem Abnutzungsverlauf berechnet. Der Abnutzungsverlauf ist eine negative Einflussgröße, die die korrekte Funktionsweise einer Komponente schrittweise näher an die Verschleißgrenze bringt.

Der Verbrauch von Ersatzteilen ist bei der zustandsorientierten Instandhaltung komplizierter zu bestimmen als bei der vorausbestimmten Instandhaltung. Einflussfaktoren wie der kostengünstigste Wartungszeitpunkt oder geplante Produktionsmengen mit dem Bauteil können den Wartungszeitpunkt verschieben.

- Schadensabhängige Instandhaltungsstrategie: Ziel der schadensabhängigen Instandhaltung ist die Beseitigung eines vorhandenen Schadens. Die Strategie nimmt in Kauf, dass die dem Verschleiß ausgesetzte Komponente eine Ausfallzeit auslöst, wenn ihre Verschleißgrenze überschritten wurde. Die schadensabhängige Instandhaltung wird eingesetzt, wenn keine Daten über den Zustand der Komponente erfasst werden können oder die Inspektionen unwirtschaftlich sind beziehungsweise ein Ausfall mit anschließender Reparatur kostengünstiger ist.

Der Verbrauch von Ersatzteilen ist bei der schadensabhängigen Instandhaltung kaum vorhersehbar (Kovacs und Kochan, 2013, S. 115–117).

4.4 Produkthaftung im Ersatzteilgeschäft

Produkte, die bei Versagen einen Schaden an anderen Dingen oder am Menschen verursachen können, fallen unter das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG). Das ProdHaftG regelt, wann und wer für Folgeschäden an Personen oder Sachen eintreten muss, die ein fehlerhaftes Produkt verursacht hat. Der Hersteller eines Produktes ist haftbar für sein Produkt sowohl im einzelnen Zustand als auch im eingebauten Zustand in einem anderen Produkt. Welches Produktionsverfahren für ein Produkt verwendet wird, ist für die Haftung nicht von Bedeutung.

In der industriellen Fertigung sind die Endprodukte oftmals ein Erzeugnis aus vielen einzelnen Teilprodukten von unterschiedlichen Herstellern. § 4 ProdHaftG definiert, wer als Hersteller zu Schadensersatz verpflichtet werden kann:

- Hersteller des Endprodukts: Der Hersteller des Endprodukts ist für fehlerhafte Zukaufteile haftbar. Aus diesem Grund können auch Montagefirmen, die lediglich Einzelteile von anderen Herstellern zu einem Produkt zusammenbauen, haftbar gemacht werden.
- Hersteller des Teilprodukts: Der Hersteller eines Teilprodukts kann genauso für den gesamten entstandenen Schaden haftbar gemacht werden, wie der Endprodukthersteller. Seine Haftung setzt dabei voraus, dass das von ihm hergestellte Teilprodukt fehlerhaft war (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz; Schlattmann und Seibel, 2017, S. 181–189).

Als Hersteller eines Produktes, unabhängig von der Art (Ersatzteil oder Primärbauteil), dem Produkttyp oder der Industrie müssen vier Gruppen von Verkehrspflichten vor dem kommerziellen Verkauf eingehalten werden:

- Pflicht zu ordnungsgemäßer Planung und Konstruktion des Produktes
- Pflicht zu ordnungsgemäßer Fabrikation
- Pflicht zu Instruktion und Beratung
- Pflicht zu ordentlicher Betriebsführung, Produktbeobachtung und Reaktion

Die Anforderungen an jede dieser vier Gruppen sind u.a. abhängig von gesetzlichen Rahmenbedingungen und weiteren Vorschriften, die für jedes Produkt und jede Branche spezifisch sind.

4.5 Gesetzliche Rahmenbedingungen im Ersatzteilwesen

Geistiges Eigentum einer Firma oder einer privaten Person lässt sich in Deutschland durch das Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA) schützen. Das DPMA vergibt Patente für technische Erfindungen, Markenschutz für Ware und Dienstleistungen und Designschutz für industriell und handwerklich hergestellte Erzeugnisse. Diese Rechte gelten für Deutschland, können jedoch auch auf die Europäische Union und das Ausland ausgeweitet werden. In den folgenden Kapiteln wird die Gesetzeslage in Deutschland hinsichtlich Patenten, Markenschutz und Designschutz für die gewerbliche Produktion und den gewerblichen Vertrieb von Produkten aufgezeigt. Ein Ersatzteil wird gleichgestellt mit einem Bauteil aus der Primärproduktion (*Deutsches Patent- und Markenamt*, 10. August 2019).

4.5.1 Patentschutz von Ersatzteilen

Das DPMA schützt Erfinder technischer Produkte oder Verfahren vor unerwünschter Nachahmung über einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren. Der Patentinhaber kann durch sein Patent sicherstellen, dass Konkurrenten die neue technische Erfindung nicht verwenden oder produzieren dürfen und erhält somit ein Monopol für seine Entwicklung. Patente können jedoch auch verkauft werden oder als Lizenzen vergeben werden. Für die gewerbliche Produktion und den gewerblichen Vertrieb von Ersatzteilen sind beide Felder interessant. Zum einen schützen Patente die Produktionsverfahren von Ersatzteilen (Verfahrenspatent), zum anderen schützen sie die technischen Erfindungen eines Ersatzteils beziehungsweise Zubehörs (Erzeugnispatent) (*Deutsches Patent- und Markenamt*, 2017b, S. 1–8).

„Mit einem Erzeugnispatent ist der Schutz für alle Gegenstände möglich, wie beispielsweise Maschinen und deren Teile, Anordnungen von Einzelteilen, elektronische Schaltungen, (...). Ohne die Zustimmung des Patentinhabers (...) ist es Dritten verboten, das patentierte Erzeugnis in Deutschland herzustellen, anzubieten, in Verkehr zu bringen oder zu den genannten Zwecken einzuführen oder zu besitzen“ (*Deutsches Patent- und Markenamt*, 2017b, S. 4).

„Verfahrenspatente (...) schützen beispielsweise Verfahren zur Herstellung eines Produkts, Arbeitsverfahren oder auch die Verwendung eines Produkts für einen bestimmten

Zweck. Kein Dritter darf das geschützte Verfahren in Deutschland anwenden“ (Deutsches Patent- und Markenamt, 2017b, S. 4).

In dem Bereich der Ersatzteilversorgung für historische automobiler Fahrzeuge, die im allgemeinen Sprachgebrauch als Youngtimer (Fahrzeuge im Alter von 20 bis 30 Jahren) und als Oldtimer (Fahrzeuge im Alter ab 30 Jahren) bezeichnet werden, zeigen sich aufgrund der Verjährung des Patentschutzes Marktpotentiale für Drittanbieter. Nach Ablauf von 20 Jahren nach Einreichung eines Erzeugnis- oder Verfahrenspatents, das meist in der Entwicklungsphase eingereicht wird, öffnet sich der Ersatzteilmarkt für die Produktion ursprünglich patentgeschützter Bauteile (Schmieder, 2011).

Ist die 20-jährige Altersgrenze des Automobils noch nicht überschritten, greift eine Gruppenfreistellungsverordnung (GVO) der Europäischen Union, die mögliche Monopole der Erstausrüster durch Verfahrenspatente für die Reparatur von Kraftfahrzeugen auflösen soll. Eine solche GVO der Europäischen Union will mit einer sektorspezifischen Sonderregelung u.a. für mehr Wettbewerb auf dem Markt für Reparatur- und Wartungsdienstleistungen am Automobil sorgen. Die Sonderregelung erleichtert den Zugriff für unabhängige Reparatur- und Wartungsbetriebe auf Ersatzteile und technische Informationen des Erstausrüsters. Diese Bauteile und Informationen werden benötigt, um Wartungsarbeiten für ein Fahrzeug durchführen zu können. Die Veröffentlichung von technischen Informationen hilft jedoch auch Drittanbietern von Ersatzteilen, die ihre angebotenen Bauteile nach den Vorschriften des Erstausrüsters prüfen und anbieten können. In Kraft tritt die Sonderregelung, wenn ein Erstausrüster mit seinen zugelassenen Werkstätten einen Marktanteil von 30% überschreitet (Wagner, 2016, S. 71–73).

4.5.2 Markenschutz von Ersatzteilen

Die Eintragung einer Marke in das Markenschutzregister gibt dem Inhaber der Marke das alleinige Recht, die Ware oder Dienstleistung mit seinem Erkennungszeichen zu benutzen. Dem Inhaber steht es offen, anderen Personen oder Firmen ein Nutzungsrecht seiner Marke einzuräumen, oder das Markenrecht zu veräußern. Ein Markenschutz hat anders als das Patent keine begrenzte Laufzeit und ist lebenslänglich verlängerbar (Deutsches Patent- und Markenamt, 2019, S. 3–9).

„Als Marken können alle Zeichen, insbesondere Wörter einschließlich Personennamen, Abbildungen, Buchstaben, Zahlen, Klänge, dreidimensionale Gestaltungen einschließlich

der Form einer Ware oder ihrer Verpackung sowie sonstige Aufmachungen einschließlich Farben und Farbzusammenstellungen geschützt werden, die geeignet sind, Waren oder Dienstleistungen eines Unternehmens von denjenigen anderer zu unterscheiden“ (§ 3 Absatz 1 Markengesetz).

Für Ersatzteile, die ein markengeschütztes Teil ersetzen sollen ohne dass der Ersatzteilhersteller eine Markenlizenz erworben hat heißt das, dass das zu produzierende Bauteil keine geschützten Markencharakteristika enthalten darf, wie zum Beispiel Logos des Originalherstellers.

4.5.3 Designschutz von Ersatzteilen

„Eingetragene Designs schützen die Erscheinungsform von industriell oder handwerklich hergestellten Erzeugnissen, zum Beispiel von Bekleidung, Möbeln, Fahrzeugen, Stoffen, Ziergegenständen oder grafischen Symbolen“. Wichtig für die Produktion von Ersatzteilen ist, dass auch Teile von Erzeugnissen als eingetragenes Design geschützt werden können. Das in dem Register des DPMA eingetragene Design und die daraus resultierende Monopolstellung sind auf maximal 25 Jahre ab dem Anmeldedatum begrenzt (Deutsches Patent- und Markenamt, 2017a, S. 3–10).

In der Automobilindustrie ist es für den Erstausrüster ein entscheidender Wettbewerbsvorteil, dass er das Design seiner Bauteile als geistiges Eigentum schützen lassen kann. Alle Bauteile, die im sichtbaren Bereich liegen, fallen unter das Geschmacksmusterrecht und sind dem vollen Designschutz ausgesetzt. Wettbewerbern wird es nahezu unmöglich gemacht, Ersatzteile anzubieten, die ein geändertes Design haben, aber trotzdem in den Bauraum des zu ersetzenden Teils passen. Daraus ergibt sich für den Erstausrüster ein Monopol auf alle Ersatzteile, die im sichtbaren Bereich liegen. Dies gilt jedoch nur für einige Länder der EU, wie Deutschland und Frankreich. In anderen EU-Ländern, unter anderem in den Niederlanden, Italien und Polen, gibt es Ausnahmen für den Designschutz. Drittanbieter von Ersatzteilen stehen somit vor der Wahl, ihr Design von sichtbaren Ersatzteilen im Vergleich zum Erstausrüster abzuändern und ihre Produkte Europaweit zu vertreiben, oder das Design beizubehalten und den Vertrieb auf die Länder mit Ausnahmen beim Designschutz zu beschränken (Verband der Automobilindustrie, 2018, S. 3–10).

5 Additive Fertigung für Ersatzteile

Additive Fertigungsverfahren können einen signifikanten Effekt auf die Ersatzteilversorgung, wie zum Beispiel die Medizintechnik, Luftfahrtindustrie oder Automobilindustrie haben. Das Potential des 3D-Drucks liegt hauptsächlich in 2 Bereichen der Ersatzteilversorgung. Zum einen können die neuen Gestaltungsfreiheiten des 3D-Drucks für eine belastungsgerechte Konstruktion genutzt werden. Zum anderen können die Komplexität der Lieferkette reduziert und gleichzeitig die Wiederbeschaffungszeit verkürzt werden, wenn die Ersatzteile additiv in dezentralen „Druckerzentren“ hergestellt werden (Li et al., 2016, S. 1–3; Chua und Leong, 2017, S. 9–14).

5.1 Neukonstruktion von Ersatzteilen

Angesichts der durch den 3D-Druck geschaffenen neuen Konstruktionsmöglichkeiten bietet die Neukonstruktion von Bauteilen (nicht nur von Ersatzteilen), die mit den konventionellen Fertigungsverfahren nur schwer, beziehungsweise gar nicht herstellbar waren, große Chancen für Unternehmen, die additive Herstellungsverfahren für die Produktion von Bauteilen verwenden. Der Prozess der Neukonstruktion von Bauteilen bietet die Möglichkeit, die Wünsche des Kunden in die Konstruktion des Bauteiles mit einfließen zu lassen. Diese engere Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen fördert die Kundenzufriedenheit und stärkt die Unternehmensbeziehungen (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 138–141).

