

Schlussbericht- Kurzfassung

zu IGF-Vorhaben

Ersatzteil 3D - Steigerung der Wirtschaftlichkeit in der Ersatzteilversorgung durch den Einsatz von
3D-Druckverfahren

der Forschungsstelle(n)

International Performance Research Institute gGmbH (IPRI)

Das IGF-Vorhaben **18426 N** der Forschungsvereinigung
Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB). e.V. - GVB wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)
vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Stuttgart, 29.08.2017

Ort, Datum

Markus Jung

Name des Projektleiters an der Forschungsstelle

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Ausgangssituation und Zielsetzung	7
2 Arbeitspaket 1: Bewertungskriterien für Ersatzteil-Fertigungsverfahren.....	9
2.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung.....	9
2.2 Ergebnis: Bewertungsvorlage mit Bewertungskriterien für Ersatzteil-Fertigungsverfahren.....	9
3 Arbeitspaket 2: Methodik zur Erarbeitung von Leistungs- sowie Kostenprofilen für additive Fertigungsverfahren	10
3.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung.....	10
3.2 Verfahrensbeschreibung und Leistungskriterien	11
3.2.1 3D Printing	11
3.2.2 Selektiven Lasersinterns	12
3.2.3 Selektives Laserschmelzen	13
3.2.4 Elektronenstrahlschmelzen	14
3.2.5 Fused Deposition Modeling	14
3.2.6 Stereolithografie	15
3.2.7 Poly-Jet Verfahren	16
3.2.8 Laserauftragschweißen	16
4 Arbeitspaket 3: Entscheidungsmethodik zum Einsatz der Verfahren	18
4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung.....	18
4.2 Entscheidungsmethodik zum wirtschaftlichen Einsatz additiver Fertigung im Ersatzteilmanagement	18
4.2.1 Prüfschritt 1: Prüfung der Strategie zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung	19
4.2.2 Prüfschritt 2: Prüfen, ob verwendbares Datenformat für Ersatzteil vorliegt	19
4.2.3 Prüfschritt 3: Anwenden der Orientierungs-Empfehlung	19
4.2.4 Prüfschritt 4: Leistungsanforderung an das Ersatzteil bewerten und prüfen	20

4.2.5	Prüfschritt 5: Einordnung der relevanten Ersatzteile und Auswahl eines Druckverfahrens.....	20
4.2.6	Prüfschritt 6: Kosten des Ersatzteils bewerten und prüfen.....	21
4.3	Framework zur Ableitung von Szenarien zur wirtschaftlichen Einführungsstrategien additiver Fertigung	22
4.3.1	Fallstudie 1: Hansgrohe SE.....	23
4.3.2	Fallstudie 2: Webasto SE	24
4.3.3	Fallstudie 3: Daimler AG	25
4.3.4	Fallstudie 4: Mittelständischer Maschinenbauer	25
4.3.5	Fallstudie 5: Rehm Schweißtechnik GmbH & Co. KG	26
5	Arbeitspaket 4: Implikationen zur Ableitung vorteilhafter Anwendungsfälle.....	26
5.1	Phase O:.....	27
5.2	Phase I.....	27
5.3	Phase II.....	28
5.4	Phase III.....	28
5.5	Phase IV	28
5.6	Strategieentwicklung	28
6	Durchführende Forschungsstelle.....	29
7	Förderhinweis.....	29
	Literaturverzeichnis	30

Zusammenfassung

Die additive Fertigung erlangt zunehmende Aufmerksamkeit in der Wissenschaft und Praxis. Aus wissenschaftlich technischer Sicht stehen stetige Weiterentwicklungen in Fertigungsgeschwindigkeit, Prozesssicherheit und Produktnutzen im Vordergrund. Dabei stellt die additive Fertigung durch mögliche dezentrale Fertigungsstrukturen die bei Bedarf fertigen können insbesondere für das Ersatzteilmanagement eine interessante Option dar. Unternehmen können sich ebenfalls an solchen Kriterien ausrichten und eine additive Fertigung in Betracht ziehen. In der unternehmerischen Praxis steht, bei der Einführung einer neuen Technologie, jedoch neben den genannten Kriterien häufig eine unmittelbare Kosten-Nutzen Bilanz im Vordergrund. Eine Technologie wird nur etabliert wenn sie bei gegebener Leistungsfähigkeit unmittelbare Kosteneinsparungen mit sich bringt. Unternehmen und insbesondere KMU haben begrenzte Ressourcen, um dieses Spannungsfeld der allgemeinen Vorteilhaftigkeit additiver Fertigung gegenüber konventioneller Fertigung und einer kostenseitigen Vorteilhaftigkeit zu ermitteln. Der vorliegende Forschungsbericht zeigt daher zunächst die Grundlagen im Herstellungsprozess und der Kostenberechnung additiver Fertigung auf. Darauf aufbauend wird eine Entscheidungsmethodik eingeführt, die es KMU ermöglicht rasch eine Einordnung ihrer Ersatzteile hinsichtlich der Eignung für additive Fertigung durchzuführen, diese kostenseitig zu bewerten und eine Gegenüberstellung zur konventionellen Fertigung durchzuführen. Diese Methodik wird im Anschluss in Fallstudien in Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses angewendet. Im vierten Kapitel werden aus den praktischen Fallbeispielen Strategien abgeleitet, die in Abhängigkeit unterschiedlicher Ansprüche an die additive Fertigung (Nutzen maximierend bzw. Kosten minimierend) effiziente Einstiegsmöglichkeiten aufzeigen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung zum wirtschaftlichen Einsatz additiver Fertigung	18
Abbildung 2: Übersicht geeigneter Strategien zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung.....	19
Abbildung 3: Verbesserte Entscheidungsgrundlage durch ein konsolidiertes Ersatzteilportfolio	21
Abbildung 4: Framework zur wirtschaftlichen Einführung additiver Fertigung.....	23
Abbildung 5: Nutzeffekte additiver Fertigung über dem Integrationsgrad	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zielstellung und Ergebnisse in AP1	9
Tabelle 2: Identifizierte Leistungskriterien	9
Tabelle 3: Identifizierte Kostenkriterien	10
Tabelle 4: Zielstellung und Ergebnisse in AP2	10
Tabelle 5: Leistungskriterien des 3D-Printing	11
Tabelle 6: Vor- und Nachteile von 3DP mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	11
Tabelle 7: Leistungskriterien des SLS	12
Tabelle 8: Vor- und Nachteile von SLS mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	12
Tabelle 9: Leistungskriterien des SLM	13
Tabelle 10: Vor- und Nachteile von SLM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	13
Tabelle 11: Leistungskriterien des Elektronenstrahlschmelzens	14
Tabelle 12: Vor- und Nachteile von EBM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	14
Tabelle 13: Leistungskriterien des FDM	14
Tabelle 14: Vor- und Nachteile von FDM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	15
Tabelle 15: Leistungskriterien der SLA	15
Tabelle 16: Vor- und Nachteile von SLA mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	15
Tabelle 17: Leistungskriterien des PJV	16
Tabelle 18: Vor- und Nachteile von PJV mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	16
Tabelle 19: Leistungskriterien des Laserauftragschweißens	17
Tabelle 20: Vor- und Nachteile von Laserauftragschweißen mit potenziellem Einfluss auf die Kosten	17
Tabelle 21: Zielstellung und Ergebnisse in AP3	18
Tabelle 22: Orientierungs-Empfehlung für die Auswahl des Fertigungsverfahrens in der Ersatzteilversorgung	20
Tabelle 23: Zielstellung und Ergebnisse in AP4	26
Tabelle 24: Durchführende Forschungsstelle	29

Abkürzungsverzeichnis

3DP	3D Printing
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
CAD	Computer Aided Design
CJP	Color Jet Printing
DLP	Digital Light Processing
EBM	Elektronenstrahlschmelzen
FDM	Fused Deposition Modeling
FLD	Fast Layer Deposition
FPP	Fabru Plastic Printing
FTI	Film Transfer Imaging
MJM	Multi-Jet Modeling
PA 12	Polyamid 12
PC	Polycarbonat
PJV	Poly-Jet Verfahren
PPSF	Polyphenylsulfon
SDL	Selective Deposition Lamination
SHS	Selective Heat Sinterring
SLA	Stereolithografie
SLM	Selektives Laserschmelzen
SLS	Selektives Laserintern
STL	Standard Triangulation Language

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Produzierende Unternehmen müssen für ihre hergestellten Produkte die Ersatzteilversorgung sicherstellen. In vielen Branchen haben sich über die gesetzlichen Anforderungen der Versorgung während der gewöhnlichen Nutzungsdauer hinausgehende Versorgungszeiten etabliert.¹ Bspw. ist es in der Automobilindustrie üblich, dass Zulieferer die Versorgung mit Ersatzteilen noch mindestens 15 Jahre nach Produktionsende des Primärprodukts sicherstellen müssen. Im Maschinenbau haben sich Versorgungszeiten von über 20 Jahren etabliert. Über diese Versorgungszeiten verändern sich die Bedingungen, unter denen die Unternehmen Ersatzteile fertigen:² Die Bedarfe werden geringer, zunehmend treten Perioden mit sehr geringen bzw. Nullbedarfen auf. Eine Kompensation durch angepasste Lagerhaltung, bspw. eine Zwischenbevorratung, ist aufgrund der begrenzten Lagerfähigkeit der Teile (bspw. bei Gummi- oder Kunststoffteilen) oft nicht möglich. Häufig sind Fertigungen kleinster Losgrößen erforderlich.

Konventionelle Fertigungsverfahren (Fräsen, Gießen, etc.) sind hier oft nicht wirtschaftlich, da allein die Vorbereitung der Produktionsanlagen Rüstkosten verursacht. Dazu treten gegen Ende der Versorgungszeit in der Praxis zusätzliche Probleme auf, wie die Nichtverfügbarkeit von Fertigungsmitteln, die versehentliche Verschrottung von Werkzeugen³ oder nicht mehr bezugsfähige Zukaufteile. Technisch sind diese Probleme durch eine Nachentwicklung lösbar, jedoch entstehen hierbei enorme Kosten, oft im vier- oder fünfstelligen Euro-Bereich pro Nachentwicklung. Diese Kosten können oft nur zu einem Bruchteil an die Kunden weitergegeben werden. Additive Fertigungsverfahren bieten eine technische Lösung für die genannten Anforderungen der geringen Losgrößen bis hin zur Fertigung einzelner Teile bzw. der Kompensation fehlender Werkzeuge/Fertigungsmittel. Diese aus der Produktentwicklung (Rapid Prototyping) stammenden Verfahren bieten die Möglichkeit zur Fertigung von Ersatzteilen ab Losgröße 1, benötigen hierzu keine Werkzeuge und es fällt kein Materialverlust in Form von Verschnitt etc. an. Darüber hinaus können komplexeste geometrische Formen gefertigt werden. Den aufgeführten Möglichkeiten des 3D-Drucks stehen Einschränkungen gegenüber: Ersatzteile können in der additiven Fertigung mit den aktuellen Verfahren nur mit langer Prozesszeit und hohen Stückkosten bei geringen Skaleneffekten gefertigt werden. Durch die zahlreichen Verfahren, welche unter dem Oberbegriff additive Fertigung subsumiert werden, kann bei den Materialien

¹ Vgl. Voss 2006, S. 20f.

