

DISS. ETH Nr. 23272

**SUPPLY CHAIN MANAGEMENT FÜR ADDITIVE MANUFACTURING**  
-  
**KONZEPTE, WERKZEUGE UND PROZESSE FÜR DIE ZUSAMMENARBEIT  
MIT DIENSTLEISTERN ZUR REDUKTION DER RISIKEN BEIM EINSTIEG IN  
ADDITIVE MANUFACTURING**

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN  
der ETH ZÜRICH  
(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von  
Matthias Baldinger  
M sc Universität Basel

geboren am  
16.11.1984

von  
Rekingen AG, Schweiz

angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. Paul Schönsleben, Referent  
Prof. Dr. Mirko Meboldt, Korreferent

2016



## Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am BWI, Betriebswissenschaftlichen Zentrum, der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Diese Arbeit wurde nur möglich, da mich viele Menschen mit Rat und Tat unterstützt haben. Dafür bin ich zutiefst dankbar.

Prof. Dr. Paul Schönsleben, Leiter des BWI der ETH Zürich, danke ich für die ausserordentlich grosse fachliche und menschliche Unterstützung in den drei Jahren, den mir gewährten inhaltlichen Freiraum und das in mich gesetzte Vertrauen. Für die Übernahme des Korreferats und die anregende Zusammenarbeit möchte ich mich bei Prof. Dr. Mirko Meboldt, Leiter des Bereichs Produktentwicklung und Konstruktion am Institut für Design, Materialien und Fabrikation der ETH Zürich, bedanken. Ein grosses Dankeschön gebührt darüber hinaus Prof. Markus Bärtschi für all die fachliche und sonstige Unterstützung.

Dank gebührt weiter meinen Ko-Autoren der hier behandelten Publikationen, welche durch ihre Ratschläge und Anregungen einen massgeblichen Anteil an dieser Doktorarbeit haben. Prof. Dr. Gideon Levy danke ich für die tiefen Einblicke in die Welt des Additive Manufacturing und die vielen Ideen, die mich in meiner Arbeit weitergebracht haben. Weiter danke ich Aldo Duchi, Bastian Leutenecker, Dr. Manuel Rippel und Dr. Matthias Wandfluh für ihre Beiträge. Darüber hinaus möchte ich mich für die wertvollen Diskussionen zum Thema Additive Manufacturing bei Filippo Fontana, Dr. Christoph Klahn, Adriaan Spierings und Dr. Manfred Schmid bedanken.

Ganz besonders bedanke ich mich bei Fabian Rahm, dem Mitgründer des ETH Spin-offs Additively AG, für die erfolgreiche und interessante Zusammenarbeit. Unser Startup-Unternehmen hat nicht nur wesentlich zur Erarbeitung der Ergebnisse dieser Dissertation beigetragen, sondern macht diese auch für die Industrie zugänglich. Des Weiteren gilt mein Dank Tamara Trüb, die Additively ein ansprechendes User Interface verliehen und somit zur intensiven Nutzung beigetragen hat.

Dann danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BWI, neben der erwähnten fachlichen Unterstützung auch für die sehr angenehme Zusammenarbeit, die gemeinsamen Erlebnisse und das Vertrauen.

Ich danke meinen Eltern Ursula und Robert für die bedingungslose Unterstützung, die mir die notwendige Sicherheit gab. Zum Schluss danke ich von ganzem Herzen meiner Freundin Julia, die sich all meine Ideen der letzten Jahre geduldig angehört hat und mir, auch bei Zweifel, helfend zur Seite stand.

Zürich, im Februar 2016

Matthias Baldinger

## Zusammenfassung

Additive Manufacturing (AM) steht für eine Reihe von Technologien, die Bauteile Schicht um Schicht direkt von digitalen 3D-Modellen aufbauen. Diese Technologien haben sich im letzten Jahrzehnt von der Prototypenherstellung, was als Rapid Prototyping bezeichnet wird, zum Produktionsverfahren, Rapid Manufacturing genannt, entwickelt. Aufgrund einer anderen Kostenstruktur verdrängt AM die traditionelle Produktion nicht, sondern ergänzt sie. Die heutigen Produktionsverfahren eignen sich für grosse Stückzahlen gleicher Bauteile mit geringer Komplexität und AM für kleine Stückzahlen unterschiedlicher Bauteile mit hoher Komplexität.