Die Potentiale des 3D-Drucks sind so vielfältig, dass mehrere Publikationen (unter anderem (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019; Feldmann, Schulz und Fernströning, 2019)) eine neue industrielle Revolution vorhersagen. Im Bereich der Konstruktion lassen sich die Potentiale für die Neukonstruktion von Bauteilen in 3 Hauptgruppen einteilen:

5.1.1 Das Konstruieren von komplexen Geometrien

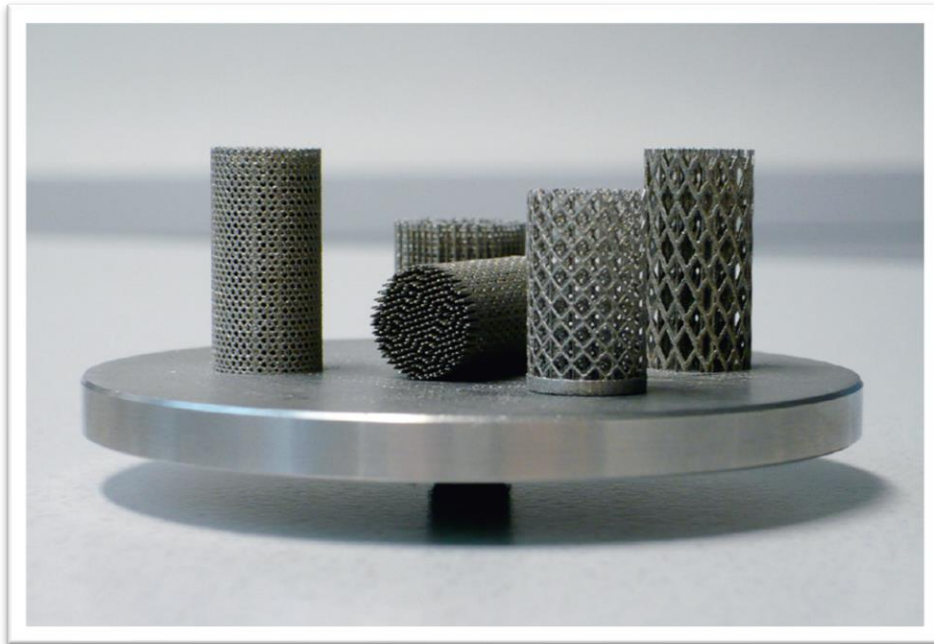


Abbildung 15: 3D-Netzstruktur (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019)

Komplexe Geometrien (Abbildung 15: 3D-Netzstruktur) werden als komplex bezeichnet, wenn für die Produktion mit konventionellen Fertigungsprozessen mehrere aufwendige Produktionsschritte notwendig sind (Abbildung 16: Beispielhafter konventioneller Produktionsprozess .

Der 3D-Druck kann den Produktionsablauf komplexer Bauteile durch seine werkzeuglose Herstellung stark vereinfachen (Abbildung 17: Vereinfachter additiver Fertigungsprozess). Die Produktionszeit gegenüber der konventionellen Produktion kann nach Chua und Leong (2017) um 50 bis 90 Prozent gesenkt werden. Die variablen Kosten (Material, Maschine und Lohn) steigen mit der additiven Fertigung laut der Studie Li et al. (2016) um durchschnittlich 40 Prozent (Ergebnis einer System-Dynamics-Simulation).

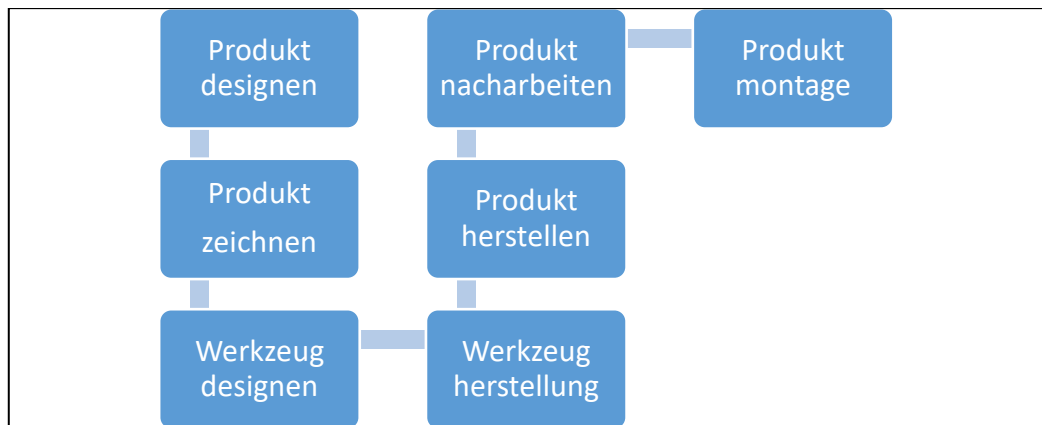


Abbildung 16: Beispielhafter konventioneller Produktionsprozess (Chua und Leong, 2017)

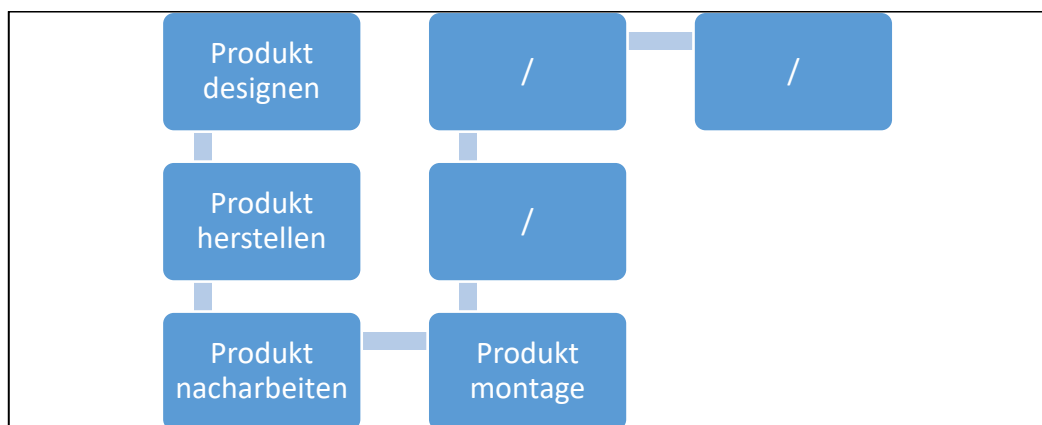


Abbildung 17: Vereinfachter additiver Fertigungsprozess (Chua und Leong, 2017)

5.1.2 Das Konstruieren von integrierten Geometrien

Komplexe Geometrien müssen aufgrund der Limitierungen der konventionellen Herstellung in mehrere einzelne Bauteile aufgeteilt werden, die eigenständig produziert und in der Produktmontage zusammengefügt werden. Die additiven Herstellungsverfahren erlauben es komplexe Geometrien einheitlich zu produzieren. Abbildung 18: 3D gedruckte Kraftstoffdüse einer Boing 737 Max zeigt ein prominentes Beispiel für die Reduzierung von Bauteilen. Die Kraftstoffdüse der Boing 737Max bestand aus 20 verschiedenen Bauteilen, die arbeitsaufwendig montiert werden mussten. Die additive Fertigung erlaubte die Kombination der Bauteile zu einem Werkstück, das als Einzelteil gedruckt werden konnte. Neben einer Kosten- und Produktionszeitreduzierung wurde eine Gewichtersparnis von 25% realisiert (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 141–143).



Abbildung 18: 3D gedruckte Kraftstoffdüse einer Boeing 737 Max (Chua und Leong, 2017)

5.1.3 Das Konstruieren von integrierten Funktionen

In der konventionellen Herstellung wird die Funktionalität eines Produktes oft erst über den Zusammenbau verschiedener Komponenten hergestellt. Additive Herstellungsverfahren erlauben es, Bauteile eines komplexen Systems im bereits zusammengebauten Zustand zu produzieren. Der Produktionsschritt „Montage“ würde in diesem Fall komplett entfallen. Deutlicher wird das Konstruieren von integrierten Funktionen anhand folgenden Beispiels.

Die Abbildung 19: Planetengetriebe gedruckt als ein Bauteil zeigt ein Planetengetriebe mit einfacher und doppelter Helix-Verzahnung. Das komplette Bauteil wurde als ein Bauteil gedruckt. Der Zusammenbau der einzeln produzierten Bauteile wäre wegen der Helix-Struktur nicht möglich. Eine Montage mit Einzelteilen der konventionellen Herstellungsverfahren wäre nur mit einem neuen umkonstruierten Design möglich (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 143–145).

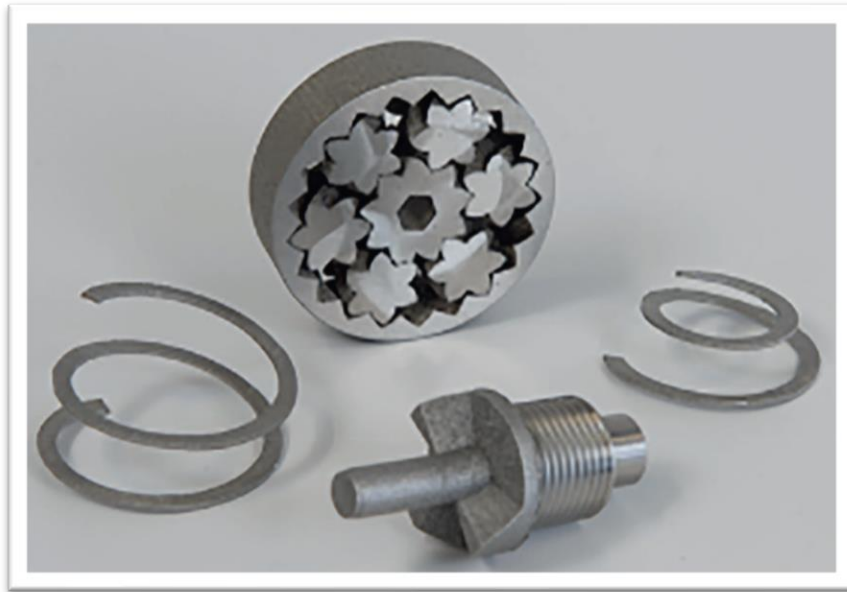


Abbildung 19: Planetengetriebe gedruckt als ein Bauteil (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019)

5.2 Änderungen in der Supply Chain von Ersatzteilen durch additive Fertigung

Die Aufgaben des Supply Chain Managements in der Ersatzteilversorgung sind die operativen Kosten gering und gleichzeitig die Kundenzufriedenheit hoch zu halten. Um das zu gewährleisten, müssen Lieferanten bei unvorhersehbarer Nachfrage zwischen den konkurrierenden Supply Chain Bausteinen Herstellung, Lagerbestand und Lieferzeit abwägen.

Das Ziel der Lieferanten einen hohen Servicegrad zu niedrigen Kosten anbieten zu können stellt eine Herausforderung dar. Die Entwicklung des 3D-Drucks für die Produktion von Ersatzteilen bringt viel Potential mit sich, diese Herausforderung zu bewältigen. Da sich der 3D-Druck zumindest in der Ersatzteilindustrie noch in der Anfangsphase der Entwicklung befindet, wird bisher in der Literatur nur von Potentialen gesprochen und es mangelt an konkreten Anwendungsbeispielen (Li et al., 2016, S. 3–7).

Es können zwei verschiedene Ansätze unterschieden werden, den 3D-Druck in die Supply-Chain von Ersatzteilen aufzunehmen. Der erste Ansatz besteht darin, additive Fertigungskapazität an einem zentralen Produktionsort zu planen, um Lagerbestände zu senken. Die Aufgabe des 3D-Drucks ist dabei, Teile mit wenig Bestellabrufen erst auf Bestellung zu drucken. Dieser Ansatz ist geeignet, wenn die Nachfrage an Ersatzteilen gering und die Wiederbeschaffungszeit unkritisch sind.

Der zweite Ansatz ist, die additive Fertigungskapazität direkt an dem Service Punkt zu errichten. Diese Strategie kann gewählt werden, wenn die Nachfrage nach den zu druckenden Ersatzteilen groß genug ist, um die höheren Investitionen für die 3D-Druck Maschinen zu kompensieren. Weitere Vorteile sind die Reduzierung von Lagerkosten, das Entfallen der Transportkosten und die schnelle Verfügbarkeit des Ersatzteils (Holmström et al., 2010, S. 6–10).

Die Simulation einer „One-Piece-Ersatzteilproduktion“ von Li et al. (2016) vergleicht die beiden Ansätze mit dem heutigen Konzept der konventionellen Supply Chain anhand der anfallenden variablen Kosten. Dabei wurden vier Kategorien analysiert, die variablen Transportkosten von Material und Fertigerzeugnis, die Herstellungskosten, die Lagerkosten und die Verwaltungskosten.

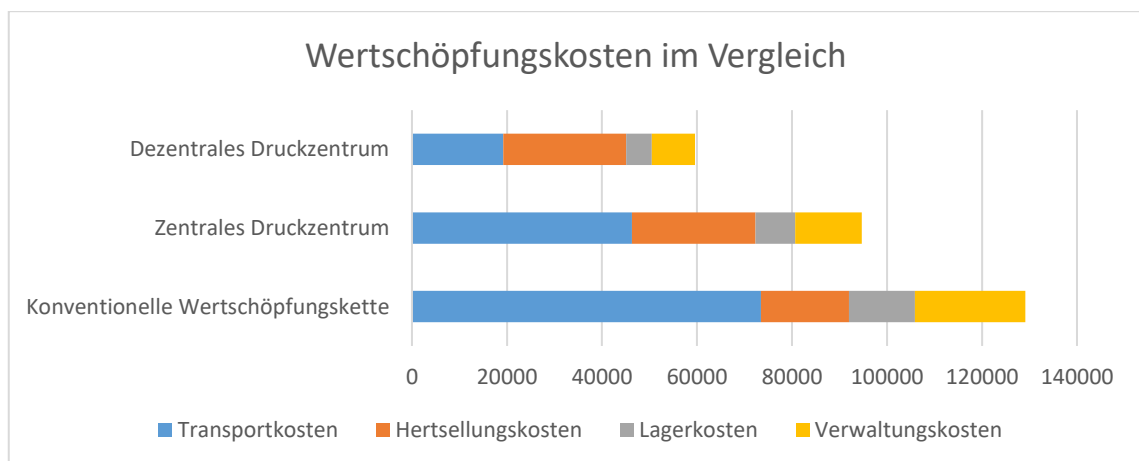


Abbildung 20: Ergebnisse einer Simulation der Supply Chain Kosten in Euro (Li et al., 2016)

Die Simulation zeigt, dass die gesamten Transportkosten um 37% bei zentral additiver Fertigung und um 74% bei dezentral additiver Fertigung sinken würden. Die Fertigungskosten steigen für beide Ansätze um 40%, hingegen sinken die gesamten Lagerkosten bei der zentral additiven Fertigung um 40% und bei der dezentral additiven Fertigung um 61% im Vergleich zur konventionellen Fertigung. Die Verwaltungskosten sind (in dieser Simulation angenommen) stark abhängig von den Lagerbeständen, weshalb die variablen Verwaltungskosten um denselben Prozentsatz fallen wie die Lagerkosten. Insgesamt ist laut dieser Studie eine Reduktion der Gesamtkosten von 27% bei zentral und 54% bei dezentral additiver Fertigung für ein Ersatzteil mit Losgröße 1 möglich.