² Vgl. Voss 2006, S. 21f. und Baumeister 2008

³ Diese resultiert bspw. aus unterschiedlichen Verantwortlichkeiten. Die Werkzeugplanung und -vorhaltung obliegt der Produktion, die Abschätzung der Nachfertigungsbedarfe aber dem Service. Nur dieser weiß, ob nach mehreren Perioden mit Nullbedarfen wieder eine Nachfertigung erfolgen soll. Teilweise greifen dann aber bereits Mechanismen in der Produktion, die bspw. eine Aussortierung von Werkzeugen nach drei Perioden mit Nullbedarfen vorsehen.

auf Keramiken, Metalle oder Kunststoffe zurückgegriffen werden.⁴ Um die vorteilhaften Anwendungsfälle der Ersatzteilversorgung zu ermitteln wurde im vorliegenden Forschungsbericht folgendes erarbeitet: Für welche Ersatzteil-Fertigungsaufträge können additive Fertigungsverfahren grundsätzlich eingesetzt werden und welche additiven Fertigungsverfahren genügen welchen konstruktiven Anforderungen bzw. Einsatzbedingungen der Ersatzteile? Unter welchen Voraussetzungen im Ersatzteilmanagement sind 3D-Verfahren die bessere Alternative im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren? Welches Verfahren ist für den konkreten Anwendungsfall auszuwählen? Wie kann die additive Fertigung im Unternehmen etabliert werden? Die Klärung dieser Fragen ist für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aufgrund kapazitiver Beschränkungen bzw. aufgrund des fehlenden Wissens über die Druckverfahren und des fehlenden Zugangs zu 3D-Druckern nicht möglich. Daher können die sich für die Ersatzteilversorgung ergebenden Potenziale bisher nicht genutzt werden.

Es fehlt eine Entscheidungsmethodik, mit welcher ein mittelständisches Unternehmen die oben gestellten Fragen selbstständig beantworten kann. Hierzu benötigt es

- Allgemeine Kenntnisse zu den unterschiedlichen Verfahren der additiven Fertigung
- Ersatzteilspezifische Leistungs- sowie Kostenprofile der Verfahren der additiven Fertigung,
- Empfehlungen für vorteilhafte Anwendungsfälle additiver Fertigung
- Strategien zum Umgang in der Einführung mit additiver Fertigung

Die Erarbeitung dieser genannten Bausteine ist Gegenstand des Forschungsvorhabens Ersatzteil3D. Damit soll die folgende Forschungsfrage umfassend beantwortet werden: „In welchen Fällen können 3D-Druckverfahren die Wirtschaftlichkeit der Ersatzteilversorgung erhöhen?“ Dadurch sollen KMU in die Lage versetzt werden, ihre Ersatzteilversorgung durch die Wahl des geeigneten Fertigungsverfahrens zu optimieren. Die Erarbeitung der Forschungsergebnisse erfolgte praxisgeleitet mit zwei Gruppen: einerseits den Anbietern der verschiedenen 3D-Druckverfahren und andererseits den Herstellern von Ersatzteilen. Analog dazu wurde der Projektbegleitende Ausschuss des Projekts besetzt.

Die Anbieter der 3D-Druckverfahren ermöglichten durch ihre Expertise und Anlagen eine Beurteilung und Erprobung der Leistungsfähigkeit der Verfahren sowie der Adaption- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten. Die Hersteller von Ersatzteilen erprobten die Leistungsfähigkeit der 3D-Druckverfahren und der Entscheidungsmethodik an verschiedenen Anwendungsfällen. Weiterhin haben sie die Anforderungen an Ersatzteil-Fertigungsverfahren eingebracht.

⁴ Vgl. Fastermann 2012

2 Arbeitspaket 1: Bewertungskriterien für Ersatzteil-Fertigungsverfahren

2.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung

Tabelle 1: Zielstellung und Ergebnisse in AP1

Arbeitspaket 1	Bewertungskriterien für Ersatzteil-Fertigungsverfahren
Inhalte	Schaffung der Grundlage zur Bewertung der Ersatzteil-Fertigungsverfahren, durch die Ableitung ersatzteilspezifischer Bewertungskriterien für 3D-Druck- und konventionelle Ersatzteil-Fertigungsverfahren.
Geforderte Ergebnisse laut Antrag	<ul style="list-style-type: none"> - Kriterien für die Auswahl eines Ersatzteil-Fertigungsverfahrens - Abgestimmte Bewertungsvorlage zur Beurteilung der Ersatzteil-Fertigungsverfahren
Erarbeitete Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Kriterien zur Auswahl eines Ersatzteil-Fertigungsverfahrens - Abgestimmte Bewertungsvorlage zur Beurteilung der Ersatzteil-Fertigungsverfahren

2.2 Ergebnis: Bewertungsvorlage mit Bewertungskriterien für Ersatzteil-Fertigungsverfahren

Es wurden **6 Leistungskriterien und 10 Kostenkriterien** identifiziert. Die 6 Leistungskriterien sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Tabelle 3 zeigt die 10 Kostenkriterien identifizierten. Neben den identifizierten Bewertungskriterien sind in den Tabellen auch die jeweiligen Einheiten und Definitionen der Bewertungskriterien aufgeführt. Zusätzlich werden Leistungskriterien weiter nach fertigungsspezifischen und maschinenspezifische Kriterien unterteilt, wobei die fertigungsspezifischen Kriterien weiter nach Werkstoff- und Bauteileigenschaften unterschieden werden. Die Kostenkriterien sind ebenfalls in fertigungsspezifische und maschinenspezifische Kriterien unterteilt. Im Folgenden werden die identifizierten Kriterien definiert.

Tabelle 2: Identifizierte Leistungskriterien

Leistungskriterien	Einheit	Erklärung
Zugfestigkeit	[Mpa]	Maximale mechanische Zugspannung, die der Werkstoff aushält, bevor er bricht/reißt
Härte	[HBW/Shore/HRC]	Mechanischer Widerstand, den ein Werkstoff der mechanischen Eindringung eines anderen Körpers entgegensetzt, auch ein Maß für das Verschleißverhalten von Materialien
Wandstärke	[m m]	Mechanische Stabilität abhängig von der Geometrie (Wandhöhe usw.) und Anwendung

Leistungskriterien	Einheit	Erklärung
Bauteilgenauigkeit	[μm]	Istmaße eines Werkstücks liegen innerhalb der definierten Toleranz (keine Abweichung außerhalb des Nennmaßes)
Schichtdicke	[m m]	Beeinflusst Stufeneffekt
Max. Bauvolumen	[m m ³]	Maximale Druckgröße

Tabelle 3: Identifizierte Kostenkriterien

Kostenkriterien	Einheit	Erklärung
Materialpreis	[€/kg]	Höhe der Materialkosten pro kg
Materialverbrauch	[kg]	Abhängig vom generativen Prozess (bei gleicher Geometrie)
Personalkosten	[€/h]	Schulungsaufwand, Zeitaufwand zur Steuerung
Recyclingrate	[%]	Anteil des aus dem Abfall recycelten Materials
Nettobauzeit	[cm ³ /h], [mm ³ /s]	Baugeschwindigkeit
Verfahrensbedingte Nebenzeiten	[min], [h]	Vor- und Nachbereitungszeiten
Stückzahl	[Anzahl]	Anzahl herzustellender identischer Bauteile
Ausfallzeit	[min], [h]	Abhängig von Servicesituation
Anschaffungskosten	[€]	Höhe der Anschaffungskosten
Instandhaltungskosten	[€]	Updates oder Upgrades, Wartung

3 Arbeitspaket 2: Methodik zur Erarbeitung von Leistungs- sowie Kostenprofilen für additive Fertigungsverfahren

3.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung

Tabelle 4: Zielstellung und Ergebnisse in AP2

Arbeitspaket 2	Erarbeitung von Leistungs- sowie Kostenprofilen für additive Fertigungsverfahren
Inhalte	Erarbeitung von ersatzteilspezifischen Leistungs- sowie Kostenprofilen für additive Fertigungsverfahren und Gegenüberstellung zur konventionellen Fertigung
Geforderte Ergebnisse laut Antrag	Ersatzteilspezifische Leistungs- und Kostenprofile für additive Fertigungsverfahren für 10 Fertigungsverfahren und konventionelle Fertigung

Erarbeitete Ergebnisse	Ersatzteilspezifische Leistungs- und Kostenprofile für additive Fertigungsverfahren für 8 Fertigungsverfahren und konventionelle Fertigung ⁵
------------------------	---

3.2 Verfahrensbeschreibung und Leistungskriterien

Die für das Ersatzteilmanagement relevanten Verfahren sind nach Cotteleer (2014, S. 151) und Schmid und Levy (2012, S. 7) **Selektives Lasersintern (SLS)**, **Selektives Laserschmelzen (SLM)**, **Fused Deposition Modeling (FDM)**, **Stereolithografie (SLA)** und **Elektronenstrahlschmelzen (EBM)**. Mit der rapiden Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren geht eine ständige Erweiterung der Anwendungsfelder einher. Der Projektbegleitende Ausschuss erweitert diesen Fokus, deshalb um **3D Printing (3DP)**, dem **Poly-Jet Verfahren (PJV)** und **Laserauftragschweißen**.

3.2.1 3D Printing

Die relevanten Leistungskriterien des 3DP sind in Tabelle 5 aufgeführt

Tabelle 5: Leistungskriterien des 3D-Printing⁶

Kriterien	Materialauswahl		
	Kunststoffe/ Harze		Polymergips
	hart	weich	
Zugfestigkeit (MPa)	49,8 – 60,3	2,0 – 4,36	30-32
Härte	83 Shore A	61 – 75 Shore A	87 Shore D
Bauteilgenauigkeit (µm)	± 300 bis ± 127 ⁷		
Wandstärke (mm)	2,0		
Schichtdicke (mm)	0,089-0,102		0,076-0,102
Maximales Bauvolumen* (mm x mm x mm)	260x260x200 - 500x600x400		

*in x – y – z Richtung

In Tabelle 6 sind die Vor- und Nachteile des 3DP dargestellt.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile von 3DP mit potenziellem Einfluss auf die Kosten⁸

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Simpler Prozess ohne Hitze und damit geringen Energiekosten - Günstiger Druckknopf gegenüber Laser spart Investitionen - Kleine Anlage führt zu geringen Rauposten 	<ul style="list-style-type: none"> - Zweistufiges Verfahren führt zu Kosten für Infiltration mit niedrig schmelzender Legierung und Aushärtung im Ofen - Erhöhtes Ausfallrisiko der Druckkopfdüsen und damit Instandhaltungskosten - Aushärtung im Ofen bringt Skalierungsprobleme durch Schrumpfung mit sich

⁵ Die Auswahl und Anzahl der relevanten Fertigungsverfahren erfolgte in zwei Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses. Hier wurden diejenigen definiert und ausgewählt die für die Produktion von Ersatzteilen derzeit und in absehbarer Zukunft relevant sind.