Während der letzten Jahre ist die Nutzung von AM stetig angestiegen. Wegen der hohen Risiken bei einer Investition in eigene AM-Maschinen greifen viele Firmen zunehmend auf externe Dienstleister zurück, welche Bauteile im Auftrag produzieren. Aufgrund der Unterschiede von AM zur traditionellen Fertigung braucht es jedoch neue Konzepte, Werkzeuge und Prozesse, um die Zusammenarbeit mit Dienstleistern effizient zu gestalten. In Gesprächen mit der Industrie wurde dieser Bedarf bestätigt.

Der Fokus der Forschung rund um AM lag bis anhin auf der Technologieentwicklung, um Serientauglichkeit zu erreichen. Supply-Chain-Themen wurden bisher nicht ausreichend bearbeitet und oben stehende Konzepte, Werkzeuge und Prozesse fehlen. Die vorliegende Dissertation adressiert diese Lücke rund um Supply-Chain-Management für AM. Hierbei wurden Ergebnisse zu den folgenden drei Themen erarbeitet:

1. Kosten von AM im Buy-Szenario: Um erfolgreiche Rapid-Manufacturing-Anwendungen zu realisieren, muss die Entscheidung, AM für ein Bauteil einzusetzen, früh im Produktentwicklungsprozess getroffen werden. Hierzu müssen erwartete Produktionskosten abgeschätzt werden können. Da viele Firmen Bauteile bei Dienstleistern fertigen lassen, wurden für diesen Zweck geeignete Werkzeuge entwickelt.
2. Supply-Chain-Design für AM: Welche AM-spezifischen Punkte müssen bei der Gestaltung der AM-Supply-Chain beachtet werden? Hierbei wurden die Kosten und Risiken bei der Make-or-Buy-Entscheidung, die Lieferantenauswahl und die Einkaufsprozesse beleuchtet.
3. Herausforderungen beim Einstieg: Um erfolgreich in AM einzusteigen, müssen die Möglichkeiten und Herausforderungen der Technologien über verschiedene Unternehmensbereiche hinweg diskutiert werden. Ein entsprechendes Konzept als Diskussionsgrundlage für verschiedene Unternehmensbereiche fehlte bis anhin.

Mit den entwickelten Konzepten, Werkzeugen und Prozessen können Firmen effizienter mit Dienstleistern zusammenarbeiten und die Technologien im Buy-Szenario einfacher nutzen. Auf diese Weise kann das Risiko beim Einstieg in AM durch die Vermeidung hoher Investitionen erheblich reduziert werden. Übergeordnetes Ziel ist die erfolgreiche Nutzung von AM durch Firmen und damit die Stärkung deren längerfristigen Wettbewerbsfähigkeit.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden mithilfe von qualitativen und quantitativen Methoden erarbeitet. Der quantitative Teil besteht aus einem Preis-Benchmark des Dienstleistermarktes und einer Kostenanalyse zur Entwicklung von Schätzmodellen. Der qualitative Teil basiert auf zehn Interviews und den Resultaten der Aktionsforschung im Rahmen des Forschungsprojekts „Additively – Procurement tools for 3D printing“. Die Kombination der Methoden ermöglichte die Erarbeitung praxisnaher Lösungen.

Diese Arbeit ist als kumulative Dissertation verfasst und besteht aus zwei Teilen. Teil I motiviert das Thema, identifiziert die Forschungslücke, erläutert das methodische Vorgehen und fasst die Ergebnisse zusammen. Teil II besteht aus dem Nachdruck der zehn Publikationen, auf denen diese Arbeit basiert.