6 Überblick der Supply Chain von Ersatzteilen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie

6.1 Ersatzteilwesen in der Luftfahrtindustrie

Zulieferer von Ersatzteilen in der Luftfahrtindustrie stehen häufig unter hohem Druck, die Liefertreue für Ersatzteile mit hoher Qualität und hohem Warenwert sicherzustellen. Die Wiederbeschaffungszeit für die Ersatzteilanbieter ist mit den konventionellen Fertigungsmethoden sehr hoch. Für Spezialteile ist es nicht unüblich, dass mit einer Wiederbeschaffungszeit von mehreren Monaten gerechnet werden muss. Andererseits fordern die Konsumenten von Ersatzteilen eine sehr kurze Servicezeit, um die Kosten für den Fall „Aircraft on Ground“ gering zu halten und die Erwartungen der Kunden zu befriedigen. Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette von Ersatzteilen in der Luftfahrtindustrie stehen vor der Herausforderung, die Anforderungen von minimalen Zeiten für Reparaturen und Services zu minimalen Kosten zu erfüllen.

Ein großes ziviles Flugzeug besteht aus mehreren Millionen Teilen. Die meisten dieser Teile werden unregelmäßig bestellt, müssen dennoch vorrätig sein, um eine schnelle Verfügbarkeit zu gewährleisten. Boeing gibt an, ein Lager mit mehr als zwei Millionen Katalog-Ersatzteilen zu bevorraten, um ihre gesamte Flotte mit Ersatzteilen zu versorgen (*Boeing, Aviation Parts and Aftermarket Services*). Ein solcher eigener Sicherheitsbestand an Standard-Ersatzteilen ist auch typisch für alle Airlines. Diese Teile werden in regelmäßigen Abständen zu den geplanten Servicezeiten nachbestellt. Ersatzteile, die weniger regelmäßig benötigt werden, bestellen die Airlines bei ihren Zulieferern. Die Regel ist, dass die Zulieferer diese Teile vorrätig haben und diese mit einem Expressversand innerhalb von 24 Stunden an den gewünschten Service Punkt liefern (Liu et al., 2014, S. 3–7).

6.2 Ersatzteilwesen in der Automobil-Industrie

Die Ersatzteilversorgung spielt für die Kraftfahrzeughersteller eine wichtige Rolle im Produktlebenszyklus ihrer Autos. Es wird angenommen, dass 50% des Profits der Erstausrüster nach dem Verkauf des Automobils erwirtschaftet werden.

In der automobilen Ersatzteilversorgung gilt es zwei verschiedene Vertriebswege zu unterscheiden, ein vom Erstausrüster unabhängiger und ein vom Erstausrüster abhängiger Vertriebsweg. Der vom Erstausrüster abhängige Vertriebsweg startet beim Erstausrüster,

der sein Ersatzteil direkt an den Großhändler verkauft. Diese Großhändler sind markenspezifischer Vertragshändler und vertreiben ihre Ersatzteile weiter an Einzelhändler sowie an markenabhängige und markenunabhängige Werkstätten. Sowohl der Großhändler als auch der Einzelhändler halten Lagerbestände von Ersatzteilen. Die Einzelhändler bestellen im Durchschnitt jede Woche einmal und füllen ihre Läger auf. Der Großhändler bekommt jeden Tag diese regelmäßigen Bestellungen, jedoch auch Notfallbestellungen für spezielle Reparaturen, die entweder von den Werkstätten ausgelöst wurden oder von einem Einzelhändler, der das Ersatzteil nicht im Lager hat. Für die Expressbestellungen ist eine maximale Wiederbeschaffungszeit von 24 Stunden üblich.

Die zweite Strategie der vom Erstausrüster unabhängigen Ersatzteilversorgung startet bei dem Zulieferer des Erstausrüsters. Dieser vertreibt seine Produkte an einen zentralen Ersatzteihändler, der auch Produkte von anderen Zulieferern von Erstausrüstern, aber auch Ersatzteile von markenunabhängigen Unternehmen vertreiben. Werkstätten und Privatpersonen können bei dem zentralen Ersatzteihändler oder bei einem von ihm beauftragten Einzelhändler bestellen.

In beiden Alternativen der Ersatzteilversorgung gibt es keine oder eine nur geringe Lagerhaltung in den Werkstätten. Die Händler müssen ihre Lager auf die prognostizierten Bedarfe der Werkstätten auslegen. Die Wartezeiten einer Werkstatt auf das Ersatzteil außerhalb der regulären Lieferzeit können zu ungeplanten Umsatzausfällen führen und die Geschäftsbeziehung zwischen Kunde und Lieferant beeinträchtigen (beekman und Leeuw, 2008, S. 61–65).

7 Wichtige Kernaussagen von Experten aus der industriellen Praxis

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde zwei Interviews mit Experten aus der industriellen Praxis geführt. Der Interviewpartner N. D. ist bei der Tochtergesellschaft eines führenden deutschen 3D-Drucker Produzenten als Berater tätig. Der andere Interviewpartner Herr B.H. ist Head of Innovation bei der führenden 3D-Druck Beratung in Schweden. Sein Unternehmen berät und forscht für Unternehmen aus der Automobil-, Luftfahrt-, Werkzeug- und anderen Industrien.

Das Ziel der Interviews war es, relevante Kriterien der Industrie für einen Bewertungskatalog zu identifizieren. Außerdem geben die Interviews wichtige Anhaltspunkte bei der

Bewertung der Beispiele nach diesen Kriterien, für die es keine ausreichenden literarische Publikationen gibt.

7.1 Gründe für den Einsatz des 3D-Drucks in der Ersatzteilversorgung

Herr B.H. und Herr N.D. nennen in ihren Interviews zwar sehr verschiedene Gründe für die Entscheidung, den 3D-Druck in der Wertschöpfungskette der Ersatzteile einzusetzen, einen Einsatzfall nennen jedoch beide: „Obsoleszenz“, d.h. Veralterung eines Produktes, das dadurch unbrauchbar wird:

Zitat Herr N.D.: „(...) Wenn wir uns die Produktion mit einem Spritzgusswerkzeug anschauen, ist die Wahl der Verfahrensweise sicher abhängig (...) davon, wie lange das Spritzgusswerkzeug hält. Spritzgusswerkzeuge verschleifen, so können sie zum Beispiel 8 Jahre lang produzieren. Kommt jedoch das Jahr 9, 10, 11 und 12 mit neuen Ersatzteilmfällen, wäre das typischerweise ein Fall, wo der Einsatz des 3D-Drucks sinnvoll wäre“

Zitat Herr B.H. „(...) vor allem Teile, die heute schon nicht mehr in Serie sind und von denen es kein 3D-Modell mehr gibt, können sehr interessant für den 3D-Druck sein. Die vorhandenen Bauteile werden für die Produktion eingescannt und reproduziert oder, wenn das Bauteil nicht mehr vorhanden ist, wird auf Basis der 2D-Zeichnung ein 3D-Modell hergestellt.“

Ein mögliches Einsatzszenario aus den Problemstellungen der Logistik beschreibt Herr N.D.: „Ein weiterer interessanter Grund kann auch sein, das Bauteil im Land zu produzieren, in dem es benötigt wird, um zum Beispiel zollrechtliche Themen zu umgehen. Das heißt, die Ersatzteile sind eigentlich schon verschickt, liegen aber noch aus beispielsweise regulatorischen Gründen vor Ort beim Zoll und sind deshalb nicht verfügbar.“

Ein großes Augenmerk legten beide Interviewpartner auf die mögliche Verkürzung der Lagerzeit durch den Umstieg in der Produktion von Ersatzteilen auf den 3D-Druck:

N.D.: „Der Traum der Unternehmen ist es, dass sie sich den Rattenschwanz an Logistik sparen und man nur noch ein digitales File einlagert, was die Kosten natürlich stark senken würde.“

B.H.: „Ein gutes Beispiel dafür ist ein Kunde, der an uns herangetreten ist. Sein bestehendes Lager war zu 95% gefüllt. Bei seiner immer größer werdenden Modellpalette hätte

er im nächsten Jahr in ein komplett neues Lager für mehrere Millionen investieren müssen. Wir haben dann untersucht, wie man trotz größer werdender Ersatzteilvielfalt die Anzahl an Ersatzteilen reduzieren kann.“

7.2 Anwendungsgebiete des 3D-Drucks in der Erstteilproduktion

Auf die Frage, bei welchen Bauteilen sie vor allem Potential für den Einsatz des 3D-Drucks sehen, differenzieren beide Experten nach dem Rohmaterial der Bauteile. „Das sind meist Kunststoff- und Metallteile. Im Kunststoffbereich sind es meistens einfache Abdeckungen. Im Metallbereich können das auch durchaus komplexere Halterungen sein, die nicht kritische Bauteile sind. Sehr interessant wird es, wenn man Bauteile mit einer bestimmten Funktion hat, zum Beispiel eine Einspritzvorrichtung mit einer Düse oder ähnlichem, bei dem man die Funktion verbessern kann.“ (N.D.)

Herr B.H. zeigt in seinem Vergleich der beiden Rohmaterialien bereits mögliche Vorteile und Schwachpunkte des 3D-Druck in der Produktion von Ersatzteilen. „Zuerst muss man zwischen Ersatzteilen aus Kunststoff und Metall unterscheiden. Ein großes Problem bei Metallteilen ist immer noch die Nacharbeitung. Für die Nacharbeitung sind große Maschinen notwendig, wie zum Beispiel zum Fräsen oder Sägen. Dadurch ist eine Produktion vor Ort (Anmerkung: an dem Ort, an dem das Ersatzteil benötigt wird) nur mit hohen Investitionskosten möglich. Deshalb ist die Produktion von Metall Ersatzteilen Stand heute immer noch mit einer Lagerhaltung verbunden. Anders bei Bauteilen aus Kunststoff, hier sind die Investmentkosten für den Drucker und die Nacharbeitung sehr viel geringer.“

Konkrete Anwendungsfälle nennen die beiden Experten in ihren Interviews ebenfalls. „Interieur Bauteile sind auf jeden Fall sehr gut geeignet. Allgemein sind alle Bauteile geeignet, die nicht kritisch (Anmerkung: bezogen auf die Belastung des Bauteils) und keine Standard Komponenten sind. Motoren Komponenten, die belastet werden, sind eher weniger geeignet. (...) Ein Turbinenblatt (...) wird nicht das erste Bauteil sein, das mit dem 3D-Drucker hergestellt wird. Ich denke, dass werden zum Beispiel Kleiderhaken oder Abdeckungen sein.“ (B.H.)

Im Allgemeinen sieht Herr N.D. drei Anwendungsfälle „in denen sich der 3D-Druck sehr gut einsetzen lässt. Die Fälle wären, wenn es das Bauteil nicht mehr gibt, das Bauteil wird besser, das heißt, man kann eine Prozess- und Produkteffizienz herbeiführen und der

dritte Fall wäre, die Ersparnis von Lagerkosten. Der dritte Fall ist aus unserer Sicht der, der den größten Einfluss haben kann.“ (N.D.)

7.3 Besonderheiten der Automobil- und Luftfahrtindustrie

Auf die Frage, warum die beiden betrachteten Industrie den 3D-Druck noch zögerlich annehmen, gaben die Interviewpartner folgende Aussagen. „Was man in sicherheitsrelevanten Bereichen, sei es im Automobilbau, Luft- und Raumfahrt oder der Medizintechnik beachten muss, ist, dass die Ersatzteile neu qualifiziert werden müssen. Das ist aktuell noch einer der großen Hemmnisse, dass der 3D-Druck flächendeckend für die Ersatzteilproduktion eingesetzt werden kann. Zum Beispiel im Personentransport gelten gewisse Regularien, dass Crashtest bestanden werden müssen. Es gibt noch diverse Anforderungen, die den Übergang zum 3D-Druck erschweren. (...) Es gibt zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt Bauteile in 3 Klassen, bei denen die Kritikalität mit jeder Klasse steigt. Je höher die Klasse, desto ausführlicher werden die Tests.“ (N.D.) „Auch wenn die Qualifizierung von Ersatzteilen in der Luftfahrtindustrie kritischer ist, gibt es dort eine höhere Bereitschaft das Thema anzugehen. (...) Ich würde sagen, dass der Druck und die Zahlungsbereitschaft in der Luft- und Raumfahrt deutlich höher ist als in dem automobilen Sektor. Bei unserem Shareholder Saab Aero (...) (gehen) Ausfälle ihrer Produkte (...) schnell in die Millionen. Daher sind Eigentümer dieser Produkte in der Regel eher bereit, hohe Kosten für eine kurze Wiederbeschaffungszeit aufzuwenden. Wohingegen beim PKW ist die Zahlungsbereitschaft nicht so hoch, denn wenn ein Auto zum Beispiel einen Monat nicht fahrbereit ist, ist der Ausfall im Vergleich zur Luft- und Raumfahrt nicht so gravierend.“ (B.H.)

8 Entwicklung eines Bewertungsschemas mit Anwendungsbeispielen

Das Potential des 3D-Drucks bei der Herstellung von Ersatzteilen in der Automobil- bzw. Luftfahrtindustrie wird anhand eines industrieübergreifenden und damit objektivierten Bewertungsschemas mit definierten Kriterien aufgezeigt.

8.1 Bewertungskategorien und Maßstäbe

Eine Studie von Hasin-Hung Wu (2011) führt Faktoren auf, anhand derer Konsumenten von Ersatzteilen die Wahl ihres Lieferanten abhängig machen. In einer Umfrage haben die Kunden sieben Kategorien bewertet. Die Analyse zeigt dabei folgendes Ergebnis:

Auf dem ersten Platz steht die Qualität der Ersatzteile. Unter die Kategorie der Qualität fallen Punkte wie Produktzuverlässigkeit, Ausschussquote und die Toleranz.

Auf Platz zwei liegt die Lieferfähigkeit des Zulieferers. Unter diese Kategorie fallen beispielsweise das Lagermanagement, die Produktionskapazität und die Entwicklung neuer Produkte.

Den dritten Platz belegt die Bewertung nach dem Preis. Darunter fällt nicht nur der Preis des Produktes, sondern auch preispolitische Faktoren wie Zahlungsvereinbarungen oder Mengenrabatt.

Die Distribution, die in der Wertschöpfkette nach der Produktion folgt, belegt Platz vier. Die drei Faktoren, die in dieser Kategorie bewertet wurden, sind Wiederbeschaffungszeit, termingetreue Lieferung und die Distributionskapazität (absteigend an Wichtigkeit).