⁶ Werte entstammen der Prozessaufnahme bei der Cirp GmbH, vgl. außerdem Vividesign (2016); RapidObject (o.A.), 3D-Druckverfahren – Im Überblick;

⁷ Pham und Gault (1998), S.1281

⁸ Vgl. Grund (2015), S. 44 Hagl (2015), S. 29

<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz unterschiedlicher Binder mit unterschiedlichen Farben und Bauteileigenschaften führt zu geringer Nachbearbeitungszeit - Pulver relativ günstiger Werkstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Kein endfestes Bauteil: auch nach Infiltration zerbrechlich
---	---

3.2.2 Selektiven Lasersinterns

3.2.2.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 7 sind die Leistungskriterien der unterschiedlichen Materialien des SLS aufgelistet. Dabei kommt insbesondere den Kunststoffen eine große Bedeutung zu. SLS-Polymere: PA12 sind mit über 95% Marktanteil das relevante Material.⁹ PA12 wird aktuell von drei Herstellern als Duraform, PA2200/02 und Orgasol hergestellt und vertrieben. Neben den thermoplastischen Kunststoffen werden auch Keramiken und Formsande verarbeitet.¹⁰

Tabelle 7: Leistungskriterien des SLS¹¹

Kriterien	Materialauswahl			
	Alumide	Thermoplastische Kunststoffe (PA12)	Carbon	Graphit
Zugfestigkeit (MPa)	46-48	48-50	76	58
Härte	75 – 80 Shore D			
Bauteilgenauigkeit (µm)	400	400	200	200
Wandstärke (mm)	0,4 – 0,6			
Schichtdicke (mm)	0,1-012			
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	200x250x330 - 700x380x600			

In Tabelle 8 sind die Vor- und Nachteile des SLS dargestellt.

Tabelle 8: Vor- und Nachteile von SLS mit potenziellem Einfluss auf die Kosten¹²

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Überschüssiges Pulver lässt sich entfernen und kann durch Recycling die Materialkosten senken - Keine Stützstrukturen notwendig und damit keine Kosten für Supportmaterial und Ersparnisse in der Endbearbeitung - Mechanisch und thermisch belastbare Endprodukte 	<ul style="list-style-type: none"> - Komponenten wie Laser- und Scannersystem sind teuer - Objekte sind porös und erfordern Infiltration zur Stabilisierung der mechanischen Eigenschaften - Bauteildichte 95% (nur an- und nicht aufgeschmolzen)

⁹ Vgl. Schmid (2015), S. 16, Cotteleer (2014), S. 150f.

¹⁰ Vgl. Grund (2015), S. 41

¹¹ Vgl. Prozessaufnahme Cirp GmbH 2016; des Weiteren in Anlehnung an 3D Alchemy (2016); Rapid-object GmbH (2015); EOS GmbH

¹² Hagl (2015), S. 25 Gebhardt (2013), S. 164

3.2.3 Selektives Laserschmelzen

3.2.3.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 9 sind die Leistungskriterien zu den im SLM relevanten Materialien dargestellt.

Tabelle 9: Leistungskriterien des SLM¹³

Kriterien	Materialauswahl				
	Alumi- nium	Edelstahl	Inconel	Werkzeug- stahl	Kobalt-Chrom Legierung
Zugfestigkeit (MPa)	380-415	930	1020-1215	1950	960
Härte	129 HRV	321 HRV	30-37 HRC	37 HRC	375 HRV
Bauteilgenauigkeit (µm)	100	50	100	60	20
Wandstärke (mm)	0,3	0,4	0,02	0,3	0,3
Schichtdicke (mm)	0,02 – 0,075				
Maximales Bauvolu- men (mm x mm x mm)	280x280x360 - 600 x 400 x 500				

In Tabelle 10 sind die Vor- und Nachteile im SLM dargestellt.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile von SLM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten ¹⁴

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Keine Stützstrukturen notwendig und damit keine Kosten für Supportmaterial und Ersparnisse in der Endbearbeitung - Herstellung sehr dichter Bauteile möglich (99%) - Durch vollständige Aufschmelzung wird Bauteil ohne Einschluss von Poren verfestigt, damit belastbares Endprodukt ohne Nachbearbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Anschaffungskosten der Anlage - Herstellung unter Stickstoffatmosphäre, dadurch komplexe Anlagentechnik mit höheren Betriebskosten - Abkühlen kann mehrere Stunden dauern bis Entnahme aus Pulverkuchen möglich, dadurch längere Nachbearbeitung - Schrumpfprozesse beim Abkühlen verschlechtern Maßgenauigkeit und erhöhen ggf. Nachbearbeitungszeit

¹³ In Anlehnung an 3D Alchemy (2016); Rapidobject GmbH (2015)

¹⁴ Vgl. Gebhardt (2013), S. 46; Grund (2015), S. 43

3.2.4 Elektronenstrahlschmelzen

3.2.4.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 11 sind die Leistungskriterien des EBM dargestellt.

Tabelle 11: Leistungskriterien des Elektronenstrahlschmelzens¹⁵

Kriterien	Materialauswahl		
	Titan	Inconel	Kobalt-Chrom Legierung
Zugfestigkeit (MPa)	1020	1020	960 (nach Hitzebehandlung)
Härte	32-33 HRC	30 HRC	375 HRV
Bauteilgenauigkeit	200		
Wandstärke (mm)	0,3-		
Schichtdicke (mm)	0,07; 0,1		
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	350x350x400		

Die Tabelle 12 zeigt die Vor- und Nachteile des EBM.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile von EBM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten¹⁶

Vorteile	Nachteile
- Hohe Schmelzgeschwindigkeit ermöglicht Verarbeitung sehr hoch schmelzender Werkstoffe wie Aluminium und Titan	- Technologischer Aufwand aufgrund der Vakuumkammer

3.2.5 Fused Deposition Modeling

3.2.5.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 13 sind die Leistungskriterien des FDM dargestellt.

Tabelle 13: Leistungskriterien des FDM¹⁷

Kriterien	Materialauswahl			
	ABS; ABSi	PC	PC-ABS	PPSF
Zugfestigkeit (MPa)	33-37	68	28-29	55
Härte (Shore D)	87	86	750	86
Bauteilgenauigkeit	500 µm			
Wandstärke (mm)	0,2-1			
Schichtdicke (mm)	0,025-0,3			
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	250x250x250 - 1005x1005x1005			

¹⁵ In Anlehnung an 3D Alchemy (2016); Arcam AB; Metal 3D Printing; Hördler rapid engineering

¹⁶ Vgl. Gebhardt (2013), S. 47

¹⁷ In Anlehnung an Zäh (2006); Rapidobject GmbH (2015); Eimer und Schmid o.J.; vividesign 3D (2016); Stratasys Ltd. (2017)

Die Tabelle 14 gibt einen Überblick zu den Vor- und Nachteilen im FDM.

Tabelle 14: Vor- und Nachteile von FDM mit potenziellem Einfluss auf die Kosten¹⁸

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Preisgünstiges Verfahren - Mehrfachextruder können unterschiedliche Farben und Materialien gleichzeitig drucken - „Bürotauglich“ - Relativ große Materialvielfalt mit einfachem Materialwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> - Um während der langen Abkühlphase Verformungen von Überhängen und Hohlräumen zu vermeiden, sind Stützstrukturen notwendig. Kosten für Supportmaterial und Nachbearbeitung - Relativ langsamer Prozess

3.2.6 Stereolithografie

3.2.6.1 Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 15 sind die erarbeiteten Leistungskriterien der Materialein im SLA-Verfahren dargestellt.

Tabelle 15: Leistungskriterien der SLA¹⁹

Kriterien	Materialauswahl			
	Kunststoffe/ Epoxidharze			
	Accura®, Accura Xtreme	WaterShed® XC 11122,	ProtoGen 18920	VisiJet
Zugfestigkeit (MPa)	38 - 44	46,6 - 53,6	46,6 - 53,6	52
Härte (Shore D)	80 - 86	88 - 120;	85,6 - 86,4	86
Bauteilgenauigkeit (µm)	25			
Wandstärke (mm)	0,5			1
Schichtdicke (mm)	0,025 - 0,1			
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	125x125x250 (High Resolution) / 2350x250x250 (Standard) – 1500x750x550			

Die Tabelle 16 beschreibt die Vor- und Nachteile im SLA-Verfahren.

Tabelle 16: Vor- und Nachteile von SLA mit potenziellem Einfluss auf die Kosten²⁰

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Ältestes Verfahren und damit größte Wissensbasis - Überdimensionale Objektfertigungen sind möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Wechsel des Harzes in der Anlage zeitintensiv - Stützstrukturen aus Baumaterial erfordern hohen Nachbearbeitungsaufwand - Weitere Nachbearbeitung durch beispielsweise. Aushärtung im UV Schrank - Geringe thermische und mechanische Belastbarkeit - Hohe Material- und Anschaffungskosten

¹⁸ Vgl. Hagl (2015), S. 26

¹⁹ Vgl. Prozessaufnahme Cirp GmbH 2016; des Weiteren in Anlehnung an Rapidobject GmbH (2015)

²⁰ Vgl. Gebhardt (2013), S. 37; Hagl (2015), S. 20

3.2.7 Poly-Jet Verfahren

3.2.7.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

In Tabelle 17 sind die erarbeiteten Leistungskriterien der Materialien des PJV dargestellt.

Tabelle 17: Leistungskriterien des PJV²¹

Kriterien	Materialauswahl	
	VeroWhite, VeroClear	TangoBlack
Zugfestigkeit (MPa)	50-65	2
Härte	83 Shore D	73 Shore A
Bauteilgenauigkeit	300	
Wandstärke (mm)	0,1-0,5	
Schichtdicke (mm)	0,016-0,03	
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	245x245x195 - 340x340x200	

In der Tabelle 18 sind die Vor- und Nachteile im PJV aufgezeigt.

Tabelle 18: Vor- und Nachteile von PJV mit potenziellem Einfluss auf die Kosten²²

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Vielseitig bei Farbgestaltung und Harzauswahl - Mehrere Materialien in einem Bauteil realisierbar - Sehr dünne Wandstärken möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkte Festigkeit der Bauteile - Stützmaterial erfordert Nachbearbeitung

3.2.8 Laserauftragschweißen

3.2.8.1 Leistungskriterien und Schlussfolgerung für Entscheidungsmethodik

Das Ergebnis des Laserauftragschweißens ist ein Produkt mit guten metallurgischen und mechanischen Eigenschaften. Die Genauigkeit des Bauteils ergibt sich erst durch die Nachbearbeitung und die Genauigkeit dieser. Besonders die Härte sticht im Vergleich zu anderen Verfahren hervor.²³

²¹ In Anlehnung an Rapidobject GmbH (2015); vividesign 3D (2016)

²² Vgl. Hagl (2015), S. 28

²³ Vgl. Gebhardt (2013), S. 286–288

Tabelle 19: Leistungskriterien des Laserauftragschweißens²⁴

Kriterien	Materialauswahl
	Metallische Pulver und Drahtwerkstoffe
Zugfestigkeit (MPa)	Materialtypisch, Edelstahl: 506 Mpa Cobaltchrom: 1350 +/- 100 MPa Nickel Alloy: 675 – 1500 MPa (je nach Legierung, Wärmebehandlung) AlSi10Mg: 460 +/- 20 MPa Titan: 660 – 1290 MPa Hochleistungsstahl: 1100 – 2050 MPa Edelstahl: 770 - 1310 MPa
Härte	Entspricht der für den Werkstoff typischen Härte beispielsweise: Cobaltchrom, Nickel Alloy, Hochleistungsstahl, Edelstahl: 30 – 50 (+/- 10) HRC AlSi10Mg: ca. 119 +/- 5 HBW Titan: 320 +/- 15 HV5
Bauteilgenauigkeit	Ca. ± 20 – 50 µm, bei großen Bauteilen ± 100 – 200 µm
Wandstärke (mm)	Ca. 0,3 – 0,5 mm
Schichtdicke (mm)	Typischerweise zwischen 0,1mm bis mehrere cm; 20-45 µm 100 – 1000 µm NickelAlloy, Titan, Edelstahl: 20-40 µm; AlSi10Mg: 90 µm
Maximales Bauvolumen (mm x mm x mm)	„unbegrenzt“ – es wird eine Freiraumfläche bearbeitet, welche durch den jeweiligen Maschinenaufbau dezimiert wird

In Tabelle 20 sind die Vor- und Nachteile im Laserauftragschweißen aufgezeigt.