---

## Abstract

Additive manufacturing (AM) stands for several technologies that create parts layer-by-layer directly from digital 3D files. During the last decade, the technologies have developed from rapid prototyping to rapid manufacturing, whereby they are used for the production of final parts. Due to a different cost structure, AM is not substituting but complementing traditional manufacturing. Traditional manufacturing is suitable for large quantities of simple standard parts, whereas AM is suitable for small quantities of complex parts.

During the last years, usage of AM has increased. Due to high risks when investing in own AM machines, many companies use external service providers that produce parts on demand. However, by reason of the differences between AM and traditional manufacturing, new concepts, tools and processes are required for the efficient collaboration with service providers. Discussions with industry representatives have confirmed this need.

AM research has focused on the development of the technologies to reach readiness for series production. Supply chain topics have not been dealt with sufficiently and above mentioned concepts, tools and processes are missing. This dissertation addresses this gap around supply chain management for AM. Results in the following three fields have been developed:

1. Cost of AM in a buy scenario: To realize successful rapid manufacturing applications, the decision to use AM for a part needs to be taken early in the product development process. In order to take this decision, production cost needs to be estimated. As many companies buy parts at service providers, tools for this purpose have been developed.
2. Supply chain design for AM: Which AM-specific points need to be taken into consideration when designing the supply chain for AM? Hereby, the costs and risks evaluation during the make-or-buy decision, the selection of suppliers and the procurement processes have been analyzed.
3. Challenges when adopting AM: In order to successfully adopt AM, the opportunities and challenges of the technologies need to be discussed across multiple company functions. A concept as basis for discussion across different company functions has been missing as yet.

With the developed concepts, tools and processes companies can work more efficiently with service providers. This simplifies the usage of AM technologies in a buy scenario. By avoiding high investments, the risk of adopting AM can be substantially lowered. Main goal is the successful usage of the technologies through companies and thereby the strengthening of their long-term competitive position.

The results of this work have been developed with qualitative and quantitative methods. The quantitative part consists of a price benchmark of the service provider market and a cost analysis to develop estimation tools. The qualitative part is based on ten interviews and the results of the action research of the project “Additively – Procurement tools for 3D printing”. The combination of methods allowed the development of practical results supporting companies to use AM.

This work is a cumulative dissertation and consists of two parts. Part I motivates the topic, identifies the research gap, explains the methodology and summarizes the results. Part II comprises the ten research papers on which this dissertation is based.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Tabellen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>X</b>
<b>Teil I: Bericht</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1 Problemstellung und Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung .....	5
1.3 Struktur der Arbeit .....	5
1.4 Veröffentlichungen .....	6
<b>2 Hintergrund</b> .....	<b>9</b>
2.1 Grundlagen.....	9
2.1.1 Additive Manufacturing .....	9
2.1.2 Begrifflichkeit .....	10
2.1.3 Technologien.....	10
2.1.4 Anwendungen .....	19
2.1.5 Additive-Manufacturing-Dienstleister .....	20
2.1.6 Wichtige Begriffe und Konzepte.....	20
2.2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf .....	22
2.2.1 Kosten von Additive Manufacturing .....	23
2.2.2 Supply-Chain-Design für Additive Manufacturing.....	25
2.2.3 Einstieg in Additive Manufacturing .....	27
<b>3 Forschungsfragen</b> .....	<b>28</b>
<b>4 Forschungsdesign</b> .....	<b>29</b>
4.1 Benchmark .....	29
4.1.1 Grundlagen.....	29
4.1.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit.....	29
4.2 Kostenanalyse .....	30
4.2.1 Grundlagen.....	30
4.2.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit.....	31
4.3 Fallstudienforschung .....	31