An letzter Stelle befinden sich zwei unternehmenspolitische Kategorien, der Service und die Organisationstruktur (Hsin-Hung Wu und Ya-Ning Tsai, 2011, S. 2334–2338).

Bei der Bewertung der additiven Fertigungsverfahren für die Ersatzteilindustrie werden die beiden unternehmenspolitischen Kategorien außen vor gelassen. Außerdem werden die Produktion und die Distribution zu einem Kriterium (Supply Chain) zusammengefasst.

Einen guten Hinweis auf die Relevanz vorstehender Kriterien haben die Interviews mit den Experten aus der 3D-Druck Industrie gegeben (vollständige Interviews im Anhang). Darüber hinaus wurden die Kriterien der Studie um weitere in den Interviews als relevant identifizierte Kriterien und Unterpunkte, wie z.B. Kritikalität von Bauteilen und Gestaltungspotentiale durch den 3D-Druck ergänzt.

Den Kriterien wurden jeweils einheitliche Maßstäbe anhand einer 6-Punkte Skala zugeordnet, um die Analyse entscheidungsrelevant zu gestalten. Dabei werden zunächst je Kriterium auch die einschlägigen Vorgaben des Bauteils eingewertet. Im nächsten Schritt wird das jeweilige Verfahren bewertet, wie es das Kriterium erfüllt. Liegt der jeweils

vergebene Punktwert unterhalb des Vorgabe-Punktwerts für das relevante Kriterium bedeutet dies, dass das Verfahren die Vorgaben des Bauteils nicht nur erfüllt, sondern übererfüllt. Darüber hinaus zeigen die Punktwerte des einzelnen Verfahrens im Vergleich, welches Verfahren bei dem betrachteten Kriterium besser abschneidet.

Die in das Bewertungsschema aufgenommenen Kriterien und Maßstäbe lauten:

1. Qualität

- Werkstoffeigenschaften

Die „1“ auf der 6- Punkte Skala bedeutet (1 =) „hohe Anforderungen an die physikalische und thermische Standfestigkeit eines Bauteils“

6 = keine Anforderungen an die physikalische und thermische Standfestigkeit eines Bauteils

- Oberflächenqualität

1= hohe Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften eines Bauteils.

6= keine Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften eines Bauteils.

- Toleranzen

1= hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteile

6= keine Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteile

- Gestaltungspotentiale (zu jeweils 50% bestehend aus den Unterpunkten Leichtbau und optische Gestaltung)

- Beanspruchungsgerechte Konstruktion: Bewertung des Potentials für eine Neukonstruktion für zum Beispiel bessere Ergonomie, bionische Formen oder bessere Funktionseigenschaften wie zum Beispiel integrierte Kühlkanäle

1 = großes Potential für eine beanspruchungsgerechte Neukonstruktion

6 = kein Potential für eine beanspruchungsgerechte Neukonstruktion

- Optische Gestaltung / Individualität: Bewertung des Potentials für die Neugestaltung nach zum Beispiel Kundenwünschen oder nach aktuell geltenden Designstandards

1 = großes Potential bei einer Neukonstruktion für optische Änderungen

6 = kein Potential bei einer Neukonstruktion für optische Änderungen

2. Supply Chain

- Wiederbeschaffungszeit (zu jeweils einem Drittel bestehend aus den Unterpunkten Rüstzeit, Produktionszeit und Distributionszeit)
 - Rüstzeit: Zeit, die benötigt wird, um die Werkzeuge für ein Bauteil oder eine Serie von Bauteilen zu installieren
 - Produktionszeit: Zeit, die benötigt wird, um ein Bauteil oder ein Bauteil einer Serie zu produzieren
 - Distributionszeit: Zeit, die benötigt wird, um ein Bauteil von seinem Produktionsstandort an den Zielstandort zu transportieren

1 = geringer Zeitaufwand für die Wertschöpfungsstufe

6 = hoher Zeitaufwand für die Wertschöpfungsstufe

- Wiederbeschaffungskosten (zu jeweils einem Sechstel bestehend aus den Unterpunkten Rüst-, Produktions-, Distribution-, Lager-, Materialkosten und der Stückkostendegression)
 - Rüstkosten: Kosten, die für das Rüsten aller Maschinen eines Loses anfallen, verteilt auf die produzierte Stückzahl. Aufgrund der Stückkostendegression wird eine Abschätzung des jährlichen Bedarfs und der jährlichen Anzahl an Rüstvorgängen angenommen
 - Produktionskosten: Kosten, die in der Produktion für Maschinen, Werkzeug und Lohn pro Stück anfallen
 - Distributionskosten: Kosten, die für den Transport vom Produktionsstandort zum Zielstandort in der geforderten Zeit anfallen
 - Lagerkosten: Kosten, die aufgrund von Losgrößenproduktion und Sicherheitsbeständen für kurze Lieferzeiten anfallen. Außerdem wird das Einlagern von Werkzeugen berücksichtigt
 - Materialkosten: Kosten, die für das Rohmaterial pro Stück anfallen

1 = niedrige Kosten, die pro Stück anfallen

6 = hohe Kosten, die pro Stück anfallen

Die Vorgaben an die Bauteile stammen von den Kunden der Ersatzteile, die eine bestimmte Qualität zu gegebenen Kosten in der marktüblichen Lieferzeit erwarten. Neben den Kundenanforderungen können auch branchenspezifische gesetzliche Rahmenbedingungen gelten, die sich vor allem auf die Qualität der Bauteile beziehen.

Wurden zu bestimmten Bauteilen keine Angaben zu der Qualität oder den Wiederbeschaffungskosten gefunden, wurden die Informationen aus den Interviews angewandt und mit Ingenieursverstand Abschätzungen getroffen.

8.2 Anwendungsbeispiele Automobilindustrie

8.2.1 Interieur Lampe

Interieur Lampen, aber auch Front- und Heckleuchten eines Automobils, sind bei einem „Facelift- Modell“ oder einer neuen Modellgeneration häufigen Designänderungen unterworfen. Es wird angenommen, dass nur geringe Stückzahlen an Ersatzteilen verkauft werden, da eine Interieur Lampe bei sachgemäßer Beanspruchung einen Autolebenszyklus lang funktionieren sollte. Die hohe Variantenvielfalt der Interieur Lampen und die geringen Bestellabrufe verursachen eine Lagerhaltung in der konventionellen Herstellung, da davon auszugehen ist, dass eine Nachproduktion von Ersatzteilen nur selten geschieht.



Abbildung 21: Interieur Lampe (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019)

Um das Potential des 3D-Drucks für den Einsatz in der Ersatzteilproduktion besser abschätzen zu können, wird ein Vergleich anhand der Bewertungskriterien aus „Kapitel 8.1 Bewertungskategorien“ zwischen der konventionellen und der additiven Herstellung durchgeführt. Bei der Betrachtung der Interieur Lampe werden die Einzelteile der Lampe

als ein Bauteil betrachtet, das mit demselben Herstellungsverfahren produziert wird (Gebhardt, Kessler und Thurn, 2019, S. 104–105).

Die in Kapitel 8.1 allgemein beschriebene Bewertungskatalog liest sich in nachfolgender Tabelle in der Kategorie Qualität, Unterpunkt Werkstoffeigenschaften wie folgt: Die Vorgaben an das Bauteil Interieur Lampen sind aufgrund geringer mechanischer und thermischer Belastungen niedrig (5). Danach ist es für beide Verfahren relativ einfach, die Vorgaben zu erreichen. Dabei schneidet die Herstellung mittels konventioneller Methodik besser ab (2) als mit additiver Methodik (3).

Tabelle 1: Interieur Leuchte Bewertungskatalog

Interieur Leuchte	Vorgaben des Bauteils	Konventionelle Herstellung	Additive Herstellung	Begründung, wenn die Bewertung nicht aus der Beschreibung hervorgeht	
1. Qualität					
1.1. Werkstoffeigenschaften	5	2	3	*Bauteil: Keine Mechanische und geringe thermische Belastung des Bauteils	
1.2. Oberflächenqualität	3	2	3		
1.3. Toleranzen	3	2	3		
1.4. Gestaltungspotential	4,5	5	2		
1.4.1. Beanspr. Konstruktion	6	5	3		
1.4.2. Optische Gestaltung	3	5	1	*Bauteil: Änderung für ein moderneres Lichtdesign möglich	
2. Produktionsparameter					
2.1. Wiederbeschaffungszeit	2	2,7	2,0	*Bauteil: Standardbauteil, Wiederbeschaffungszeit 1-3 Tage	
2.1.1. Rüstungszeit			4	1	
2.1.2. Produktionszeit			1	4	*Additiv: Sehr viel längere Produktionszeit, aber Reduktion der Anzahl an Bauteilen
2.1.3. Distributionszeit			3	1	
2.2. Wiederbeschaffungskosten	2,5	2,0	2,6	*Bauteil: Stark abhängig von der Fahrzeugklasse	
2.2.1. Rüstkosten			2	1	*Konventionell: Rüstkosten pro Bauteil bei großer Losgröße gering
2.2.2. Produktionskosten			1	5	*Additiv: Produktionskosten im Vergleich zur konventionellen Herstellung
2.2.3. Distributionskosten			3	1	
2.2.4. Lagerkosten			3	1	*Konventionell: sehr lange Lagerzeit, aber ein geringer Warenwert
2.2.4. Materialkosten			1	5	*Additiv: additives Rohmaterial sehr viel teurer als konventionelles Rohmaterial

Der Vergleich der beiden Herstellungsverfahren zeigt, dass beide Verfahren die Ersatzteilvergaben bezüglich der Qualität erreichen. Mit dem 3D-Druck würden sich aber zusätzlich Potentiale ergeben, das Lichtdesign an heutige Standards anzupassen und dem Kunden damit einen Kaufanreiz geben, das Ersatzteil trotz intaktem Serienbauteils zu erwerben (Bewertungskriterium „Optische Gestaltung“ in obiger Tabelle).

Die Wiederbeschaffungszeit der konventionellen Herstellung (Produktion auf Bestellungseingang) überschreitet mit 2,7 die Anforderungen des Kunden (2,0). Daraus folgt, dass die Produktion kundenunspezifisch erfolgen und das Ersatzteil eingelagert werden muss. Die additive Fertigung würde eine Produktion inklusive Distribution zum Kunden in der vorgegebenen Zeit einhalten. Die Produktion mit einem Stereolithografie-Drucker in einem Druckcenter beim Servicepartner würden zudem Distributions- und Lagerzeiten eliminieren.

Der 3D-Druck bietet die Möglichkeit, die Geometrien der einzelnen Bauteile der Lampe zu einem Bauteil zusammen zu fassen. Die Stereolithografie ist in der Lage, sowohl die weißen als auch die durchsichtigen Elemente in einem Druckprozess herzustellen. Ein Montageprozess, wie in der konventionellen Herstellung ist damit nicht mehr notwendig.

Die dadurch eingesparten Lager- und Distributionskosten sind auch die entscheidenden Treiber, dass der 3D-Druck bei den Wiederbeschaffungskosten konkurrenzfähig ist, obwohl die Produktions- und Materialkosten ein Vielfaches der Kosten bei konventioneller Fertigung darstellen.

Die ausschlaggebende Variable für die Entscheidung der Herstellungsmethode wird die prognostizierte Verkaufsstückzahl sein. Diese entscheidet, wie hoch die Rüstkosten und anschließenden Lagerkosten sein werden. Sind diese höher als die Kosten für Material und Produktion mit dem 3D-Druck, würde eine Entscheidung zugunsten der neuen Fertigungstechnologie Sinn machen.

Bei Produktion und Vertrieb dieses Ersatzteils durch einen Drittanbieter würde bei reinem Kopieren des Serienbauteils des Erstausrüsters der Marken- und Designschutz greifen. Wird für die additive Fertigung das Designpotential genutzt, würde das Ersatzteil nicht mehr dem Designschutz unterliegen. Der Markenschutz kann durch den Entfall der markentypischen Symbole des Erstausrüsters ebenfalls umgangen werden.

8.2.2 Frontstoßstangen Spoiler

Spezielle Serien an Autos unterscheiden sich von Autos der „Großserie“ durch die geringe Stückzahl und die speziellen Ausstattungsvarianten wie zum Beispiel leistungsstarke Motoren und optische Modifikationen wie veränderte Front- und Heckspoiler.



Abbildung 22: Audi RS4 Frontspoiler (Gebhardt, 2016)

Die Produktionszahlen der Modellreihe Audi RS4 B7 (2005-2009) belaufen sich auf circa 14.350 Fahrzeuge in der 4-jährigen Bauzeit (Domes, 2017). Für den Prototypenbau und Testfahrzeuge wurde der Spoiler mit der Laserstereolithografie hergestellt. Für die Serienproduktion des Audi RS4 wurde der 3D-gedruckte Prototyp für die Herstellung eines Werkzeuges verwendet. Das spätere Serienteil wurde konventionell mit Polyurethan hergestellt.

Eine Frontstoßstange ist, wie auch die Interieur Leuchte, kein Verschleißteil. Jedoch ist eine Stoßstange den Umwelteinflüssen ausgesetzt und wird häufig beschädigt. Die Stoßstange ist ein typisches Bauteil, das bei Kontakt mit anderen Autos häufig ersetzt werden muss. Der Frontstoßstangen-Spoiler im speziellen ist häufig schon bei geringem Kontakt mit dem Bordstein defekt und zu wechseln. Damit ist eine relativ hohe Austauschrate für einen Spoiler als Ersatzteil gegeben, jedoch ist der Bedarf limitiert durch die verhältnismäßig geringe Stückzahl produzierter Autos.

Ob der 3D-Druck nur für den Prototypenbau sinnvoll ist oder auch für die Produktion von Ersatzteilen eingesetzt werden könnte, soll der Vergleich beider Herstellungsmethoden ergeben.