Tabelle 20: Vor- und Nachteile von Laserauftragschweißen mit potenziellem Einfluss auf die Kosten²⁵

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Laser ist hochenergetisch und gut fokussierbar - Flexibler Bauraum - Große Bandbreite verarbeitbarer Werkstoffe - Endprodukt besitzt hohe Dichte, Verzug wird minimiert - Modularität 	<ul style="list-style-type: none"> - Für Fertigung eher ungeeignet, eher nur zur Reparatur und für Prototypen - Wirtschaftlichkeit fraglich (hohe Pulververluste, geringe Prozessgeschwindigkeit) - Raue Oberfläche (je nach Genauigkeit der Nachbearbeitung)

²⁴ Vgl. Gieseke u.a. (2016), S. 28; Gebhardt (2013), S. 286–288; EOS GmbH o.J.

²⁵ Vgl. Gieseke u.a. (2016), S. 19, 24f., 28; Fastermann (2012), S. 121; Jambor (2012), S. 12

4 Arbeitspaket 3: Entscheidungsmethodik zum Einsatz der Verfahren

4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen laut Einreichung

Tabelle 21: Zielstellung und Ergebnisse in AP3

Arbeitspaket 3	Entscheidungsmethodik zum Einsatz der Verfahren
Inhalte	Entwicklung einer Entscheidungsmethodik, mit der KMU eigenständig für ihre Anwendungsfälle entscheiden können, welches Ersatzteil-Fertigungsverfahren wirtschaftlich ist
Geforderte Ergebnisse laut Antrag	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidungsmethodik für die Auswahl des passenden Ersatzteil-Fertigungsverfahrens • Dokumentierte Fallstudien • Kriterien für oder gegen den Einsatz einzelner Verfahren
Erarbeitete Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidungsmethodik für die Auswahl des passenden Ersatzteil-Fertigungsverfahrens • Dokumentierte Fallstudien • Kriterien für oder gegen den Einsatz einzelner Verfahren

4.2 Entscheidungsmethodik zum wirtschaftlichen Einsatz additiver Fertigung im Ersatzteilmanagement

Im Folgenden wird durch die Entscheidungsmethodik die Vorteilhaftigkeit additiver Fertigung zum Status Quo im Unternehmen bestimmt. Grafisch ist diese Menge mit exemplarischen Werten in Abbildung 1 dargestellt.

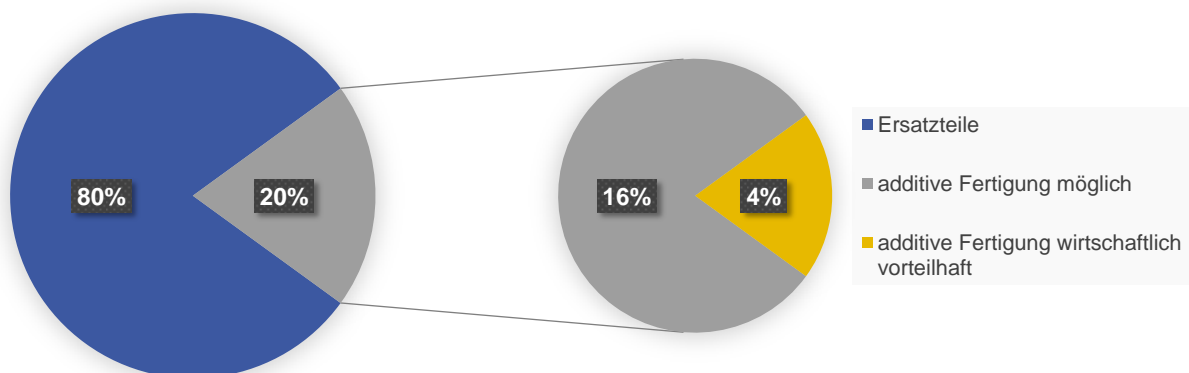


Abbildung 1: Darstellung zum wirtschaftlichen Einsatz additiver Fertigung

Durch das Vorgehen konnte die in sechs Prüfschritten durchzuführende *Entscheidungsmethodik zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Ersatzteilversorgung durch additive Fertigung* entwickelt werden. Durch die Entscheidungsmethodik können alle Ersatzteile eines Unternehmens hinsichtlich der wirtschaftlichen Fertigung durch additive Verfahren betrachtet und systematisiert werden.

4.2.1 Prüfschritt 1: Prüfung der Strategie zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung

Zunächst gilt es zu eruieren, welche Ersatzteilstrategie für das zu prüfende Ersatzteil eingesetzt wird. Hierbei werden sechs Strategien der Ersatzteil-Bedarfsdeckung unterschieden.²⁶ Diese sind: Beschaffen, Produzieren, Endbevorraten, Nutzung kompatibler Teile, Instandsetzung sowie Altteilewiederverwendung. Deren Vorteilhaftigkeit ist in Abbildung 2 dargestellt.

	Ja	Nein
Beschaffen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produzieren	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Endbevorraten	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Nutzung kompatibler Teile	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Instandsetzen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Altteilewiederverwendung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 2: Übersicht geeigneter Strategien zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung

4.2.2 Prüfschritt 2: Prüfen, ob verwendbares Datenformat für Ersatzteil vorliegt

Für die additive Fertigung wird ein digitaler 3D Datensatz benötigt, welcher bei den meisten industriellen Anwendungen durch die Konstruktion des Bauteils mithilfe eines 3D CAD Programmes erstellt wird.²⁷ Das Vorhandensein eines 3D Datensatzes, welcher die Geometrie des Ersatzteils vollständig als 3D Volumenmodell erfasst, ist damit eine wesentliche Vorbedingung für die Herstellung eines Ersatzteils mittels eines additiven Fertigungsverfahrens. Alle in einer Datenbasis eines CAD Systems abgelegten Informationen zu einem bestimmten Bauteil werden als 3D CAD-Modell bezeichnet. Hierzu gehören neben der Beschreibung der Geometrie des Bauteils auch Informationen über Oberflächenbeschaffenheit, Werkstoffe und das Fertigungsverfahren.²⁸

4.2.3 Prüfschritt 3: Anwenden der Orientierungs-Empfehlung

Innerhalb deiner Anforderungsanalyse im Projektbegleitenden Ausschusses wurde unter anderem das Kriterium schnelles Assessment aufgeführt. Um diesem gerecht zu werden, eignet sich die Identifikation von Orientierungs-Empfehlungen. Diese wurden mittels Durchführung eines Workshops mit 15 Teilnehmern erarbeitet. Die Orientierungs-Empfehlungen sind in Tabelle 22 dargestellt. Werden Ersatzteile nach den hervorgehobenen Ausprägungen der Merkmale charakterisiert, zeigt sich eine additive Fertigung des Ersatzteils als eine Alternative zu einer Fertigung mit konventionellen Verfahren. Lassen sich Ersatzteile somit den Ausprägungen C-Teil, Einzelteil, sehr hohe Lagerhaltungskosten, sehr geringe Lagerfähigkeit, sehr hoher

²⁶ Vgl. zu den Strategien den Abschlussbericht des IPRI-Forschungsprojekts GET.

²⁷ Vgl. Gebhardt und Hötter (2016), S. 26

²⁸ Vgl. Gebhardt und Hötter (2016), S. 28

Ersatzteilwert und/oder sporadischer Vorhersagegenauigkeit der Bedarfe zuordnen, stellt eine additive Fertigung dieser eine voraussichtliche mögliche Alternative dar.

Tabelle 22: Orientierungs-Empfehlung für die Auswahl des Fertigungsverfahrens in der Ersatzteilversorgung

Merkmal		Ausprägung				
1	Umsatz/Wertigkeit ABC-Analyse	A-Teil		B-Teil	C-Teil	
2	Wertschöpfungsgrad des Ersatzteils/ Wertschöpfungsstufe/Komplexitätsgrad	Einzelteil	Baugruppe	Modul	System	Produkt
3	Lagerhaltungskosten	Sehr hoch	hoch	Mittel	gering	Sehr gering
4	Lagerfähigkeit	Sehr hoch (sehr geringes Risiko)	Hoch (geringes Risiko)	Mittel (mittleres Risiko)	Gering (hohes Risiko)	Sehr gering (sehr hohes Risiko)
5	Ersatzteilpreis/Ersatzteilwert	Sehr hoch	hoch	mittel	gering	Sehr gering
6	Vorhersagegenauigkeit der Bedarfe (XYZ-Analyse)	regelmäßig		unregelmäßig	sporadisch	

4.2.4 Prüfschritt 4: Leistungsanforderung an das Ersatzteil bewerten und prüfen

In diesem Prüfschritt gilt es, die Leistungsanforderung an das Ersatzteil zu bewerten, um im Anschluss dieses Ersatzteil-Leistungsprofil mit den Leistungsprofilen der Ersatzteil-Fertigungsverfahren, zu vergleichen. Dadurch kann determiniert werden, ob die technische Voraussetzung für das zu fertigende Ersatzteil vorliegt. Sofern alle Leistungskriterien erfüllt sind, kann das Ersatzteil durch das jeweilige additive Fertigungsverfahren hergestellt werden. Es gilt zu berücksichtigen, dass eine Hierarchie der möglichen Ersatzteil-Fertigungsverfahren auf Basis der jeweiligen Erfüllung der Leistungskriterien keinen Mehrwert schafft, auch die Übererfüllung der Leistungsanforderungen des Ersatzteils bietet keinen Mehrwert. Daraus folgt, dass die Hierarchie der durch diesen Prüfschritt identifizierten Ersatzteil-Fertigungsverfahren in den Prüfschritten 5 und 6 durch einen Kostenvergleich als hinreichende Bedingung erfolgt.