4.3.1 Grundlagen.....	31
4.3.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit.....	32
4.4 Aktionsforschung.....	32
4.4.1 Grundlagen.....	32
4.4.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit.....	33
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>34</b>
5.1 Zuordnung der Publikationen zu den Forschungsfragen .....	34
5.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1 .....	35
5.2.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1a: Welche Geschäfts- und Preismodelle existieren auf dem AM-Dienstleistermarkt? .....	35
5.2.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1b: Wie können Kosten von AM-Bauteilen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess abgeschätzt werden, wenn diese bei Dienstleistern gefertigt werden (Buy-Szenario)?.....	41
5.3 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2 .....	44
5.3.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2a: Make-or-Buy: Wie sehen Make- und Buy-Szenario in Bezug auf Kosten und Risiken aus?.....	44
5.3.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2b: Was gilt es bei der Auswahl der AM-Dienstleister zu beachten?.....	47
5.3.3 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2c: Wie müssen Einkaufsprozesse für die Zusammenarbeit mit AM-Dienstleistern ausgestaltet werden?.....	47
5.4 Ergebnisse zur Forschungsfrage 3 .....	52
5.4.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 3a: Welche Leitfragen unterstützen die unternehmensweite Diskussion über Möglichkeiten und Herausforderungen von Additive Manufacturing? .....	52
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>57</b>
6.1 Beitrag zur Theorie .....	57
6.2 Praktische Relevanz und Anwendung in der Industrie .....	58
6.3 Einschränkungen und Ausblick .....	58
<b>7 Literatur .....</b>	<b>60</b>
<b>Teil II: Nachdruck der Publikationen .....</b>	<b>66</b>

## Abbildungen

Abbildung 1: Gartner Hype Cycle (Gartner, 2015)	2
Abbildung 2: Einspritzdüse der neuen LEAP-Turbine von GE (GE Reports, 2014)	3
Abbildung 3: Vergleich der Kostenstruktur von AM zu traditionellen Verfahren	4
Abbildung 4: Laser Sintering (Additively, 2015)	11
Abbildung 5: Laser Melting (Additively, 2015)	12
Abbildung 6: Fused Deposition Modeling (Additively, 2015)	13
Abbildung 7: Binder Jetting (Additively, 2015)	14
Abbildung 8: Stereolithography (Additively, 2015)	15
Abbildung 9: Photopolymer Jetting (Additively, 2015)	16
Abbildung 10: Material Jetting (Additively, 2015)	17
Abbildung 11: Electron Beam Melting (EBM)	18
Abbildung 12: Referenzteile für den Preis-Benchmark (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)	30
Abbildung 13: Angebotener Preis pro cm <sup>3</sup> bei Stückzahl 1 in EUR	37
Abbildung 14: Angebotener Preis pro cm <sup>3</sup> bei Stückzahl 100 in EUR	38
Abbildung 15: EUR pro cm <sup>3</sup> für PA12 für verschiedene totale Volumen-Klassen	39
Abbildung 16: EUR pro cm <sup>3</sup> für Aluminium	39
Abbildung 17: EUR pro cm <sup>3</sup> für Edelstahl	39
Abbildung 18: Plot von Preis pro cm <sup>3</sup> bei Stückzahl 1 gegen Preis pro cm <sup>3</sup> bei Stückzahl 100 in EUR	40
Abbildung 19: Vereinfachte Darstellung des heutigen Einkaufsprozesses für firmenspezifische Bauteile (Baldinger, 2015, Publikation 10)	49
Abbildung 20: Abgewandelter Einkaufsprozess für AM (Baldinger, 2015, Publikation 10)	50
Abbildung 21: Setup des AM-spezifischen E-Procurement-Systems Additively (Baldinger 2015, Publikation 10)	51
Abbildung 22: AM-Anwendungsfelder nach Mehrwert (von Präsentation am Professional 3D Printing Forum der technischen Rundschau, Windisch, Schweiz, 20.10.2015)	53
Abbildung 23: Übersicht über wichtige AM-Technologien (Baldinger et al., 2015, Publikation 7)	55
Abbildung 24: Potential und Schwierigkeit der Umsetzung der AM-Anwendungsfelder (Baldinger 2015, Publikation 9)	56