Tabelle 2: Frontstoßstange Spoiler Bewertungskatalog

Frontstoßstange Spoiler		Vorgaben des Bauteils	Konventionelle Herstellung	Additive Herstellung	Begründung, wenn die Bewertung nicht aus der Beschreibung hervorgeht
1. Qualität					
1.1.	Werkstoffeigenschaften	3	2	3	*Bauteil: Elastische Verformung der Spoilers bei Stoßkontakt *Additiv: Nachbearbeitung notwendig, glatte Oberfläche für die Lackierung gefordert
1.2.	Oberflächenqualität	2	1	2	
1.3.	Toleranzen	3	2	3	
1.4.	Gestaltungspotential	3	4,5	1	
1.4.1.	Beanspr. Konstruktion	4	4	1	*Bauteil: Bionische Formen, aerodynamische Gestaltung
1.4.2.	Optische Gestaltung	2	5	1	*Bauteil: Individuelle Gestaltung, mehrere Varianten
2. Produktionsparameter					
2.1.	Wiederbeschaffungszeit	3	3,0	2,7	*Bauteil: Sonderserienbauteil, Wiederbeschaffungszeit 1-5 Tage
2.1.1.	Rüstungszeit		4	1	
2.1.2.	Produktionszeit		2	5	*Additiv: Spoiler muss in mehreren Bauteilen gedruckt und gefügt werden
2.1.3.	Distributionszeit		3	2	*Additiv: Zentrale 3D-Produktion, wegen großen Druckern und Nacharbeit
2.2.	Wiederbeschaffungskosten	3	2,6	2,8	
2.2.1.	Rüstkosten		3	1	
2.2.2.	Produktionskosten		2	5	
2.2.3.	Distributionskosten		3	2	*Additiv: Distributionskosten von zentralem Druckcenter zum Kunden
2.2.4.	Lagerkosten		4	1	*Konventionell: mittel-volumiges Bauteil
2.2.4.	Materialkosten		1	5	

Die Analyse der Bewertungskriterien zeigt, dass beide Produktionsverfahren die notwendige Qualität (mit Ausnahme des Gestaltungspotentials bei der konventionellen Herstellung) erreichen. Trotz der sehr guten Druckqualität der Laserstereolithografie, muss das Bauteil aber in die Nacharbeit. Neben dem üblichen Entfernen der Stützstrukturen

müssen die sichtbaren Oberflächen bearbeitet werden. Die nachfolgende Glanzlackierung deckt Fehler im Produktionsprozess auf. Die Qualitätsvorstellungen für hochpreisige Fahrzeuge sind von den Herstellern und Kunden sehr hoch.

Das optische Verändern von Fahrzeugen zur Schaffung von Individualität hat speziell in Deutschland eine große Fangemeinde. Anhänger dieser Szene sind bereit, hohe Preise für die Einzigartigkeit ihrer Fahrzeuge zu bezahlen. Der 3D-Druck ermöglicht es, neue Formen, Designs und individuelle Wünsche in einem wirtschaftlich sinnvollen Rahmen zu realisieren. Auch die Funktionalität könnte mit bionischen Strukturen oder aerodynamischen Zusatzfunktionen gesteigert werden.

Besitzer von Kraftfahrzeugen, die einer speziellen Serie zugeordnet werden können, müssen sich auf geringfügig längere Lieferzeiten einstellen im Vergleich zu Großserienmodellen. Die Anforderung an die Wiederbeschaffungszeit würde der konventionellen Fertigung die Möglichkeit zur auftragsbezogenen Fertigung ermöglichen. Andererseits werden die Vorteile der Skaleneffekte einer Produktion in großen Losgrößen überwiegen.

Die Skaleneffekte der konventionellen Fertigung haben selbst bei einer relativ geringen Stückzahl (Annahme: 14.350 Fahrzeuge produziert bei 2% Ersatzteilbedarf pro Jahr: circa 300 Stück pro Jahr) immer noch große Auswirkungen auf die Herstellungskosten. Die höheren Kosten für das Ersatzteil im 3D-Druck könnten jedoch durch Zusatzfunktionen oder Individualität gerechtfertigt werden.

Speziell für Drittanbieter bringt der 3D-Druck neue Potentiale im Bereich des „Tuning-Markts“ (Markt für Modifizierungen an Kraftfahrzeugen). Die Hersteller von Tuning-Bauteilen könnten stark individualisierte Komponenten für Individualisten anbieten. Produktionen mit einer Losgröße von eins sind heute nur in aufwendiger Handarbeit möglich. Gesetzliche Regeln müssen bei der Neugestaltung hinsichtlich Patent-, Marken und Designschutz nur selten betrachtet werden, dafür gelten in Deutschland die Bestimmungen für den Straßenverkehr des Kraftfahrtbundesamtes (KBA). Im Europäischen In- und Ausland sind weit weniger strenge Bestimmungen für die Modifikation an Kraftfahrzeugen die Regel. In diesen Ländern wäre der Einstieg in den Tuning-Ersatzteilmarkt mit 3D-Druck einfacher zu realisieren.

8.3 Anwendungsbeispiele Luftfahrtindustrie

8.3.1 Lüftungskanäle

Die Luftfahrtindustrie ist neben der Medizintechnik der Vorreiter für die Nutzung der additiven Fertigung für die Serienproduktion. Die Kosten für den Ausfall eines Flugzeugs im zivilen wie auch im militärischen Bereich sind um ein Vielfaches höher als in der Automobilindustrie. Die Bereitschaft, höhere Preise für eine kurze Wiederbeschaffungszeit von Ersatzteilen zu bezahlen ist dadurch sehr viel höher als in der Automobilindustrie (Interview mit B.H., Anhang).

Die EOS GMBH, eine der führenden deutschen Firmen im Bereich industrieller 3D-Drucker, bietet schon heute ihre Dienste an, Interieur Teile auf Kundenwunsch mit additiven Fertigungsverfahren zu produzieren. Eos bietet Luft- und Raumfahrtunternehmen an, Kabinen- und Cockpitausstattungen, wie beispielsweise „funktionsfähige, gewichtsoptimierte Komponenten wie leichte Gurtschlösser aus hochwertigem Titan Ti64, Klima- und Heizungselemente aus robusten Kunststoffen, Kabelführungen und Ladesysteme sowie Bauteile für Catering- und Sanitärbereiche“ (EOS GMBH).

Die additiven Fertigungsverfahren bieten nicht nur mehr Flexibilität in der bedarfsgerechten Konstruktion von Serienbauteilen, sondern auch Potentiale für Upgrades und Ersatzteile in kleinen Stückzahlen. Es ergeben sich dadurch Möglichkeiten, Airline-spezifische Individualisierungswünsche kurzfristig und rentabel umzusetzen.

Im Folgenden werden verschiedene Bauteile des Lüftungskanalystems von Passagierflugzeugen beispielhaft anhand der schon für die Automobilbranche aufgezeigten Bewertungskriterien analysiert.



Abbildung 23: Zwei Bauteile eines Lüftungskanalystems (EOS GMBH)

Die zwei Bilder zeigen verschiedene Elemente eines komplexen Lüftungskanalystems, das aus weit mehr Bauteilen besteht als die Abbildungen zeigen.

Tabelle 3: Lüftungskanäle Bewertungskatalog

Lüftungskanäle	Vorgaben des Bauteils	Konventionelle Herstellung	Additive Herstellung	Begründung, wenn die Bewertung nicht aus der Beschreibung hervorgeht
1. Qualität				
1.1. Werkstoffeigenschaften	4	2	2	*Bauteil: Werkstoff muss für die Luftfahrt zugelassen sein, nicht flammbar
1.2. Oberflächenqualität	4	2	3	*Bauteil: Nicht sichtbares Bauteil
1.3. Toleranzen	3	2	2	
1.4. Gestaltungspotential	3,5	4	1	
1.4.1. Beanspr. Konstruktion	1	3	1	*Bauteil: Konstruktion nach Komfortwünschen
1.4.2. Optische Gestaltung	6	5	1	
2. Produktionsparameter				
2.1. Wiederbeschaffungszeit	3	2,3	1,7	*Bauteil: Als Zubehörteil planbar, Tausch bei nächster Wartung als Ersatzteil
2.1.1. Rüstungszeit		3	1	
2.1.2. Produktionszeit		2	3	*Additiv: Integrieren von Geometrien, verkürzung der Montage
2.1.3. Distributionszeit		2	1	*Additiv: Dezentrale 3D-Produktionmöglich
2.2. Wiederbeschaffungskosten	2,5	2,6	2,0	*Bauteil: Kein Sichtbauteil, aber kleine Stückzahl
2.2.1. Rüstkosten		3	1	
2.2.2. Produktionskosten		3	4	*Konventionell: Viele Werkzeuge für viele Varianten notwendig
2.2.3. Distributionskosten		2	1	*Konventionell: Distributionszeit nicht kritisch
2.2.4. Lagerkosten		3	1	
2.2.4. Materialkosten		2	3	

Die Lüftungskanäle in einem Flugzeug liegen hinter der Verkleidung der Kabine und sind für die Passagiere nicht sichtbar. Die mechanischen und thermischen Belastungen sind gering, weshalb auch die Anforderungen an die Qualität des Ersatzteils mit einer 4 auf der 6- Punkte Skala als gering eingewertet werden. Die Materialeigenschaften müssen jedoch zu den Vorschriften der Luftfahrtbranche passen. Die Qualifizierung der Bauteile eines Lüftungskanal-systems könnte als Gruppe ablaufen, da die Eigenschaften und Funktionen der Bauteile sehr ähnlich sind.

Die Umrüstung eines Flugzeuges mit einem neuen Lüftungskanal-system (Zubehörteile) ist gut planbar. Die Wiederbeschaffungszeit ist daher unkritisch und bringt keinen Vorteil für die Produktion mit additiven Verfahren. Die wirtschaftlich sinnvollere Fertigungsmethode für eine Umrüstung einer Maschine ist hingegen mit 2,0 Punkten gegenüber 2,6 Punkten eindeutig der additive Druck.

Die Lüftungskanäle als Ersatzteil stellen aufgrund ihrer geringen Belastung ein Bauteil mit sehr wenigen und nicht planbaren Bedarfen dar. Auch für diesen Anwendungsfall wäre der 3D-Druck eine sehr gute Alternative. Die Produktion des Ersatzteils könnte am Servicestandort zum Servicezeitpunkt erfolgen, da keine Nacharbeit oder Lackierung des Ersatzteils notwendig ist. Gleichzeitig könnte eine mögliche verbesserte Neukonstruktion des Ersatzteils verbaut werden.

8.3.2 Blende für Gepäckfächer

Die Flugzeugindustrie ist ständig auf der Suche nach Innovationen, um ihre Flugzeuge effizienter z.B. durch Gewichtseinsparungen zu machen. Das gilt für die Entwicklung neuer Flugzeuge, aber auch für die Ersatzteile bei älteren Maschinen.

Eine Bauteilgruppe, die schon heute in Verkehrsflugzeugen zu sehen ist, sind Blenden für die Verkleidung von Gepäckfächern. Die Firma Materialise produziert für das Passagierflugzeug Airbus A350 XWB die Gepäckfachblenden im 3D-Druck. Im Vergleich zur konventionellen Herstellung wurde eine Gewichtsersparnis von 15% erreicht.

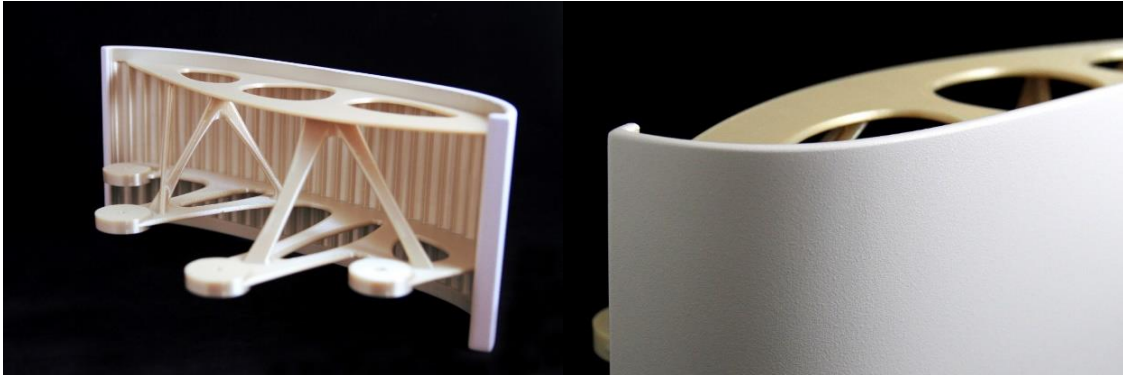


Abbildung 24: Gepäckfachblenden (Materialise)

Für die Betrachtung der Ersatzteilversorgung ist dieses Beispiel ein Ausnahmefall. Da bereits in der Serienproduktion der 3D-Druck für große Stückzahlen eingesetzt wurde, gibt es keinen Grund die Ersatzteilversorgung auf Basis einer konventionellen Fertigung aufzubauen.

Jedoch existiert die Überlegung, ältere Flugzeuge, deren Gepäckfachblenden noch konventionell hergestellt wurden, ebenfalls mit Ersatzteilen aus der additiven Fertigung auszustatten. Für diesen Anwendungsfall werden die Bewertungskriterien hinsichtlich Qualität und Supply Chain Faktoren angewendet.

Tabelle 4: Gepäckfachblenden Bewertungskatalog

Gepäckfachblenden	Vorgaben des Bauteils	Konventionelle Herstellung	Additive Herstellung	Begründung, wenn die Bewertung nicht aus der Beschreibung hervorgeht
1. Qualität				
1.1. Werkstoffeigenschaften	2	2	2	*Bauteil: Werkstoff muss für die Luftfahrt zugelassen sein, nicht flammbar
1.2. Oberflächenqualität	2	1	2	*Additiv: Nachbearbeitung notwendig, glatte Oberfläche für die Lackierung gefordert
1.3. Toleranzen	2	1	2	
1.4. Gestaltungspotential	3	4	1	
1.4.1. Beanspr. Konstruktion	1	3	1	*Konventionell: Höhere gestalterische Komplexität ist unwirtschaftlich
1.4.2. Optische Gestaltung	5	5	1	
2. Produktionsparameter				
2.1. Wiederbeschaffungszeit	2	2,3	2,3	*Bauteil: Für den Fugbetrieb unkritisches Bauteil, aber bei Defekt schnell auszutauschen
2.1.1. Rüstungszeit		3	1	
2.1.2. Produktionszeit		2	4	*Additiv: Nacharbeit und Lackierung notwendig
2.1.3. Distributionszeit		2	2	*Additiv: Zentrale 3D-Produktion, aufgrund von Nacharbeit und Lackierung
2.2. Wiederbeschaffungskosten	3	2,8	2,6	
2.2.1. Rüstkosten		3	1	*Konventionell: Kleine Stückzahl
2.2.2. Produktionskosten		2	4	
2.2.3. Distributionskosten		3	2	*Additiv: Distributionskosten von zentralem Druckcenter zum Kunden
2.2.4. Lagerkosten		4	2	*Additiv: Lieferzeit kann nicht eingehalten werden, kurze Lagerung
2.2.4. Materialkosten		2	4	

Die isolierte Betrachtung der Bewertungskriterien allein lässt nur eine Schlussfolgerung zu: Die Produktion der Ersatzteile auch von konventionell hergestellten Gepäckfachblenden muss mit additiven Fertigungsverfahren erfolgen. Schließlich kann der 3D-Druck bei

den Qualitätskriterien mit den konventionellen Verfahren mithalten und überzeugt vor allem in der Neugestaltung mit bionischen Formen.