4.2.5 Prüfschritt 5: Einordnung der relevanten Ersatzteile und Auswahl eines Druckverfahrens

Durch die ersten vier Prüfschritte werden die für additive Fertigung geeigneten Bauteile identifiziert. Für jedes Bauteil sind zudem die relevanten Fertigungsverfahren aufgezeigt. Wird die Anschaffung eines Druckers erwogen, gilt es den für das jeweilige Ersatzteilportfolio wirtschaftlichen Fall beziehungsweise die Fälle zu ermitteln. Es werden dazu die Anzahl der relevanten Bauteile, die jeweils benötigten Stückzahlen und die Abmessungen betrachtet. Für ein einzelnes Bauteil ist die Anschaffung eines Druckers häufig nicht sinnvoll, da hier hohe Fixkosten

aus dem Maschinenstundensatz entstehen und daher für solche Teile die Fertigung durch einen Dienstleister geprüft werden sollte. Können einem Druckverfahren mehrere Bauteile zugeordnet werden, steigt die Wahrscheinlichkeit einer vorteilhaften additiven Fertigung. Es werden damit Gruppen von Ersatzteilen zusammengestellt, die durch einen bestimmten Drucker herstellbar sind. Die dahinterliegende Vorteilhaftigkeit für die verbesserte Entscheidungsmethodik ist in Abbildung 3 dargestellt. Es gilt diese Gruppen im Prüfschritt 6 auf die Wirtschaftlichkeit der Fertigung zu prüfen.

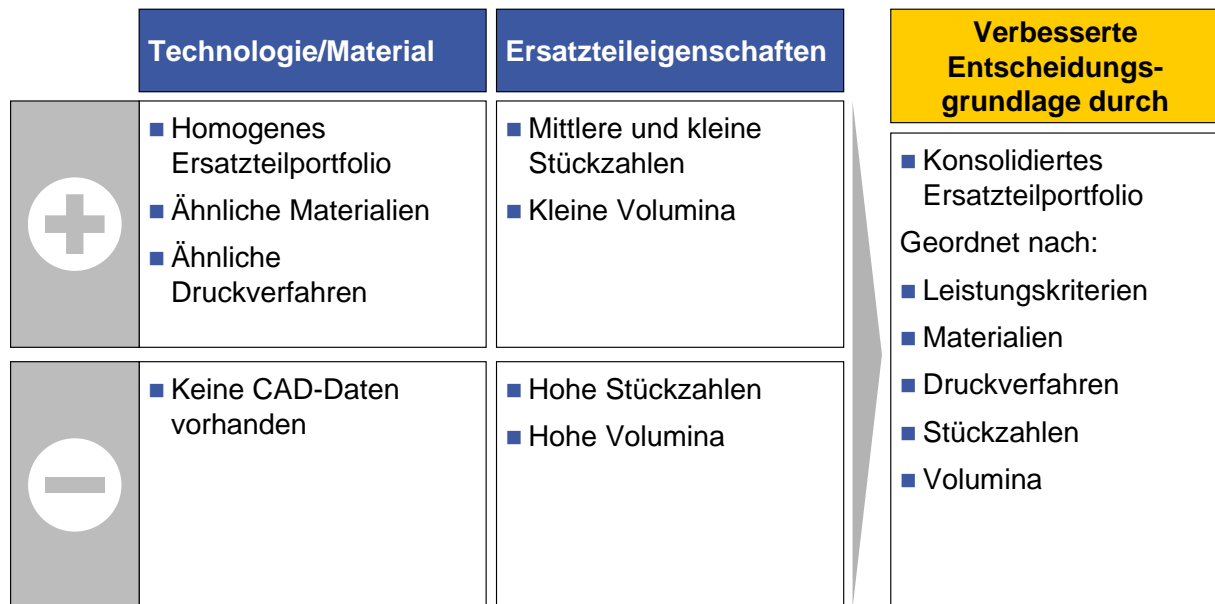


Abbildung 3: Verbesserte Entscheidungsgrundlage durch ein konsolidiertes Ersatzteilportfolio

Für die Fertigung über einen Dienstleister gelten diese Vorgaben nicht. Hier können auch Einzelteile hinsichtlich Material, Stückzahl oder Druckverfahren kosteneffizient sein. Als grundsätzliche Empfehlung werden kleine Stückzahlbereiche mit sporadischen Bedarfen, geringen Volumina und geringen Anforderungen an Härte und Zugfestigkeit ausgesprochen.

4.2.6 Prüfschritt 6: Kosten des Ersatzteils bewerten und prüfen

Zur Wirtschaftlichkeitsrechnung wird auf die Formelsammlung im ausführlichen Schlussbericht verwiesen. Zur exakten Berechnung und wegen der rapiden Entwicklung am Markt sollte stets ein aktueller Preis für die benötigte Maschine und das verwendete Material eingeholt werden. Es gilt dabei zu beachten, dass kleinere Maschinen günstiger sind und eine optimale Auslastung die Kosten optimiert. Im Allgemeinen, wird daher empfohlen die Maschinen an die Anforderungen angepasst - also so klein wie möglich - zu kaufen. Entsprechend der Auswahl der vorhergehenden Schritte werden das Material, sowie die Materialmenge mit Stützmaterial und Recyclingrate berechnet. Zur schnellen Prüfdurchführung und Praxistauglichkeit wird durch das Forschungsprojekt ein Berechnungstool bereitgestellt, das es dem Anwender ermöglicht

seine spezifische Kostenstruktur zu berücksichtigen und die Herstellkosten zu berechnen.²⁹ Durch Einholen eines Angebotes eines Dienstleister können die Kosten additiver Fertigung untereinander verglichen werden. Diese wiederum können den Kosten der konventionellen Fertigung gegenübergestellt werden. Bei der konventionellen Fertigung gilt es, insbesondere die Lager- und Rüstkosten nach der Serienfertigung zu berücksichtigen.

Die durch die Entscheidungsmethodik mit den Prüfschritten 1-6 identifizierten vorteilhaften Fälle für additive Fertigung lassen sich zeitnah umsetzen und versprechen eine unmittelbare Kosteneinsparung. Sie sind jedoch aus einer statischen, kostenorientierten und auf Ersatzteile beschränkten Sicht derzeit noch nicht weitläufig umsetzbar.

4.3 Framework zur Ableitung von Szenarien zur wirtschaftlichen Einführungsstrategien additiver Fertigung

Die Kosten additiver Fertigung können, begründet durch die geringere Komplexität bei der Fertigung und Produktion, beim ersten Bauteil bei rund der Hälfte von konventioneller Fertigung liegen. Durch flachere Lernkurveneffekte und geringerer Skaleneffekte fallen mit steigender Stückzahl zunehmend höhere Kosten an. Die geringen Skaleneffekte und häufig höheren Kosten additiver Fertigung lassen sich durch die technologischen Aspekte geringer Aufbauraten und damit langer Bauzeit je Stück, kleiner Bauräume und damit begrenzte Anzahl je Bauprozess und hohen Materialkosten und damit hohen Einzelkosten beschreiben. Der Lernkurveneffekt auf die *Produktionskosten* an einem Titanium Bauteil aus der Luft- und Raumfahrttechnik (40g Gewicht, 2,5x2,1x1 inch) ergibt beispielsweise Einsparungen bis rund 550 Stück. Im Bereich von 180 bis 550 Stück, können unterschiedliche Vorteile additiver Fertigung die Nachteile in den Produktionskosten überkompensieren. Das heißt, die traditionelle Fertigung ist hier günstiger, jedoch ist additive Fertigung schneller und kann damit je nach Anwendungsfall vorteilhaft sein. Die Projektpartner geben hier an, dass ein Aufschlag von bis zu 100% des Preises vom Kunden akzeptiert wird, sofern die Ersatzteile unmittelbar verfügbar sind. Dieser unscharf definierte Bereich in dem die additive Fertigung durchaus vorteilhaft sein kann, definiert sich für jedes Unternehmen individuell und dehnt sich im Laufe der Zeit zum Vorteil additiver Fertigung aus. Um diesen Bereich abschätzen, bewerten und einen geeigneten Einstiegszeitpunkt festsetzen zu können, wird das Framework in Abbildung 4 eingeführt. Das Framework bietet die Basis zur Beurteilung additiver Fertigung sowohl im Hinblick auf die Eigen- wie auch Fremdfertigung. Darüber hinaus wird ein Betrachtungsrahmen aufgespannt der sowohl interne Stellhebel wie auch externe Treiber aufnimmt und in eine integrierte Beurteilung überführt.

²⁹ Siehe hierzu Anhang VIII

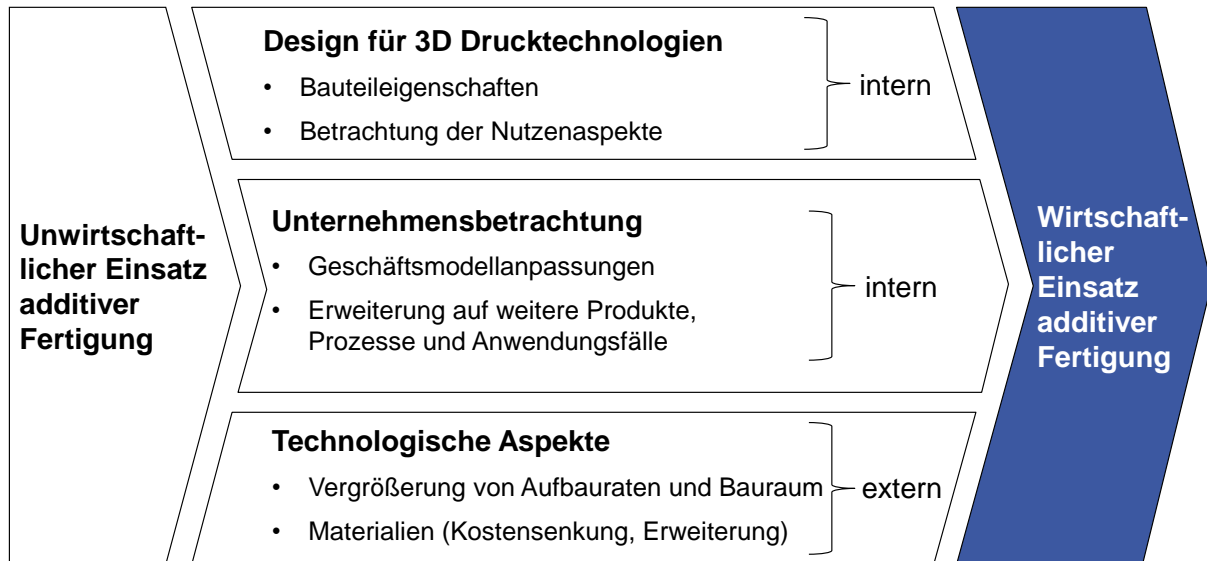


Abbildung 4: Framework zur wirtschaftlichen Einführung additiver Fertigung

4.3.1 Fallstudie 1: Hansgrohe SE

Die Hansgrohe SE sieht sich im Ersatzteilmanagement mit den Besonderheiten sanitärtechnischer Produkte konfrontiert. Insbesondere die Trinkwassereignung steht der additiven Fertigung bislang entgegen. Obwohl das Rapid Prototyping bereits eine große Verbreitung im Unternehmen erfährt, werden keine Ersatzteile gefertigt. Es gibt bislang keine Materialien die hier zertifiziert sind. Ein zukünftiger Lösungsansatz könnte es sein möglichst viele Produkte mit denselben Materialien zu identifizieren und dieses Material bei einem bestimmten Druckverfahren zertifizieren zu lassen. Ob diese Kosten anschließend eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen muss im Einzelfall geprüft werden. Die Fallstudie zeigt, dass es kostenseitig kein vorteilhafter Anwendungsfall für die additive Fertigung existiert. Es werden jedoch keine Werkzeugkosten der Fortführung einer Serienproduktion berücksichtigt. Es sind insbesondere die relativ hohen Stückzahlen ein Kostentreiber der additiven Fertigung. Ein strategischer Ansatz, der sich in der Betrachtung des Ersatzteilportfolio ergeben hat, ist die Kombination von additiver Fertigung im Rapid Prototyping und Ersatzteilmanagement. Dieser Ansatz lässt sich im Framework primär in die Bereiche Unternehmensbetrachtung mit der Anpassung des Geschäftsmodells und der Erweiterung auf weitere Produkte, Prozesse und Anwendungsfälle einordnen. Ein weit etabliertes Rapid Prototyping durch additive Verfahren legt zunächst die Möglichkeit einer Integration der Ersatzteilproduktion in bestehenden Druckern nahe. Jochen Armbruster, Leiter CA-Tools und Prototyping lehnt diesen Ansatz jedoch ab. Ein großer Vorteil der additiven Fertigung im Rapid Prototyping ist der zeitliche Vorteil durch das Entfallen von Rüstkosten und einer unmittelbaren Produktion. Die Verlängerung des Produktionsprozess durch zusätzliches Belegen der Drucker durch Ersatzteile verlängert somit die Produktionszeit. Eine Synergieerzeugung sieht Armbruster jedoch darin, dass nach einer erfolgreichen Zertifizierung Drucker für das Ersatzteilmanagement angeschafft werden können und diese eine