## Tabellen

Tabelle 1:	Aufbau der Doktorarbeit	6
Tabelle 2:	Erklärung der Wertung der Publikationen	6
Tabelle 3:	Publikationen als Erstautor	7
Tabelle 4:	Präsentationen vor einem wissenschaftlichen oder gewerblichen Publikum	8
Tabelle 5:	Publikationen von Kostenmodellen für Additive Manufacturing	25
Tabelle 6:	Publikationen rund um das Supply-Chain-Design für Additive Manufacturing	26
Tabelle 7:	Verwendete Forschungsdesigns	29
Tabelle 8:	Geografische Verteilung und Rückmeldungen der Laser-Sinter-Dienstleister (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)	30
Tabelle 9:	Übersicht über die Charakteristika der durchgeführten Fallstudien	32
Tabelle 10:	Publikationen und Zuordnung zu den Forschungsfragen	34
Tabelle 11:	Kostentreiber unter Kontrolle einer Firma	36
Tabelle 12:	Prozentsatz der Dienstleister, bei denen der jeweilige Preistreiber Anwendung findet (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)	36
Tabelle 13:	Regression von potentiellen Preistreibern auf Preis pro cm <sup>3</sup> (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)	36
Tabelle 14:	Durchschnitt von Preis pro cm <sup>3</sup> bei Stückzahl 1 bzw. 100, Schichtdicke und Lieferfrist von Bestellungserfüllern und Konsolidierern	41
Tabelle 15:	Kostenmatrize Laser Sintering PA12 (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	42
Tabelle 16:	Kostenmatrize Laser Melting Edelstahl (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	42
Tabelle 17:	Kostenmatrize Laser Melting Aluminium (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	42
Tabelle 18:	Regression mit nur signifikanten Variablen (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	43
Tabelle 19:	Kostenvergleich Benchmark mit Schätzmodellen (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	44
Tabelle 20:	Kostenvergleich mit bestehenden Studien (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)	45

## Abkürzungen

AM	Additive Manufacturing
BJ	Binder Jetting
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
CAD	Computer-Aided Design
CHF	Schweizer Franken
EBM	Electron Beam Melting
ERP	Enterprise-Resource-Planning
EUR	Euro
FDM	Fused Deposition Modeling
LM	Laser Melting
LS	Laser Sintering
MJ	Material Jetting
PJ	Photopolymer Jetting
SL	Stereolithography
USD	US-Dollar

## **Teil I: Bericht**

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Motivation

Additive Manufacturing (AM) steht für verschiedene Technologien, welche Bauteile Schicht um Schicht direkt von digitalen 3D-Modellen aufbauen. In den vergangenen zwei Jahren waren die Technologien unter dem Schlagwort 3D-Druck ein regelrechter Medienhype. *The Economist*, ein renommiertes Wirtschaftsmagazin, spricht bereits von der nächsten industriellen Revolution (The Economist, 2012). Um zu verstehen, was dabei heute schon Realität ist und wo die Erwartungen, die in den Medien geschürt werden, noch nicht erfüllt werden können, lohnt sich ein Blick auf den Gartner Hype Cycle in Abbildung 1 (Gartner, 2015). Dieser unterscheidet zwischen den drei Bereichen „Enterprise 3D Printing“, „Consumer 3D Printing“ und „3D Bioprinting“. Der grosse Medienhype geht vom „Consumer 3D Printing“ aus, also den 3D-Druckern für einige hundert oder tausend CHF für zu Hause. Diese sind auf dem Gipfel der Erwartungen, welche kaum vollständig realisiert werden können. Zudem dauert es noch 5–10 Jahre, bis Heim-3D-Druck sich breiter durchsetzt. Das „3D Bioprinting“ befindet sich grösstenteils noch im Forschungsstadium und benötigt einen ähnlich langen Zeitraum bis zu ersten relevanten Anwendungen. Anders sieht es beim „Enterprise 3D Printing“ aus, das in dieser Dissertation unter Additive Manufacturing verstanden wird. Hierbei handelt es sich nicht um Geräte, die etwas mit unseren Tintenstrahl-Druckern zu Hause zu tun haben, sondern um Werkzeugmaschinen, die bis über eine Million CHF kosten. Laut Gartner werden hier die Erwartungen jetzt Realität und die Technologien erreichen ihre Reife.