Die Wiederbeschaffungszeit ist ebenfalls kürzer als die der konventionellen Verfahren, jedoch nicht kurz genug, um auf Bestellabruf zu produzieren. Die Nacharbeit der sichtbaren Oberfläche und die Lackierung nehmen zu viel Zeit in Anspruch. Eine kurze Bevorratung der Blenden ist unausweichlich.

Den Vergleich der Wiederbeschaffungskosten gewinnt der 3D-Druck ebenfalls. Die Komplexität zur Gewichtsersparnis stellt die konventionelle Fertigung vor Herausforderungen. Die Blende muss in der Produktion in mehrere Einzelteile aufgeteilt werden, die in der Montage zusammengefügt werden. Beim 3D-Druck hingegen fallen für die steigende Komplexität der Bauteilgeometrie keine zusätzlichen Kosten an.

Trotz dieses eindeutigen Vergleiches müssen in der Luftfahrtbranche strenge Rahmenbedingungen eingehalten werden. Die in der EU geltenden Gesetze für die Qualitätssysteme von Unternehmen in der Luftfahrtindustrie verfolgen das Ziel, die Anforderungen an die zivile Luftfahrt und den Umweltschutz auf einem hohen Niveau zu halten (Hinsch, 2013, S. 3–4).

Die Hauptfaktoren in dieser Entscheidung sind die Kosten für die konventionelle Wertschöpfungskette gegenüber den Wertschöpfungskosten der 3D-Fertigung plus die Kosten für eine neue Zertifizierung des Ersatzteils nach den Vorgaben der Luftfahrtbranche. Die Gewichtsersparnis und die daraus resultierende Treibstoffersparnis können zugunsten der additiven Fertigung sprechen.

9 Resümee und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, das Potential des 3D-Drucks in konkreten Anwendungsgebieten der Ersatzteilversorgung der Automobil- und Luftfahrtindustrie aufzuzeigen. Auf Basis eines einheitlichen Bewertungskatalogs konnten anhand von Beispielfällen in der Potentialanalyse industrieübergreifende Gemeinsamkeiten, aber auch industriespezifische Unterschiede und Besonderheiten identifiziert werden.

Die Automobilindustrie steht vor der Herausforderung, bei wachsender Modellvielfalt und weltweitem Vertrieb ein Ersatzteilnetzwerk aufrecht zu erhalten, das die Kundenwünsche an eine kurze Lieferzeit und vor allem geringe Preise erfüllt. Die Entscheidung

zu Gunsten des 3D-Drucks für Ersatzteile in der Automobilindustrie ist daher stark beeinflusst von den absoluten Kosten, die für das Ersatzteil von der Produktion bis zur Distribution an den Kunden verursacht werden. Kostenvorteile hat der 3D-Druck durch entfallende Rüstkosten der werkzeuglosen Produktion, geringe oder keine Lagerhaltung durch kleine Losgrößenproduktion und die Verkürzung der Distribution durch dezentralisierte Produktion. Demgegenüber stehen Kostennachteile im Vergleich zur konventionellen Fertigung aufgrund der noch relativ teuren Rohstoffpreisen und den oftmals höheren Produktionskosten. Das Anwendungsgebiet der additiven Fertigung liegt nach Betrachtung der Kosten bei Ersatzteilen, die geringe Mengenbedarfe aufweisen, aber für den Kunden trotzdem lieferbar sein müssen. In der Automobilindustrie finden sich Ersatzteile mit geringen Bedarfen vor allem bei Kleinserien in dem Segment der Sport- oder Luxusfahrzeuge, oder bei Bauteilen der Großserien, die aufgrund ihrer geringen Beanspruchung sehr kleine Ersatzteilbedarfe aufweisen. Dabei sind solche Bauteile wirtschaftlich sinnvoll zu drucken, die geringe Anforderungen an die Oberfläche, Materialgüte und Toleranzen aufweisen. Übersteigen die Anforderungen an die Qualität die Fertigkeiten der 3D-Druck Maschine, muss eine Nacharbeit „in Handarbeit“ erfolgen. Am Beispiel des Innenraumlichts ist zu erkennen, dass dieses Ersatzteil bei geringen Ersatzteilbedarfen und durchschnittlichen Anforderungen an Qualität sinnvoll zu drucken ist. Das Konstruieren von integrierten Geometrien steigert die Wirtschaftlichkeit eines additiven Fertigungsverfahrens durch den Entfall der Montage von Einzelteilen.

Die Schaffung von Individualität an Fahrzeugen ist schon in der Serienproduktion ein stark zunehmender Trend, der sich durch steigende Konfigurationsmöglichkeiten und der Entwicklung von Sonderserien bemerkbar macht. Der Zubehörmarkt bietet hingegen die Möglichkeit zur Individualisierung bereit produzierter Fahrzeuge. Dies ist ein interessanter Markt für den 3D-Druck, der hier seine Vorteile durch wirtschaftliche Fertigung in kleinen Losgrößen voll entfalten kann. Das Beispiel des Frontspoilers zeigt, dass individuelle Merkmale für Kleinserienfahrzeuge im Exterieur, aber auch im Interieur sehr gut mit dem 3D-Drucker zu produzieren sind. Die Neugestaltung nach Kundenwünschen von Zubehörteilen hat zudem den positiven Nebeneffekt, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen bezüglich Patent- und Designschutz nicht greifen und somit keine Hürden darstellen.

Die Luftfahrtindustrie eint zwei für diese Arbeit relevante Ziele. Zum einen gilt es das Szenario „Aircraft on Ground“ zu vermeiden. Ob im zivilen oder militärischen Bereich verursacht der Ausfall eines Flugzeugs so hohe Kosten, dass bei Ersatzteilen eine kurze

Wiederbeschaffungszeit gegenüber den Preisen für diese Ersatzteile stark im Vordergrund steht. Die Luftfahrtindustrie ist somit im Vergleich zur Automobilindustrie stärker dem Zeitdruck als dem Kostendruck ausgesetzt. In der Wiederbeschaffungszeit der Ersatzteile, die für den Flugbetrieb und außerhalb einer geplanten Wartung benötigt werden, liegt das große Potential für den 3D-Druck. Der Zeitdruck zur Fertigstellung einer Reparatur wird zum Kostendruck durch Umsatzausfälle und ermöglicht der schnellen, aber kostenintensiveren additiven Fertigung das Potential zum Einsatz. Interessante Bauteile für diesen Einsatzfall sind solche, die für den Flugbetrieb notwendig sind, aber grundsätzlich nicht dezentral bevorratet werden. Beispiele für diese Bauteile sind Halterungen, Blenden, Führungen und Scharniere im Interieur und Exterieur. Diesen Bauteilen ist gemein, dass sie nur geringen Belastungen ausgesetzt sind und zudem im Falle des Versagens die Flugsicherheit nicht gefährdet wird. Durch weitere Forschung und das Sammeln von Erfahrungswerten bezüglich der Belastbarkeit 3D - gedruckter Bauteile ist zukünftig auch der Einsatz sicherheitskritischer Bauteile, wie zum Beispiel Turbinenblätter, denkbar.

Zum anderen steht im Bereich des Zubehörmarktes der Luftfahrtindustrie die Leistungssteigerung von Bauteilen durch Gewichtsreduktion und anwendungsspezifische Konstruktion im Vordergrund. Die Beispiele der Gepäckfachblenden und der Lüftungskanäle haben gezeigt, dass ein Neudesign von nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen für ältere Flugzeuge einen potenziellen Anwendungsfall darstellt. Aber auch hoch technische Bauteile, wie zum Beispiel eine Einspritzdüse, kann durch ein Neudesign mit integrierten Funktionen eine Leistungssteigerung des Bauteils darstellen.

Eingebremst wird der 3D - Druck von Ersatzteilen durch die strengen Richtlinien im Luftfahrtbetrieb. Die Forschung an additiven Bauteilen für die Serienproduktion von Flugzeugen lässt aber den Ersatzteilmarkt aufgrund der Kontinuität bei der Wahl der Fertigungsmethode vom Serien- zum Ersatzteil, in gleichem Maße mitwachsen.

10 Literatur

3D-DRUCKCENTER. *FDM Verfahren (Fused Deposition Modelling)* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <http://3d-druckcenter.at/fdm/>

ALCALDE RASCH, A., 2000. *Erfolgspotential Instandhaltung. Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements*. Zugl.: Duisburg, Univ., Diss., 1998. Berlin: Erich Schmidt. Duisburger betriebswirtschaftliche Schriften. 21. ISBN 3-503-05811-7.

BAUMBACH, M. und A.T. STAMPFL, 2002. *After-sales-Management. Marketing - Logistik - Organisation*. München: Hanser. Pocket-Power Einkauf und Logistik. 118. ISBN 3446219021.

BEEKMAN und S. de LEEUW, 2008. Supply chain oriented performance measurement for automotive spare parts [online]. *international journal of automotive technology management*, **8**. international journal of automotive technology management. Verfügbar unter: doi:10.1504/IJATM.2008.018768

BIEDERMANN, H., 2008. *Ersatzteilmanagement. Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen*. 2., erw. und aktualis. Aufl. Berlin: Springer. VDI-Buch. ISBN 9783540682059.

Boeing, Aviation Parts and Aftermarket Services [online] [Zugriff am: 12. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.boeing.com/commercial/services/parts-solutions/parts/>

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ. *Gesetz über die Haftung fehlerhafter Produkte. ProdHaftG* [online] [Zugriff am: 5. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/prodhaftg/index.html>

CHUA, C.K. und K.F. LEONG, 2017. *3D printing and additive manufacturing. Principles and applications*. (The 5th edition of Rapid prototyping: principles and applications). New Jersey: World Scientific. ISBN 978-981-3146-75-4.

Deutsches Patent- und Markenamt [online], 10 August 2019 [Zugriff am: 4. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.dpma.de/dpma/index.html>

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 2017a. *Designs* [online]. *Eine Informationsbroschüre zum Designschutz*. 11.2017 [Zugriff am: 4. Januar 2020]. Verfügbar unter: https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/2/bro_design_dt.pdf

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, 2019. *Marken* [online]. *Eine Informationsbroschüre zum Markenschutz*. 10.2020 [Zugriff am: 1. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/broschueren/bro_marken_dt.pdf

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT, Hg., 2017b. *Patente. Eine Informationsbroschüre zum Patentschutz* [online]. München [Zugriff am: 4. Januar 2020]. Verfügbar unter: https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/2/bro_patente_dt.pdf

DOMES, R., 2017. *Wie gut ist der Audi RS 4 (B7) mit V8-Saugmotor?* [online]. *GEBRAUCHTE SUPERTEST-HELDEN IN DER KAUFBERATUNG* [Zugriff am: 17. Januar 2019]. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/kaufberatung-audi-rs-4-b7-gebrauchtwagen-schwachstellen-leistungsmangel-motor/>

DR. MARK J. COTTELEER, 2014. *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*, 1. Oktober 2014.

EDLUND PETER, 2017. *Additive Manufacturing in Low-volume Production. Business Case for Metal Components*. Master Thesis. Chalmers.

EOS GMBH. *Interieur - Gewichtsoptimierte Komponenten mit maximaler Designflexibilität* [online] [Zugriff am: 18. Januar 2020]. Verfügbar unter: https://www.eos.info/branchen_maerkte/luftfahrt_raumfahrt/interieur

FASTERMANN, P., 2012. *3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt*. Berlin, Heidelberg: Springer. X.media.press. ISBN 978-3-642-29224-8.

FELDMANN, C., C. SCHULZ und S. FERNSTRÖNING, 2019. *Digitale Geschäftsmodell-Innovationen mit 3D-Druck: Erfolgreich entwickeln und umsetzen* [online]: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 9783658251628. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=gwGSDwAAQBAJ>

FISCHER, A. und S. ROMMEL, 2015. *3D-Druck für Unternehmen. Erfolgreich produzieren mit Fused Layer Modeling (FLM): Grundlagen - Anwendungsbeispiele - Best Practices*. München: Hanser, Carl. ISBN 978-3-446-44008-1.

GEBHARDT, A., 2016. *Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. ISBN 978-3-446-44401-0.

- GEBHARDT, A., J. KESSLER und L. THURN, 2019. *3D printing. Understanding additive manufacturing* [online]. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 9781569907030. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=cmp2DwAAQBAJ>
- GRIFFITH LAURA, 2019. *Nächster Schritt bei der Stützstrukturenerzeugung* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.tctmagazin.de/naechster-schritt-bei-der-stuetzstrukturenerzeugung/>
- HINSCH, M., 2013. *Impulsgeber Luftfahrt. Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte*. Berlin: Springer Vieweg. Lexikon. ISBN 978-3-642-32668-4.
- HOFBAUER, G. und D. RAU, 2011. *Professionelles Kundendienstmanagement. Strategie, Prozess, Komponenten*. Erlangen: PUBLICIS. ISBN 9783895783739.
- HOLMSTRÖM, J., J. PARTANEN, J. TUOMI und M. WALTER, 2010. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment [online]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, **21**, 687-697. Journal of Manufacturing Technology Management. Verfügbar unter: [doi:10.1108/17410381011063996](https://doi.org/10.1108/17410381011063996)
- HORSCH, F., 2013. *3D-Druck für alle : der Do-it-yourself-Guide* [online]: Hanser. Hanser eLibrary. ISBN 9783446436985. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=biDRnAEACAAJ>
- HSIN-HUNG WU und YA-NING TSAI, 2011. A DEMATEL method to evaluate the causal relations among the criteria in auto spare parts industry [online]. *Applied Mathematics and Computation*, **218**(5), 2334-2342. ISSN 0096-3003. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.amc.2011.07.055](https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.07.055)
- JACKSON, R., 2009. Testmanagement: Professionelles Testen [online]. *Informatik-Spektrum*, **32**(1), 37-41. ISSN 1432-122X. Verfügbar unter: [doi:10.1007/s00287-008-0300-y](https://doi.org/10.1007/s00287-008-0300-y)
- KOETHER, R.A.U., 2017. *Fertigungstechnik, 5.A*: CARL HANSER Verlag GMBH &. ISBN 978-3-446-44831-5.
- KOUDAL, P., 2006. *The Service Revolution in Global Manufacturing Industries*. ISBN 1-892383-48-9.