zusätzliche Kapazitätserweiterung für das Rapid Prototyping darstellen. Es werden die Vorteile des bereits bestehenden Know-Hows mit den Bedarfen des Rapid Prototyping verbunden um die Nutzeneffekte zu verstärken und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

4.3.2 Fallstudie 2: Webasto SE

Das Ersatzteilmanagement der Webasto Gruppe sieht sich mit den spezifischen Herausforderungen der Automobilindustrie konfrontiert. Die Ersatzteile müssen teilweise bis zu 30 Jahre auf Vorrat gehalten werden. Da diese zumeist aus Kunststoff bestehen, ist eine zwischenzeitliche Verschrottung und Neuproduktion notwendig. Es liegt deshalb ein besonderes Interesse auf der Reduzierung von Werkzeugkosten bei der Fortführung nach der Serienproduktion und Reduktion von Kosten der langfristigen Verwaltung von Artikelnummern. Die Strategien sind alternative Werkzeuge, welche für geringe Ausbringungsmengen ausgelegt sind und folglich günstiger sind oder die Produktion mittels additiver Fertigung. Bei der Einführung additiver Fertigung ist die thermische Belastung der Bauteile eine weitere Herausforderung. Dieses Zusammenspiel aus unterschiedlichen Notwendigkeiten in der die Vorteile additiver Fertigung zum Tragen kommen erzeugt in der Webasto AG ein Managementinteresse, weshalb hier eine Entwicklung angestrebt wird. Additive Fertigung wird für Ersatzteile bei der Webasto SE derzeit nicht genutzt. Es soll zeitnah ein Dienstleister eingebunden und die additive Fertigung anschließend sukzessive ausgebaut werden.

Die Vorteile aus additiver Fertigung werden im Kern in der Vermeidung der Lagerkosten, Verschrottung und der langfristigen Lieferfähigkeit gesehen. Weitere Vorteile wie die Einführung mit Veränderung der Geometrien oder funktionalen Integration werden zukünftig angestrebt. Es liegt ein Anwendungsfall für die Entscheidungsmethodik vor. Es wird daraus abgeleitet eine Kostenbetrachtung für 5 Ersatzteile vorgenommen. Die Webasto Gruppe strebt in additiver Fertigung im Ersatzteilmanagement kurzfristig die Fremdfertigung an. Mittel bis längerfristig werden bereits Maßnahmen eingeleitet um, die funktionale Integration und geometrische Freiheit zu nutzen. Webasto treibt damit einen wirtschaftlichen und sukzessiven Einstieg in die additive Fertigung voran.

Im Kostenvergleich der Anwendungsfälle der Webasto SE wurden die Kosten konventioneller Fertigung denen durch einen Dienstleister gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich, dass es nicht hinreichend ist, entweder kleine Volumina oder geringe Stückzahlen zu fertigen. Es sollten für vorteilhafte Anwendungsfälle beide Kriterien erfüllt sein. Im Anwendungsfall wird jedoch ersichtlich, dass die Kosten additiver Fertigung, bei hohen Volumina, nur in seltenen Fällen vorteilhaft sein können.

4.3.3 Fallstudie 3: Daimler AG

Die Daimler AG fertigt im Bereich Mercedes Benz LKW derzeit 30 Ersatzteile mittels dem SLS-Verfahren. Es werden dabei insbesondere Synergien zum Rapid Prototyping genutzt: „Wir profitieren von unserer umfassenden Erfahrung bei Daimler mit 3D-Druckprozesse im Prototypenbau“.³⁰ Es werden dabei teilweise Kleinstserien mit besonderen Funktionen durch funktionale Integration und geometrische Freiheit produziert.

Thomas Stengel, FuE der Daimler AG sieht die kritischen Stückzahlbereiche bei maximal 50 Stück je Bauteil. Darüber hinaus gibt er folgende Empfehlung: je geringer das Volumen eines Bauteils ist, desto eher ist es wirtschaftlich über die additive Fertigung zu produzieren. Die Daimler AG sieht großes Potential in der additiven Fertigung für individuelle Ersatzteile. Im Allgemeinen werden jedoch die Anwendungsfälle als stark beschränkt gesehen und weitere technische Entwicklungsschritte benötigt um das Anwendungsspektrum auszubauen.

4.3.4 Fallstudie 4: Mittelständischer Maschinenbauer³¹

Die Anwendungsfälle in diesem Praxisbeispiel ermöglichen gegenüber den weiteren Fallstudien einen neuen Blickwinkel. Der Ausgangspunkt bei der Einführung in der Produktion und dem Ersatzteilmanagement erfolgte nicht unter Kostenaspekten. Es wurde hingegen versucht ein maximaler Nutzen für das Unternehmen zu generieren der nicht unmittelbar wirtschaftlich sein muss. Die angestrebten Effekte waren zunächst eine erhöhte Kundenbindung und ein Alleinstellungsmerkmal durch schnellere und flexiblere Produktion, Um- und Nachbearbeitung. Dabei wird das Laserauftragschweißen als Verfahren gewählt. Es kann gegenüber den Pulverbettverfahren deutlich höhere Leistungskennwerte bezüglich Zugfestigkeit und Härte erzeugen. Durch das Laserauftragschweißen gegenüber konventioneller Fertigung, dauert die Produktion eines Biegedornhalters 6h. Bislang lag die Produktionszeit bei 12 Tagen. Die Kosten erhöhen sich von rund 300EUR konventionell auf rund 750EUR additiv. Da die Biegedornhalter in der laufenden Produktion, bei einem Ausfall sehr hohe Kosten verursachen, werden diese Mehrkosten von den Kunden wohlwollend getragen und führen zu einer Gewinnsteigerung von 700% je Bauteil. Der zweite Anwendungsfall ist eine Reparaturanwendung beziehungsweise Nachbearbeitung. Diese wird in die Frameworkkategorie der Erweiterten Produkte, Prozesse und Anwendungsfälle eingeordnet. Das wurde für einen externen Kunden bearbeitet. Bei einem Wert von 10.000EUR war es durch einen Produktionsfehler Ausschuss. Durch das Laserauftragschweißen konnte es innerhalb von 6 Stunden aufbereitet und in betriebsbereiten Zustand versetzt werden. Der entstehende Mehrwert für den Kunden beläuft

³⁰ Andreas Deuschle Head of Marketing Daimler Trucks (<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Lkw-setzt-wegweisende-Zukunftstechnologie-ein-3D-Druck-Lkw-Ersatzteile-on-demand-lieferbar.xhtml?oid=12788778>)

³¹ Der Unternehmensname wurde auf Grund wettbewerbsrelevanter Daten unkenntlich gemacht

sich auf 8.000EUR, die Reparaturkosten liegen bei 2.000EUR. Des Weiteren konnten Alleinstellungsmerkmale realisiert und die Kundenbindung verbessert werden.

4.3.5 Fallstudie 5: Rehm Schweißtechnik GmbH & Co. KG

Die REHM GmbH u. Co. KG Schweißtechnik wurde ursprünglich als lokaler Service- und Reparaturbetrieb im Jahr 1982 gegründet und entwickelte sich zu einem heute internationalen Entwickler und Hersteller hochwertiger Schweißgeräte, Plasmaschneidanlagen und Sonderschweißanlagen für Industrie und Gewerbe. Zum Durchbruch verhalf besonders das entwickelte Konzept der Stromquellendynamik in den 1980er-Jahren. Das Produktportfolio reicht von leistungsfähiger Schweißtechnik von Impulslichtbogen-MIG/MAG-Anlagen über Invertertechnik bis zum Schweißzubehör (vgl. REHM GmbH u. Co. KG (Hrsg.), 2017a). Seit der Gründung 1982 werden kontinuierlich neue innovative Produkte entwickelt, um die Schweißtechnik für Industrie und Handwerk zu optimieren. REHM produziert ausschließlich in Deutschland und sichert damit qualitativ hochwertige Produkte (vgl. REHM GmbH u. Co. KG (Hrsg.), 2017a). Derzeit beschäftigt das Unternehmen über 125 Mitarbeiter; der Firmensitz befindet sich in Udingen (vgl. REHM GmbH u. Co. KG (Hrsg.), 2017b).

Bei Rehm wird in der additiven Fertigung eine Möglichkeit zur Differenzierung am Markt gesehen. Benötigt werden insbesondere kleine bis mittelgroße Kunststoffabdeckungen für Schweißgeräte. Die Schweißgeräte sind häufig älter als zehn Jahre und werden von Kunden aller Größenklassen genutzt. Sind diese Ersatzteile auf Grund der langen Nutzungsdauer gegen Ende des Produktlebenszyklus nicht verfügbar sieht Rehm die Gefahr in einer Abwanderung der Kunden zu Konkurrenten.

Die geforderten Teile selbst bieten sich hervorragend für die additive Fertigung an. Sie bestehen aus PA12 Kunststoff, sind kaum thermischer oder mechanischer Belastung ausgesetzt und haben relativ geringe Volumina bei gleichzeitig geringen Stückzahlen und sporadischen Bedarfen.

5 Arbeitspaket 4: Implikationen zur Ableitung vorteilhafter Anwendungsfälle

Tabelle 23: Zielstellung und Ergebnisse in AP4

Arbeitspaket 4	Validierung der Entscheidungsmethodik
Inhalte	Überprüfung der entwickelten Entscheidungsmethodik hinsichtlich der Anwendbarkeit, der Güte der Ergebnisse sowie der Möglichkeit zum eigenständigen Einsatz durch KMU
Geforderte Ergebnisse laut Antrag	<ul style="list-style-type: none"> - Geprüfte und überarbeitete Entscheidungsmethodik - Vorteilhafte Anwendungsfälle für 3D-Druckverfahren
Erarbeitete Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Geprüfte und überarbeitete Entscheidungsmethodik - Vorteilhafte Anwendungsfälle für 3D-Druckverfahren

Die durchgeführten Fallstudien lassen sich, in die aufgestellte Entscheidungsmethodik und das Framework einordnen und bewerten. Die Fallstudien zeigen, dass einzelne Kriterien wie beispielsweise geringe Stückzahlen, nicht hinreichend sind wenn das Volumen eines Bauteils zu groß ist. Es gilt somit alle in der Entscheidungsmethodik und dem Framework aufgeführten Kriterien integriert zu betrachten. Durch Strategien aus der Praxis in Kombination mit den theoretischen Grundlagen werden die Nutzeneffekte additiver Fertigung über den Integrationsgrad dargestellt. So können Unternehmen individuell die vorteilhaften Szenarien identifizieren.