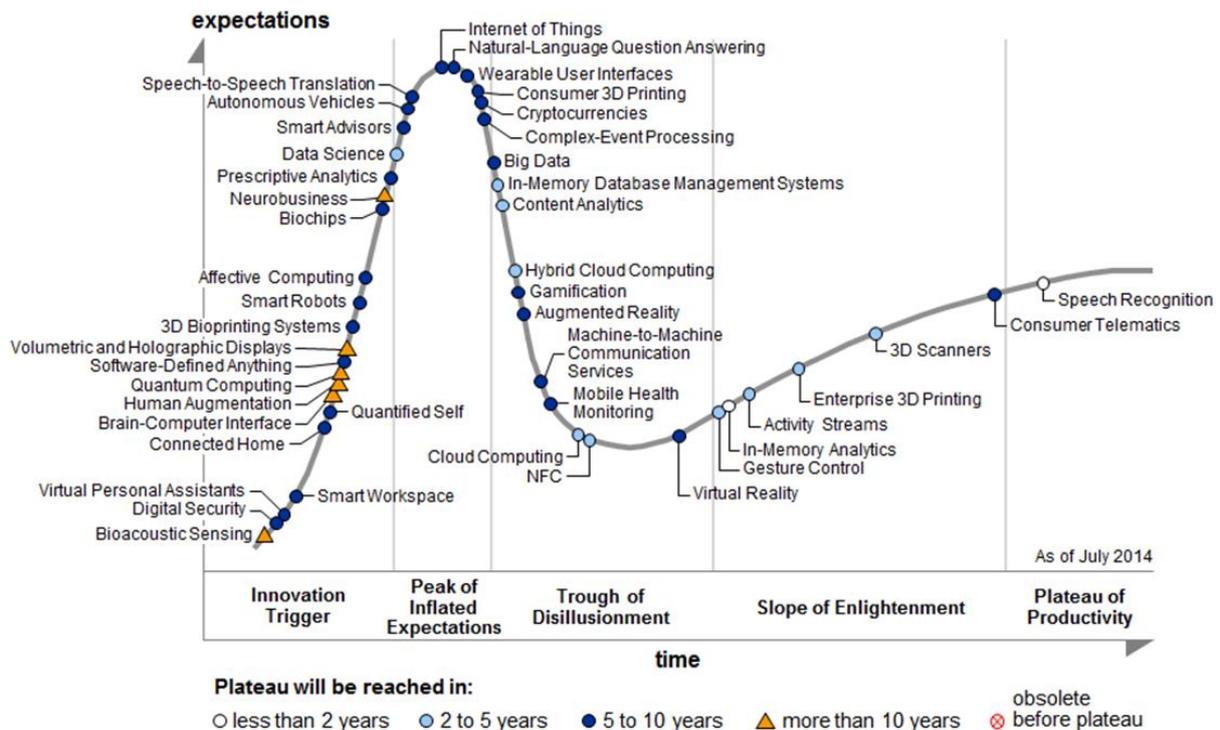


Abbildung 1: Gartner Hype Cycle (Gartner, 2015)

Die ersten AM-Technologien wurden vor bald 30 Jahren für die Herstellung von Prototypen, was als Rapid Prototyping bezeichnet wird, entwickelt. Seit gut einem Jahrzehnt werden sie vermehrt für die direkte Produktion von Serienbauteilen eingesetzt, was als Rapid Manufacturing benannt wird (Levy et al., 2003). Hierbei haben sie sich zu ernstzunehmenden Produktionstechnologien entwickelt. Ein Beispiel hierfür liefert die Einspritzdüse für die neue LEAP-Triebwerksgeneration von GE Aviation in Abbildung 2 (GE Reports, 2014). Seit 2015 werden diese Einspritzdüsen mittels der AM-Technologie Laser Melting aus einer Kobalt-Chrom-Legierung serienmässig produziert. Die Produktion mittels Laser Melting bringt die folgenden Vorteile:

- Die neue Düse wird als ein einziges Bauteil gefertigt. Das Vorgängermodell bestand aus 20 Komponenten, welche einzeln gefertigt und montiert werden mussten.
- Die neue Düse ist durch den einteiligen Aufbau 5-mal verschleissfester als ihr Vorgänger.
- Die neue Düse ist 33 % leichter.
- Der Verbrauch kann durch die optimierte Geometrie reduziert werden.



Abbildung 2: Einspritzdüse der neuen LEAP-Turbine von GE (GE Reports, 2014)

Das Potential von AM basiert auf zwei grundlegenden Unterschieden in der Kostenstruktur zu den traditionellen Verfahren (z.B. Spritzguss) (siehe Abbildung 3). Einerseits führt die Komplexität von Bauteilen zu keinen Zusatzkosten und ist generell weniger limitiert („Complexity for free“). Dies ist vergleichbar mit einem Tintenstrahl-Drucker zu Hause, bei welchem es auch keine Rolle spielt, ob ein grosses blaues Quadrat oder ein komplexes Gemälde gedruckt wird. Andererseits kennt AM keine Skaleneffekte, das heisst, es werden keine grossen Stückzahlen zur Realisierung tiefer Stückkosten benötigt („No economies of scale“). Ob zehn, eintausend oder zehntausend Teile produziert werden, hat keinen Einfluss auf die Kosten pro Stück.