KOVACS, G.L. und D. KOCHAN, 2013. *Digital Product and Process Development Systems: IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, Germany, October 10-11, 2013, Proceedings* [online]: Springer Berlin Heidelberg. IFIP Advances in Information and Communication Technology. ISBN 9783642413292. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=YWK5BQAAQBAJ>

KUMKE, M., 2018. *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Dissertation. AutoUni-Schriftenreihe. Band 124. ISBN 978-3-658-22209-3.

LI, Y., G. JIA, Y. CHENG und Y. HU, 2016. Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study [online]. *International Journal of Production Research*, 1-18. International Journal of Production Research. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207543.2016.1231433

LIU, P., S. HUANG, A. MOKASDAR, H. ZHOU und H. LIANG, 2014. The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (Scor) model based analysis [online]. *Production Planning and Control*, **25**. Production Planning and Control. Verfügbar unter: doi:10.1080/09537287.2013.808835

MARK3D UK LIMITED. *3D-Printing from Markforged in Education* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.mark3d.com/en/>

MARX UWE, 2. Januar 2020. Wie der 3-D-Druck in die industrielle Fertigung einzog [online]. *Frankfurter Allgemeine* [Zugriff am: 19. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/rueckblick-auf-die-2010er-jahre-wie-der-3-d-druck-in-die-industrielle-fertigung-einzog-16561104.html?premium>

MATERIALISE. *Airbus setzt auf 3D-Druck für Kabinen-Interieur* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.materialise.com/de/cases/airbus-setzt-auf-3d-druck-fuer-kabinen-interieur>

NETZ KONSTRUKTEUR, 2019. *Stereolithographie* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://netzkonstrukteur.de/fertigungstechnik/3d-druck/stereolithographie/>

RAPIDOBJECTS, 2020. *Additive Fertigung / 3D Druck* [online]. *Fertigungstoleranzen*. Verfügbar unter: https://www.rapidobject.com/csdata/download/1/de/fertigungstoleranzen_fuer_3d_druck_materialien_307.pdf

SCHLATTMANN, J. und A. SEIBEL, 2017. Grundlagen der Produkthaftung im Entwicklungsprojekt [online]. In: J. SCHLATTMANN und A. SEIBEL, Hg. *Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 181-189. ISBN 978-3-662-49548-3. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49548-3_9

SCHMIEDER, F., 2011. *Nachbauer und Markenphlegmatiker* [online]. *Rechtliche Untiefen im Zusammenhang mit 3D-Druck* [Zugriff am: 1. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/ct/artikel/Nachbauer-und-Markenphlegmatiker-1355130.html>

SCHRÖTER, M., 2006. *Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains*: DUV. ISBN 978-3-8350-0193-0.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE, 2018. *Designschutz für Kfz-Teile* [online]. *Entwurf eines Gesetzes zur Stärkung des fairen Wettbewerbs von 09/18*. Verfügbar unter: https://www.bmjv.de/SharedDocs/Gesetzgebungsverfahren/Stellungnahmen/2018/Downloads/04102018_Stellungnahme_VDA_Staerkung-fairer-Wettbewerb.pdf?__blob=publicationFile&v=2

WAGNER, F., 2016. *Die Auslegung von Art. 101 Abs. 3 AEUV durch die EU-Kommission in Bekanntmachungen, Leitlinien und Gruppenfreistellungsverordnungen* [online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-8225>

WANNENWETSCH, H., 2014. *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung* [online]: Springer Berlin Heidelberg. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783642450235. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=b-GZBAAAQBAJ>

WIRTH, M.A.A., 2017. *Additive Fertigung: Technologie, Markt und Innovation*. Doctoralthesis.

YUKHIN, A., 2017. *Mit 3D-Scanner und 3D-Druck zur perfecten Kopie. 3D-Scan und additive Fertigung in der Chirogie*. MedPLAST.

ZEIDLER STEPHAN, 2019. *3D-Printing (3DP)* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2020]. Verfügbar unter: <http://medfab.de/3d-druck-verfahren/3d-printing-3dp/>

ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK. *Industrielle CT- and Röntgensysteme* [online] [Zugriff am: 23. Oktober 2019]. Verfügbar unter: <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/computertomographie.html#download>

11 Anhang

11.1 Anhang Interviews.....	2
11.2 Anhang Tabellen.....	11

11.1 Anhang Interviews

Interview Transkript

mit N. D., am 19.11.2019

Berater bei einer der führenden 3D-Drucker Hersteller im industriellen Bereich.

Interviewer: Hallo N., vielen Dank, dass du dir die Zeit genommen hast, mir Fragen zu der Themenstellung meiner Bachelorarbeit zu beantworten?

Experte: Hallo Lukas, sehr gerne helfe ich dir bei deiner Bachelor Arbeit. Ich habe zu meiner Zeit auch schon Interviews für meine Bachelor Arbeit führen müssen.

Interviewer: Wenn Ich das richtig recherchiert habe, arbeitest du in der Tochtergesellschaft der Firma (...), die für die Beratung zum Thema 3D-Druck zuständig ist?

Experte: Genau, (...) ist die Beratung der Firma (...). Wir bearbeiten Kundenentwicklungsprojekte seit mittlerweile 4 Jahren. Wir begleiten die Kunden von Stufe 1, bei der die Kunden ihre eigene Lage selbst einschätzen müssen und wir diskutieren welche Bauteile für den 3D-Druck sinnvoll sind und welche Business-Cases sich von der Kostenseite her lohnen können. Über Stufe 2, die Anwendung zu re-designen, einen Business-Case zu entwickeln und in die Produktion zu überführen.

Interviewer: Ich studiere Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Logistik. Deshalb liegt ein Schwerpunkt meiner Arbeit auf der Distribution und Lagerung von gedruckten Ersatzteilen, falls es überhaupt eine Lagerung gibt. Siehst du die reduzierte Supply Chain auch als eines der Hauptargumente für die Ersatzteilherstellung mit 3D-Druck?

Experte: Ja tatsächlich, wir beschäftigen uns auch mit 2 Gedankengängen. Zum Ersten beschäftigen wir uns auch mit dem Thema aus derselben Motivation wie Du, das Potential des 3D-Drucks komplett abzubilden. Was wir natürlich nicht haben, ist Expertise in der Lagerhaltung der konventionellen Prozesskette der Ersatzteildistribution. Da würde ich mich noch mit Kollegen aus der produzierenden Praxis unterhalten. Soweit ist unser Eindruck, dass es das Potential gibt. Es gibt Anwendungsfälle im Ersatzteilwesen, sowohl in der Automobilindustrie als auch in der Luft- und Raumfahrt. Es ist aber abhängig von der Marktstruktur. Manche Unternehmen vertreiben ihre Ersatzteile selbst, manche lagern das Ersatzteilgeschäft komplett aus. Was man in sicherheitsrelevanten Bereichen, sei es

im Automobilbau, Luft- und Raumfahrt oder der Medizintechnik beachten muss, ist, dass die Ersatzteile neu qualifiziert werden müssen. Das ist aktuell noch einer der großen Hemmnisse, dass der 3D-Druck flächendeckend für die Ersatzteilproduktion eingesetzt werden kann. Zum Beispiel im Personentransport gelten gewisse Regularien, dass Crash-test bestanden werden müssen. Es gibt noch diverse Anforderungen, die den Übergang zum 3D-Druck erschweren.

Interviewer: Habt ihr schon konkrete Erfahrungen mit Unternehmen, die ihre Ersatzteile mit 3D-Druck Verfahren produzieren?

Experte: Wir sind gerade dabei dieses Thema bei uns in Consulting aufzubereiten. Wir haben einen Business-Case für verschiedene Anwendungen. Es lohnt sich vor allem, wenn die Stückzahlen sehr niedrig sind und das alternative Ersatzteil nicht mehr beschafft werden kann. Das Thema nennt sich Obsoleszenz (Anmerkung: Veralterung eines Produktes, das dadurch unbrauchbar wird), wenn die Bauteile nicht mehr verfügbar sind. Sei es im Maschinenbau, wenn die Maschine stillsteht oder zum Beispiel das Thema „Aircraft on Ground“ im Luft- und Raumfahrtbereich. Dabei kann es schnell so teuer werden, dass es egal ist, wie das Ersatzteil beschafft werden kann und man muss in einer Nacht- und Nebel Aktion das Bauteil qualifizieren, um die Kosten im Rahmen zu halten.

Interviewer: Sind die Zulassungsvorschriften, die du gerade erwähnt hast, wirklich so schnell zu erreichen? Welche Unterschiede in der Zulassung gibt es für welche Bauteile?

Experte: Ja, es hängt natürlich von den Bauteilen ab. Es gibt zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt Bauteile in 3 Klassen, bei denen die Kritikalität mit jeder Klasse steigt. Je höher die Klasse, desto ausführlicher werden die Tests. Wenn ein Unternehmen XYZ Interesse daran hat ein Bauteil schnell auf den Markt zu bringen, dann können die Testverfahren auch beschleunigt werden.

Interviewer: Hast du noch weitere Gründe in deiner Karriere erfahren, warum Unternehmen ihre Ersatzteile drucken wollen?

Experte: Ja, ein weiterer interessanter Grund kann auch sein, das Bauteil im Land zu produzieren, in dem es benötigt wird, um zum Beispiel zollrechtliche Themen zu umgehen. Das heißt, die Ersatzteile sind eigentlich schon verschickt, liegen aber noch aus beispielsweise regulatorischen Gründen vor Ort beim Zoll und sind deshalb nicht verfügbar. Da kann es aus unserer Sicht einen potenziellen Business-Case geben, dass man lokal produziert, um das Thema Zoll zu umgehen.

Interviewer: Hast du aus deiner beruflichen Erfahrung schon konkrete Anwendungsfälle, bei denen der 3D-Druck für die Ersatzteilproduktion eingesetzt wurde? Wenn ja, welche Bauteile aus welchen Baugruppen könntest du mir nennen?

Experte: Das sind meist Kunststoff- und Metallteile. Im Kunststoffbereich sind es meistens einfache Abdeckungen. Im Metallbereich können das auch durchaus komplexere Halterungen sein, die nicht kritische Bauteile sind. Sehr interessant wird es, wenn man Bauteile mit einer bestimmten Funktion hat, zum Beispiel eine Einspritzvorrichtung mit einer Düse oder ähnlichem, bei dem man die Funktion verbessern kann. Das kann jedoch auch sehr kompliziert werden, da man die komplette Baugruppe neu qualifizieren muss.

Interviewer: Gibt es Unternehmen die ihre Strategie splitten, das heißt sie produzieren für die Serienfertigung mit konventionellen Fertigungsverfahren, da die benötigte Stückzahl sehr hoch ist, bei der Ersatzteilproduktion setzten sie jedoch den 3D-Druck ein?

Experte: Das ist ein Szenario, dass wir uns durchaus auch vorstellen können, allerdings hängt das sehr stark von der Technologie ab, die für das Serienprodukt verwendet wird. Zum Beispiel bei Bauteilen, die in der Serienproduktion gefräst wurden, werden diese sicher auch in der Ersatzteilproduktion gefräst, aus dem Grund, dass die Prozessdaten für den Fräsprozess schon vorliegen. Wenn wir uns die Produktion mit einem Spritzgusswerkzeug anschauen, ist die Wahl der Verfahrensweise sicher abhängig von der benötigten Stückzahl und davon, wie lange das Spritzgusswerkzeug hält. Spritzgusswerkzeuge verschleißten, so können sie zum Beispiel 8 Jahre lang produzieren. Kommt jedoch das Jahr 9, 10, 11 und 12 mit neuen Ersatzteilmfällen, wäre das typischerweise ein Fall, wo der Einsatz des 3D-Drucks sinnvoll wäre. Bei Gussteilen wäre es genau dasselbe. Hierfür benötigt man ebenfalls ein Werkzeug, um das Bauteil herzustellen. Wenn man jedoch für jedes Bauteil die Gussmaschine rüsten muss, ist die Frage, ob sich das lohnt. Außerdem muss man das Werkzeug ebenfalls einlagern. Womit wir momentan noch wenig Verständnis von haben ist, wie viel es kostet ein Bauteil beispielsweise ein Jahr einzulagern. Wenn du in deiner Arbeit ein gutes Paper dazu findest, würde ich mich sehr freuen, wenn du mir dieses zukommen lassen könntest.

Interviewer: Ja, sehr gerne lasse ich dir Informationen zukommen, wenn ich etwas Passendes finde. Welche Gründe siehst du als am wichtigsten, dass Unternehmen sich in die Ersatzteilproduktion für den 3D-Druck entscheiden?

Experte: Der Traum der Unternehmen ist es, dass sie sich den Rattenschwanz an Logistik sparen und man nur noch ein digitales File einlagert, was die Kosten natürlich stark senken würde. Das ist auch die Vision, die wir haben, das wird aber natürlich nicht für alle Bauteile möglich sein. Ich denke es gibt gewisse Fälle, in denen sich der 3D-Druck sehr gut einsetzen lässt. Die Fälle wären, wenn es das Bauteil nicht mehr gibt, das Bauteil wird besser, das heißt, man kann eine Prozess- und Produkteffizienz herbeiführen und der dritte Fall wäre, die Ersparnis von Lagerkosten. Der dritte Fall ist aus unserer Sicht der, der den größten Einfluss haben kann.

Interviewer: Über meinen Professor habe ich einen Kontakt zu Porsche Classic bekommen. Diese drucken bereits Ersatzteile mit dem 3D-Drucker für den weltweiten Vertrieb. Denkst du, dass die Produktion von Ersatzteilen für Oldtimer aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit der Ersatzteile ein gutes Anwendungsfeld ist?

Experte: Ja, Porsche Classic druck bereits Ersatzteile mit unseren Druckern. Das ist ein sehr spannender Bereich mit sehr viel Potential, da es bei Ersatzteilen für Oldtimer viele Obsoleszenz gibt. Das widerspricht jedoch auch dem Gedanken vieler Kunden, die original Ersatzteile verkaufen wollen.