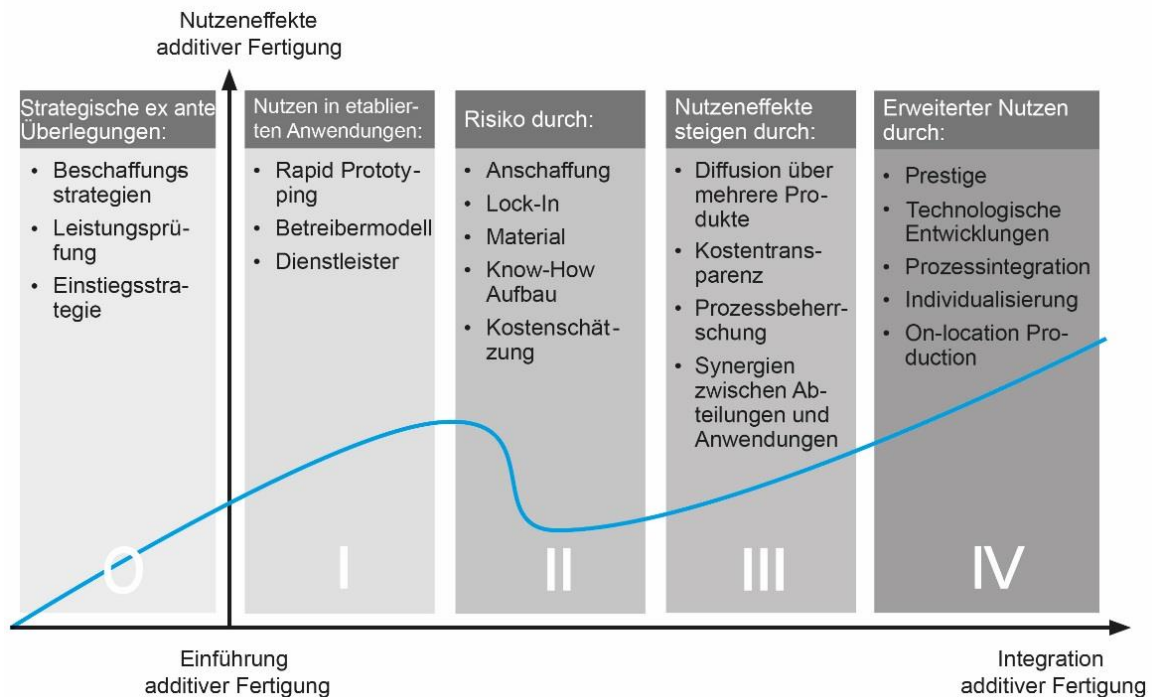


Abbildung 5: Nutzeneffekte additiver Fertigung über dem Integrationsgrad³²

5.1 Phase O:

Phase O liegt vor der eigentlichen Einführung additiver Fertigung. Durch die aufgestellte Entscheidungsmethodik und dem Framework können Unternehmen mit geringem Aufwand eine Kosten-Nutzen-Abschätzung zu ihrem Ersatzteilportfolio und darüber hinaus zu weiteren Produkten im Unternehmen durchführen. Das Risiko kann bereits vor der Einführung additiver Fertigung abgeschätzt werden und Synergien können systematisch erschlossen werden.

5.2 Phase I

Phase I beschreibt die Einführung additiver Fertigung auf im Allgemeinen erprobten und wirtschaftlichen Pfaden. Hierunter fällt die Fertigung durch einen Dienstleister oder das Nutzen

³² Eigene Darstellung

von Betreibermodellen. Besitzt ein Unternehmen bereits 3D-Drucker aus dem Rapid Prototyping, kann dieses Know-How eingesetzt werden.

5.3 Phase II

Phase II beschreibt die Einführung additiver Fertigung durch den Kauf eines Druckers. Die Risiken nehmen durch die Anschaffungskosten und geringes Know-How in der Kostenschätzung zu. Des Weiteren entsteht der Lock-In in die additive Fertigung wenn die Produkte durch die geometrische Freiheit und funktionale Integration erweitert werden und nicht kurzfristig zurück auf konventionelle Fertigung umgestellt werden kann.

5.4 Phase III

In Phase III steigen die Nutzeneffekte an. Es werden weitere Produkte im Unternehmen erkannt, die Kostentransparenz und die Prozesssicherheit steigen. Hinzu kommt weitere Sicherheit bei der Kostenschätzung.

5.5 Phase IV

In Phase IV kommen zusätzliche Nutzeneffekte wie Prestigegewinn und eine höhere Individualisierung hinzu. Durch die weitreichende Prozessbeherrschung können zusätzliche Effekte wie die On-location Produktion kontrolliert und wirtschaftlich erzielt werden.

5.6 Strategieentwicklung

Eine isolierte Betrachtung von vorteilhaften Anwendungsfällen ist nicht praktikabel, weshalb im Folgenden dargestellt wird wie über eine adäquate Strategie die individuellen vorteilhaften Anwendungsfälle ermittelt werden können.

Mit zunehmender Integration additiver Fertigungsprozesse in die eigene Produktion entstehen Risiken für das Unternehmen und es gilt daher eine Strategie zum geeigneten Einstieg festzulegen. Es kann dabei in zwei Ansätze unterschieden werden. Zum einen können Unternehmen der additiven Fertigung per se interessiert gegenüberstehen. Neue Fertigungsmöglichkeiten werden angestrebt und Anlagen zur additiven Fertigung beschafft. Dieser Ansatz ist an keine direkten Kosteneinsparungen geknüpft. Der Ansatz nimmt die Risiken und mittelfristigen Nachteile in Kauf, um langfristig den Nutzen zu maximieren. Es werden die Stufen 0, II, III und IV durchlaufen. Eine vorläufige Nutzenmaximierung in Phase I lässt sich durch die unmittelbare Anschaffung nicht realisieren.

Die zweite Strategie orientiert sich an der Nutzung erprobter Anwendungsfälle additiver Fertigung. Hier wird weiter unterschieden in eine Zeit- beziehungsweise Kostenperspektive (2a beziehungsweise 2b). Unternehmen, welche die additive Fertigung auf Grund von Lieferengpässen betrachten, wählen eine solche Perspektive bei der die Kosten im Hintergrund stehen.

Weiter wird diese Perspektive von Unternehmen eingenommen, welche die additive Fertigung für das Rapid Prototyping nutzen. Dabei werden die Phasen 0 bis I durchlaufen. Im Ansatz 2b wird eine reine Kostenperspektive eingenommen, Unternehmen sehen dabei die additive Fertigung als eine Möglichkeit zur Kosteneinsparung. Diese Kostenperspektive steht im Mittelpunkt der Betrachtung der Entscheidungsmethodik. Die Methodik wurde daher so ausgelegt, dass die Ersatzteile des aktuellen Ersatzteilportfolios identifiziert werden können, die zeitnah wirtschaftlich additiv gefertigt werden können. Es werden ebenfalls die Phasen 0 und I durchlaufen und ein Übergang in Phase III vermieden.

6 Durchführende Forschungsstelle

International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH

Die IPRI – International Performance Research Institute gemeinnützige GmbH wurde mit der Zielsetzung gegründet, Forschung auf dem Gebiet des Performance Management von Organisationen, Unternehmen und Unternehmensnetzwerken zu betreiben.

Unter Leitung von Prof. Dr. Mischa Seiter untersucht IPRI in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und kleinen und mittelständischen Unternehmen die Herausforderungen und Lösungen für die Unternehmenssteuerung im Zeitalter von Industrie 4.0.

Für die durchgeführten Recherchen und Untersuchungen wurden mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt. Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Tabelle 24: Durchführende Forschungsstelle

	IPRI gGmbH, Stuttgart
Anschrift	Königstraße 5, 70173 Stuttgart
Leiter der Forschungsstelle	Prof. Dr. Mischa Seiter
Projektleitung	Markus Jung, M.Sc.
Kontakt	Tel.: 0711/ 6203268-8039, www.ipri-institute.com

7 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18426 N/1 („Ersatzteil3D“) der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB, Wiesenweg 2, 93352 Rohr wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung

(IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und Unterstützung sei gedankt.

Literaturverzeichnis

- 3D Alchemy (Hrsg., 2016) (2016), Materials for 3D Printing, <https://www.3d-alchemy.co.uk/3d-printing-materials.html>, zuletzt aktualisiert am 2016, Zugriff am 09.02.2017.
- 3D Druck.com (Hrsg., 2011) (2011), Übersicht der aktuellen 3D-Druckverfahren, <https://3druck.com/grundkurs-3d-drucker/teil-2-uebersicht-der-aktuellen-3d-druckverfahren-462146/>, Zugriff am 08.02.2017.
- Additively.com (2017).
- Arcam AB (Hrsg., o.J.) o.J., Herstellerseite Arcam AB, <http://www.arcam.com/technology/products/>, Zugriff am 09.02.2017.
- Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P. und Salmi, A. (2010), Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts, in: Rapid Prototyping Journal, 16, 2010, 5, S. 308-317.
- Atzeni, E. und Salmi, A. (2012), Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts, in: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62, 2012, 9-12, S. 1147-1155.
- Baldinger, M. (2016), Supply Chain Management für Additive Manufacturing - Konzepte, Werkzeuge und Prozesse für die Zusammenarbeit mit Dienstleistern zur Reduktion der Risiken beim Einstieg in Additive Manufacturing, Dissertation, EHT Zürich, Zürich 2016.
- Bauer, A. (2013), Druck wird dreidimensional: Mit günstigen 3D-Druckern schnell eigene Prototypen erstellen, in: Der Konstrukteur, 10, 2013, S. 56-57.
- Bauer, J. und Malone, P. (2015), Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing, 2015.
- Baumers, M. (2012), Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption, Dissertation, University of Loughborough, Loughborough 2012.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C. und Hague, R. (2016a), The cost of additive manufacturing – Machine productivity, economies of scale and technology-push, in: Technological Forecasting and Social Change, 102, 2016, S. 193-201.
- Baumers, M., Holweg, M. und Rowley, J. (2016b), The economics of 3D Printing: A total cost perspective – Project Report, in: The enabling role of 3D Printing in redistributed manufacturing: a total cost model, 2016.
- Baumers, M., Leutenecker, B. und Rippel, M. (2011), Realized levels of geometric complexity in additive manufacturing, in: International Journal of Product Development, 13, 2011, 3, S. 222-244.

- Baumers, M., Tuck, C. und Hague, R. (2015), Selective Heat Sintering Versus Laser Sintering: Comparison of Deposition Rate, Process Energy Consumption and Cost Performance, 26, 2015, S. 96-109.
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. und Verl, A. (Hrsg., 2013), Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, Berlin, Heidelberg, 2013.
- Bühning-Polaczek, A., Michaeli, W. und Spur, G. (Hrsg., 2014), Handbuch Urformen, [vollst. überarb. Neuaufl.], München, 2014.
- Coenenberg, A. G. (2003), Kostenrechnung und Kostenanalyse, Stuttgart, 2003.
- ConceptLaser GmbH, Herstellerseite, www.concept-laser.de.
- Cotteleer, M. (2014), 3D opportunity for production – Additive manufacturing makes its (business) case, in: Deloitte Review, 2014, 15.
- DMG MORI (Hrsg., o.J.) o.J., Additive Manufacturing in Fertigteilmqualität – Intelligent kombiniert: Laser-auftragschweißen & Fräsen, <http://de.dmgmori.com/blob/176090/45a692f054ec8ec82e8033409b6d055b/pl1de14-lasertec-65-additive-manufacturing-data.pdf>.
- Dombrowski, U., Malorny, C. und Engel, C. (2014), Erfolgreich im Ersatzteilmanagement durch Anwendung additiver Fertigungsverfahren, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, 109, 2014, 9, S. 621-624.
- Drummer, D., Singer, R. F., Kröner, C., Schmidt, M., Kühnlein, F., Drexler, M., Karg, M. und Scharowsky, T. (2013), Zukunft individuell gestalten: Additive Fertigung im SFM 814 - Grundlagenwissenschaftliche Erforschung pulver- und strahlbasierter additiver Fertigungsverfahren, in: Industrie Management, 29, 2013, 2, S. 33-38.
- Durgun, I. und Ertan, R. (2014), Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost, in: Rapid Prototyping Journal, 20, 2014, 3, S. 228-235.
- Eimer, A. und Schmid, M. o.J., 3D - Drucker - Workshop. Hg. v. Quadrix und 3D Systems, http://quadrix.ch/?file=workshop_3d_printer_anei_online_fassung_1.pdf, Zugriff am 22.03.2016.
- EOS GmbH (Hrsg.,), Datenbank, <http://eos.materialdatacenter.com/eo/>, Zugriff am 05.04.2016.
- EOS GmbH (Hrsg., o.J.) o.J., EOS Metallwerkstoffe für die Additive Fertigung, <https://www.eos.info/werkstoffe-m>, Zugriff am 10.04.2017.
- EOS GmbH (Hrsg.,), Herstellerseite EOS GmbH, <https://www.eos.info/en>.
- Fastermann, P. (2012), 3D-Druck/Rapid Prototyping – Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt, Berlin, Heidelberg, 2012.
- Feldmann, C. und Pumpe, A. (2016), 3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit – Entscheidungsunterstützung für Unternehmen, Wiesbaden, 2016.
- Friedl, G., Hofmann, C. und Pedell, B. (2010), Kostenrechnung, 1. Aufl., München, 2010.

- Fritz, A. H. und Schulze, G. (2015), Fertigungstechnik, 11., neu bearbeitete und ergänzte Auflage, Berlin, Heidelberg, 2015.
- Gebhardt, A. (2013), Generative Fertigungsverfahren – Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping ; Tooling ; Produktion, 1. Aufl., s.l., 2013.
- Gebhardt, A. und Hötter, J.-S. (2016), Additive Manufacturing – 3D printing for prototyping and manufacturing, Munich, Cincinnati, OH, 2016.
- Gibson, I., Rosen, D. W. und Stucker, B. (2010), Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Boston, MA, 2010.
- Gieseke, M., Albrecht, D., Nölke, C., Kaieler, S., Suttman, O. und Overmeyer, L. (2016), Laserbasierte Technologien, in: Lachmayer, Lippert, Fahlbusch (Hrsg., 2016), S. 19-30.
- Grund, M. (2015), Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren – Mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik, Berlin, 2015.
- Häder, M. (2015), Empirische Sozialforschung – Eine Einführung, 3. Aufl., Wiesbaden, 2015.
- Hagl, R. (2015), Das 3D-Druck-Kompodium – Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber, 2. Aufl., Wiesbaden, 2015.
- Hopkinson, N. und Dickens, P. M. (2003), Analysis of rapid manufacturing - using layer manufacturing processes for production, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, S. 31-39, <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/3561>.
- Hopkinson, N., Hague, R. J. M. und Dickens, P. M. (2006), Rapid manufacturing – An industrial revolution for the digital age, Chichester, England, 2006.
- Hördler rapid engineering (Hrsg.,), Herstellerseite Hördler, <http://www.hoerdler.de/3d-drucken/3d-drucken.htm>.
- Ilshner, B. und Singer, R. F. (2016), Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik – Eigenschaften, Vorgänge, Technologien, 6. Aufl. 2016, Berlin, Heidelberg, s.l., 2016.
- Jambor, T. (2012), Funktionalisierung von Bauteiloberflächen durch MikroMikroMikroMikro----LaserauftragschweißenFunktionalisierung von Bauteiloberflächen durch Mikro-Laserauftragschweißen, Dissertation, RWTH, Aachen 2012, <http://publications.rwth-aachen.de/record/229125/files/4769.pdf>, Zugriff am 07.04.2017.
- Jan Urbanec (2016), Prozessaufnahme Cirp. Interview mit Cirp.
- Jedeck, S. (2015), Spare parts on demand using additive manufacturing – A simulation model for cost evaluation 2015.
- Lachmayer, R., Lippert, R. B. und Fahlbusch, T. (Hrsg., 2016), 3D-Druck beleuchtet – Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Berlin, Heidelberg, 2016.

- Langefeld, B. (2014), Marktchancen und Potentiale des Additive Manufacturing. Hg. v. Roland Berger, VDMA, Denkendorf.
- Lindemann, C., Jahnke, U. und Koch, R. (2012), Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing, 2012.
- Lü, L., Fuh, J. Y. H. und Wong, Y. S. (2001), Laser-Induced Materials and Processes for Rapid Prototyping, Boston, MA, s.l., 2001.
- Meindl, M. (2005), Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing, Disseratation, TU München 2005.
- Metal 3D Printing (Hrsg., o.J.) o.J., Herstellerseite, <http://metaltechnics3d.com/3dp-dmls-slm-dmp-laser-cusing-ebm-ebam-lfm-lmd/>, Zugriff am 11.05.2016.
- Pham, D. T. und Gault, R. S. (1998), A comparison of rapid prototyping technologies, in: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38, 1998, S. 1247-1287.
- Polzin, H. (2014), Rapid Prototyping mit Formstoffen, in: Bühring-Polaczek, Michaeli, Spur (Hrsg., 2014). Rapidobject GmbH (Hrsg., 2015) (2015), 3D Druckverfahren -im Überblick, https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren_1173.html?sid=Yx4LxDCIMvJI9leDYpFEf1X083TygXzT, Zugriff am 09.02.2017.
- Rickenbacher, L., Spierings, A. und Wegener, K. (2013), An integrated cost-model for selective laser melting (SLM), in: Rapid Prototyping Journal, 19, 2013, 3, S. 208-214.
- Ruffo, M. und Hague, R. (2007), Cost estimation for rapid manufacturing — simultaneous production of mixed components using laser sintering, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221, 2007, 11, S. 1585-1591.
- Ruffo, M., Tuck, C. und Hague, R. (2006), Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220, 2006, 9, S. 1417-1427.
- Schmid, M. (2015), Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS) – Prozess- und Werkstoffüberblick, 1. Aufl. 2015, Wiesbaden, 2015.
- Schmid, M. und Levy, G. (2012), Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS, 2012.
- Schröder, M., Falk, B. und Schmitt, R. (2015), Evaluation of Cost Structures of Additive Manufacturing Processes Using a New Business Model, in: 7th Industrial Product-Service Systems Conference - PSS, industry transformation for sustainability and business, 2015, 30, S. 311-316.
- Simkin, Z. und Wang, A. (2014), Cost-Benefit Analyses for Final Production Parts, in: Wohlers Report, 2014.
- Stratasys Ltd. (Hrsg., 2017) (2017), FDM Thermoplastics, <http://www.stratasys.com/materials/material-safety-data-sheets/fdm/model-materials>, zuletzt aktualisiert am 2017.

- Thomas, D. S. und Gilbert, S. W. (2014), Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing, 2014.
- vividesign 3D (Hrsg., 2016) (2016), Herstellerseite, <https://vividesign.de/>, zuletzt aktualisiert am 2016, Zugriff am 18.05.2016.
- Voss, C., Tsiriktsis, N. und Frohlich, M. (2002), Case research in operations management, in: International Journal of Operations & Production Management, 22, 2002, 2, S. 195-219.
- Westkämper, E. und Decker, M. (2006), Einführung in die Organisation der Produktion, Berlin, Heidelberg, 2006.
- Wöhe, G. und Döring, U. (2010), Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 24., überarb. und aktualisierte Aufl., München, 2010.
- Yin, R. K. (2014), Case study research – Design and methods, 5th edition, London, 2014.
- Zäh, M. F. (2006), Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren, München, 2006.
- Zäh, M. F. (2009), 3D-Drucken: Eine Zukunftstechnologie?, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, 104, 2009, 7-8, S. 637-641.

Internetquellen:

- cirp GmbH (Hrsg.) (2017a): Profil der cirp GmbH. Online abrufbar unter: <https://www.cirp.de/comp/comp.php5>, abgerufen am 25.04.2016.
- cirp GmbH (Hrsg.) (2017b): Dienstleistungen der cirp. Online abrufbar unter: <https://www.cirp.de/dienstleistung/prototypen.php5>, abgerufen am 25.04.2016.
- Daimler AG (Hrsg.) (2017): Daimler im Überblick. Online abrufbar unter <https://www.daimler.com/konzern/ueberblick.html>, abgerufen am: 24.04.2017.
- Hansgrohe SE (Hrsg.): Die Hansgrohe Gruppe – auf allen Kontinenten präsent. Online abrufbar unter: <http://www.hansgrohe.com/de/3132.htm>, abgerufen am: 24.04.2017.
- REHM GmbH u. Co. KG (Hrsg.) (2017a): Unternehmen. Online abrufbar unter <https://www.rehm-online.de/de/unternehmen/unternehmen.html>, abgerufen am: 24.04.2017.
- REHM GmbH u. Co. KG (Hrsg.) (2017b): Karriere. Online abrufbar unter <https://www.rehm-online.de/de/karriere/karriere.html>, abgerufen am: 24.04.2017.
- Webasto SE (Hrsg.) (2017a): Webasto International. Online abrufbar unter: <https://www.webasto.com/de/ueber-webasto/webasto-im-profil/webasto-international/>, abgerufen am: 24.04.2017.
- Webasto SE (Hrsg.) (2017b): Unternehmensporträt. Online abrufbar unter: <https://www.webasto-group.com/de/webasto-gruppe/unternehmensinformationen/unternehmensportraet/>, abgerufen am: 24.04.2017.
- Webasto SE (Hrsg.) (2017c): Unternehmensstruktur der Webasto SE. Online abrufbar unter: <https://www.webasto-group.com/de/webasto-gruppe/unternehmensinformationen/konzernstruktur/>, abgerufen am: 24.04.2017.