Interviewer: Bei der Zertifizierung von Bauteilen für den Personenbeförderungsverkehr sind strenge Zulassungsfortschriften zu erfüllen. Gibt es bei der Zertifizierung 3D gedruckter Bauteile beziehungsweise Ersatzteile Qualitätsprobleme?

Experte: Die Qualität aus unserer Sicht passt in den meisten Fällen. Manchmal kommt es vor, dass bei einem Materialwechsel, zum Beispiel von ABS-Spritzguss auf einen Polyamid 12-3D-Druck zusätzliche Produkttests notwendig sind. Im Allgemeinen ist es eher das mangelnde Vertrauen in die noch neue und unbekannte Technologie.

Interviewer: Danke für das nette Gespräch und die sehr guten Informationen.

Interview Transkript

mit B. H., am 5.12.2019

Head of Innovation bei der führenden Beratungsfirma für 3D-Druck in Schweden.

Das Unternehmen berät und forscht für Unternehmen aus der Automobil-, Luftfahrt-,
Werkzeug- und anderer Industrien.

Interviewführer: Hallo B., ich hoffe es geht dir? Vielen Dank, dass du dich bereit erklärt hast, ein Interview für meine Bachelorarbeit mit mir zu führen.

Experte: Hallo Lukas, sehr gerne stehe ich für ein Interview zur Verfügung. Ich war letzte Woche auf Europas größter Messe für 3D-Druck in Frankfurt. Viele Innovationen wurden dort vorgestellt, auch zum Thema Ersatzteilproduktion.

Interviewführer: Das Unternehmen, bei dem du arbeitest, berät andere Unternehmen bei der Einführung und Weiterentwicklung von additiven Herstellungsmethoden?

Experte: Wir gehören zu einer der 11 größten schwedischen Firmen im industriellen Bereich. Wir sind ein Joint-Venture verschiedener Firmen für „Research and Development“ im Bereich Additiver Herstellungsverfahren. Für unsere Kunden bieten wir Beratung an, führen Forschungen durch und entwickeln Applikationen. Außerdem bieten wir Trainings- und Weiterbildungsseminare an.

Interviewführer: Was sind die entscheidenden Treiber, wenn Kunden für die Produktion ihrer Ersatzteile additive Herstellungsverfahren einsetzen wollen?

Experte: Wir fragen die Kunden vor Beginn einer Zusammenarbeit nach ihren „Pain Points“, das heißt, wir fragen nach den Problemen, die sie mit ihrem aktuellen Ersatzteilgeschäft haben. Diese können sehr unterschiedlich sein. Zum einen ist der Wechsel zu neuen Herstellungsmethoden sehr von der Lead-Time (Anmerkung: Durchlaufzeit in der Ersatzteilbereitstellung) getrieben, für Unternehmen die komplexe Systeme betreiben bei denen die Up-Time (Anmerkung: Verfügbarkeit) sehr von Bedeutung ist. Das Ziel ist dabei die Lead-Time zu verkürzen, wobei man sagen muss, dass speziell Ersatzteile aus Metall, die durch einen 3D-Drucker hergestellt werden, immer noch eine Durchlaufzeit von mindestens einer Woche haben plus die Nacharbeitungszeit, die normalerweise meh-

rere Wochen beträgt. Damit wäre die Lösung nicht On-Demand (Anmerkung: auf Bestellabruf) zu produzieren, sondern den Lagerbestand zu reduzieren. Somit würde ein Lagerbestand nicht mehr 100 Teile betragen, sondern nur noch 10 Teile. Ich glaube aber, wenn Predictive-Maintenance (Anmerkung: Planung der Instandhaltung anhand von in Echtzeit verfügbaren instandhaltungsrelevanten Daten) noch mit in das Spiel kommt, kannst du dem schon näherkommen, dass du das Ersatzteil genau dann druckst, wenn es gebraucht wird.

Interviewführer: Welche weiteren Vorteile beziehungsweise Nachteile siehst du in der additiven Fertigung von Ersatzteilen?

Experte: Zuerst muss man zwischen Ersatzteilen aus Kunststoff und Metall unterscheiden. Ein großes Problem bei Metallteilen ist immer noch die Nacharbeitung. Für die Nacharbeitung sind große Maschinen notwendig, wie zum Beispiel zum Fräsen oder Sägen. Dadurch ist eine Produktion vor Ort (Anmerkung: an dem Ort, an dem das Ersatzteil benötigt wird) nur mit hohen Investitionskosten möglich. Deshalb ist die Produktion von Metall Ersatzteilen stand heute immer noch mit einer Lagerhaltung verbunden. Anders bei Bauteilen aus Kunststoff, hier sind die Investmentkosten für den Drucker und die Nacharbeitung sehr viel geringer. Ein Bauteil kann somit leichter am Einsatzort gedruckt werden.

Ein weiteres Problem, dass sich vor allem auf Metallteile bezieht, ist, dass sich Unternehmen vor allem die großen Ersatzteile nicht in das Lager legen lassen wollen. Bei großen Teilen hat die additive Fertigung auch ihre Grenzen, speziell im Laserbereich, welche stand heute die vorherrschende Technologie ist.

Interviewer: Welche weiteren Problemstellen siehst du bei der Implementierung des 3D-Drucks im Allgemeinen?

Experte: Eine weitere Herausforderung, die wir auch ganz stark in einem Projekt mit Daimler Evobus und EOS gesehen haben, ist das Thema Datenmanagement und IT-Sicherheit. Ein Großteil der Industrie arbeitet immer noch mit Excel. Am Ende ist es sehr schwer die notwendigen Informationen zu bekommen. Die Prozesse haben eine unheimlich hohe Komplexität und nur wenige Unternehmen arbeiten mit einer durchgehend digitalen Prozesskette.

Interviewer: In meiner Bachelorarbeit vergleiche ich die Ersatzteilbranche der Automobil- und Luftfahrtindustrie. Für welche der beiden Industrien siehst du das größere Potential für den Einsatz des 3D-Drucks für die Ersatzteilproduktion?

Experte: Ich würde sagen, dass der Druck und die Zahlungsbereitschaft in der Luft- und Raumfahrt deutlich höher ist als in dem automobilen Sektor. Bei unserem Shareholder Saab Aero ist die Besonderheit, dass diese Fighter Jets produzieren. Wenn ein Produkt von Saab, die auch im Defence Bereich sehr stark sind, im Einsatz ist, dann sind Ausfälle ihrer Produkte oft mit dem Leben zu bezahlen oder gehen schnell in die Millionen. Daher sind Eigentümer dieser Produkte in der Regel eher bereit hohe Kosten für eine kurze Wiederbeschaffungszeit aufzuwenden.

Wohingegen beim PKW ist die Zahlungsbereitschaft nicht so hoch, denn wenn ein Auto zum Beispiel einen Monat nicht fahrbereit ist, ist der Ausfall im Vergleich zur Luft- und Raumfahrt nicht so gravierend.

Interviewer: Welche Schwierigkeiten siehst du bei der Zulassung 3D gedruckter Ersatzteile in Hinsicht auf die beiden Industrien?

Experte: Auch wenn die Qualifizierung von Ersatzteilen in der Luftfahrtindustrie kritischer ist, gibt es dort eine höhere Bereitschaft das Thema anzugehen. Wenn du von der Automobilindustrie sprichst, kommt eher der Sektor Bus und Landmaschinen in Frage, da in diesen Branchen Geld mit dem Vehikel verdient wird.

Interviewer: Welche Erfahrungen hast du bei Industrieunternehmen gemacht, die eine Strategie für das Ersatzteilgeschäft mit 3D-Druck aufbauen wollen?

Experte: Die Hersteller schauen sich vor allem die auslaufenden Komponenten an, die schon nicht mehr in Serie sind und für die es kein Werkzeug mehr gibt. Gleichzeitig überlegen sie bei den neu entwickelten Teilen, die später auch einmal in die Ersatzteil Produktion übergehen werden, welche Strategie für sie die beste sein könnte. Konventionell werden am Ende einer Serie so viele Ersatzteile produziert, damit diese für die nächsten 10 Jahre ausreichen. Aber vor allem Teile, die heute schon nicht mehr in Serie sind und von denen es kein 3D-Modell mehr gibt, können sehr interessant für den 3d-Druck sein. Die vorhandenen Bauteile werden für die Produktion eingescannt und reproduziert oder, wenn das Bauteil nicht mehr vorhanden ist, wird auf Basis der 2D-Zeichnung ein 3D-Modell hergestellt.

Interviewer: Ich möchte noch einmal zurück zu den Beweggründen Eurer Kunden kommen. Welche Faktoren sind entscheidend bei der Entscheidungsfindung pro oder contra 3D-Druck?

Experte: Entweder ist es getrieben über die neuen Möglichkeiten, die mit dem 3D-Druck möglich sind. Außerdem haben viele Kunden die Idee, Geld und Durchlaufzeiten einzusparen. Der Punkt, der denke ich am häufigsten genannt wird, ist der, dass ein Schmerz vorhanden ist. Ein gutes Beispiel dafür ist ein Kunde, der an uns herangetreten ist. Sein bestehendes Lager war zu 95% gefüllt. Bei seiner immer größer werdenden Modellpalette hätte er im nächsten Jahr in ein komplett neues Lager für mehrere Millionen investieren müssen. Wir haben dann untersucht, wie man trotz größer werdender Ersatzteilvielfalt die Anzahl an Ersatzteilen reduzieren kann. Daher sind die Beweggründe aus meiner Sicht sehr schmerzgetrieben.

Ein anderer Grund ist auch, dass Unternehmen sehen, dass der Wettbewerb ebenfalls die neue Technologie nutzt.

Interviewer: Also denkst du, dass die Angst den Fortschritt zu verpassen, ein Grund ist, warum Unternehmen in den 3D-Druck investieren?

Experte: Ja genau, Sie haben Angst, dass sie den Fortschritt verpassen und ihre Kunden verlieren. Man muss auch ganz klar sagen, wenn ein Hersteller heute damit konfrontiert wird seine Ersatzteile zu drucken, dann ist es häufig so, dass der Kunde nur daran interessiert ist das Ersatzteil zu bekommen. Dem Kunden ist es egal, ob der OEM (Anmerkung: Originalausrüstungshersteller) oder irgendjemand anderer das Ersatzteil produziert. Deshalb ist die Frage nicht, ob ich mein Ersatzteil selber drucken will oder das Ersatzteil von jemand anderem drucken lasse, sondern, ob ich den Ersatzteilmarkt selber kontrollieren will, anstatt den Ersatzteilmarkt den Händlern zu überlassen, aber dann selbst außen vor zu sein. Die Hersteller machen unheimlich viel Gewinn auf der Service- und Ersatzteilseite. Die Hersteller haben Angst dieses Geschäft zu verlieren. Ich denke, die Situation ist ähnlich wie wir es auf der Streaming (Anmerkung: Dateiübertragungsformat, bei dem die Datei bereits beim Herunterladen angesehen werden kann) Seite gesehen haben. Am Anfang waren unglaublich viele illegale Streaming Downloads, aber später mit Apple, Netflix und Spotify sah man, dass Kunden eine Zahlungsbereitschaft für guten Service haben. Daher sind Hersteller davon getrieben einen guten Service anzubieten, bevor es andere machen.

Interviewer: Welche Baugruppen im Automobil- und Flugzeugsektor sind aus Deiner Erfahrung am besten für die Produktion mit additiven Fertigungsverfahren geeignet?

Experte: Interieur Bauteile sind auf jeden Fall sehr gut geeignet. Allgemein sind alle Bauteile geeignet, die nicht kritisch (Anmerkung: bezogen auf die Belastung des Bauteils) und keine Standard Komponenten sind. Motoren Komponenten, die belastet werden, sind eher weniger geeignet.

Interviewer: In der Literatur habe ich oft das „Turbinenblatt“ als Beispiel für ein sinnvoll zu produzierendem Ersatzteil gesehen. Teilst du diese Meinung?

Experte: Ich denke das war ein bewusster Schritt ein Turbinenblatt als Beispiel zu nehmen, um in dem Prozess zur Ersatzteilproduktion möglichst viel zu lernen. Ich denke aber, dass es nicht das erste Bauteil sein wird, das mit dem 3D-Drucker hergestellt wird. Ich denke, dass werden zum Beispiel Kleiderhaken oder Abdeckungen sein. Bauteile, die ein Flugzeug daran hindern zu fliegen, wenn sie nicht funktionsfähig sind. Aber bei einem Ausfall das Flugzeug nicht abstürzen zu lassen, sind am besten geeignet.

Interviewer: Vielen Dank für deine Zeit und die sehr hilfreichen Informationen!

11.2 Anhang Tabellen

Tabelle: Bewertung für den additiver Verfahrensvergleich

AFV/ Bewertungskategorien	Laser			
	Stereolithografie (SL)	Binder Jetting (3DP)	Fused Layer Molding	Laser Sintern (Metall)
Produktionskosten (1=teurer, 5=günstig)	2,5	4,5	4,5	1,5
Anschaffungskosten	2	5	4	1
Druckkosten	3	4	5	2
Produktionszeit (1=langsam,5=schnell)	4,5	5	4	3,5
Produktionszeit	5	5	4	3
Nachbearbeitungszeit	4	5	4	4
Produktqualität (1=niedrig,5=hoch)	4,5	3	2,5	4
Mechanisch Belastbar	4	1	2	5
Oberflächenqualität	5	4	2	2
Präzision	5	4	3	4
Komplexe Desings	4	3	3	5
Produktionsflexibilität (1=unflexibel,5=flexibel)	2,5	4,5	4	4
Materialvielfalt	4	5	3	5
Materialumstellung	1	4	5	3

ADV-Vergleich

Legend:

- Laser Stereolithografie (SL)
- Binder Jetting (3DP)
- Fused Layer Molding
- Laser Sintern (Metall)

Criteria (1=unfavorable, 5=favorable):

- Top: Produktionskosten (1=teurer, 5=günstig)
- Right: Produktionszeit (1=langsam, 5=schnell)
- Bottom: Produktqualität (1=niedrig, 5=hoch)
- Left: Produktionsflexibilität (1=unflexibel, 5=flexibel)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, **Lukas Paskert**, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

3D-Druck für die Ersatzteilversorgung in der Automobil- und Luftfahrtindustrie

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe

München, den 04.02.2020