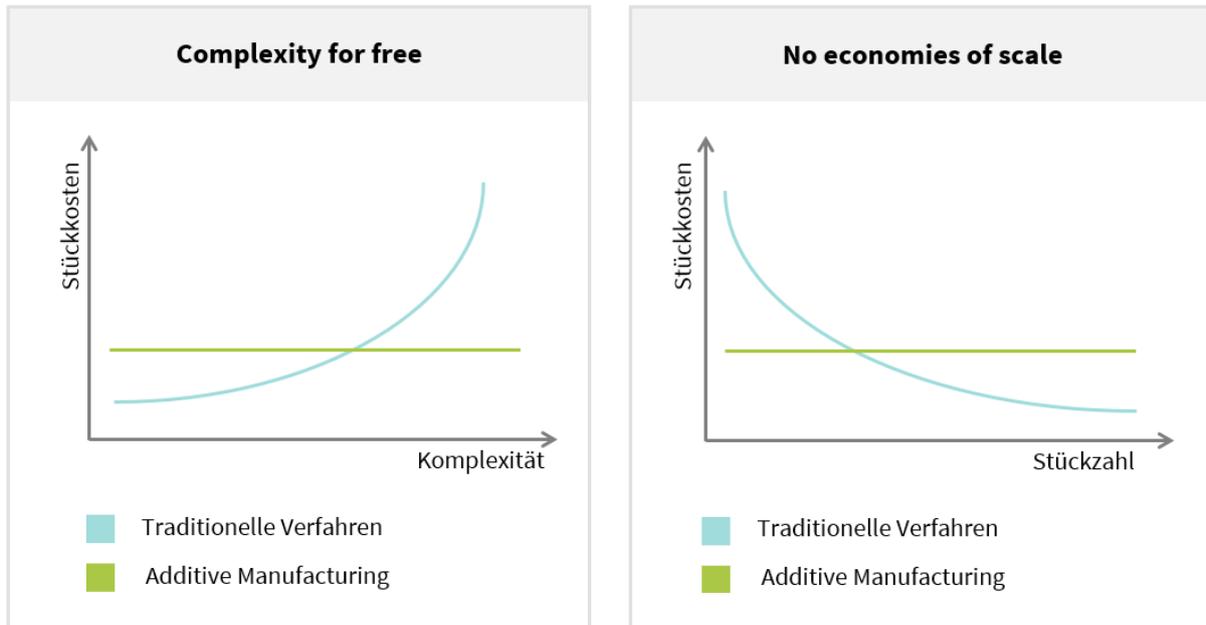


Abbildung 3: Vergleich der Kostenstruktur von AM zu traditionellen Verfahren

Diese Unterschiede ergeben neue Möglichkeiten im Produktdesign und im Supply-Chain-Setup. Dank „Complexity for free“ müssen nicht möglichst einfache Bauteile konstruiert werden, sondern diese können die optimale Gestalt zur Erfüllung ihrer Funktion annehmen. Dies ist beispielsweise im Leichtbau, für Performance-optimierte Bauteile oder zur Funktionsintegration interessant. Aufgrund fehlender Skaleneffekte verspricht AM dezentrale Produktion auf Abruf von kundenindividuellen Bauteilen in Stückzahl 1. Aufgrund dieser Unterschiede stehen AM und die traditionelle Fertigung nicht in Konkurrenz zueinander, sondern ergänzen sich gegenseitig. Die traditionelle Supply Chain eignet sich für grosse Stückzahlen gleicher Bauteile mit geringer Komplexität und die AM-Supply-Chain für kleine Stückzahlen unterschiedlicher Bauteile mit hoher Komplexität.

Der Fokus der AM-Forschung lag bis anhin auf der Technologieentwicklung, um Serientauglichkeit zu erreichen, und auf der Entwicklung neuer Konstruktionsansätze, um die neuen Möglichkeiten im Produktdesign zu nutzen. Letzteres Themenfeld wird als „Design for Rapid Manufacturing“ (Hague et al., 2004) oder „Design for Additive Manufacturing“ (Gibson et al., 2010) bezeichnet und seit einigen Jahren intensiv erforscht. Daneben wurden einige langfristige Visionen zu den neuen Möglichkeiten im Supply-Chain-Setup entwickelt (z. B. Tuck et al., 2007).

Dank der Forschung konnten AM für gewisse Anwendungen zur Serientauglichkeit entwickelt und erste innovative Produktdesigns realisiert werden (vergleiche beispielsweise die GE-Einspritzdüse in Abbildung 2). Der gesamte AM-Markt ist auf einen Wert von 4,06 Milliarden CHF im Jahr 2014 angewachsen (Wohlers, 2015, USD CHF 0,99). Viele Firmen nutzen die Technologien immer intensiver und weitere Firmen werden in den kommenden Jahren einsteigen. Smithers Pira (2015) schätzt den AM-Markt für das Jahr 2025 auf 49 Milliarden CHF (USD CHF 0,99). Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 23.7%, was unter dem Wachstum der letzten Jahre liegt und durchaus plausibel erscheint. Da die Produktion nur einen Teil des generierten Werts ausmacht, schätzt McKinsey die Wertschöpfung basierend auf AM bis ins gleiche Jahr auf 228–545 Milliarden CHF (Manyika et al., 2013, USD CHF 0,99). Die meisten dieser Firmen greifen heute auf AM-Dienstleister zurück, welche für sie Bauteile im Auftrag produzieren. Dieser Markt ist während der letzten Jahre entstanden und soll laut Cohen (2014) in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung gewinnen.

Aufgrund der Unterschiede von AM zu den traditionellen Verfahren brauchen Firmen neue Konzepte, Werkzeuge und Prozesse, um mit diesen Dienstleistern zusammenzuarbeiten. In diesem Umfeld wurde bisher allerdings nur wenig Forschung betrieben, wie eine gross angelegte Studie zur globalen Forschung rund um AM zeigte (Gausemeier et al., 2013). Die wenige existierende Literatur fokussiert zudem auf langfristige Supply-Chain-Visionen, welche erst in mehreren Jahrzehnten Realität werden. Diese Lücke wird in vorliegender Dissertation adressiert. Hierzu werden Konzepte, Werkzeuge und Prozesse entwickelt, welche Firmen eine effiziente Zusammenarbeit mit AM- Dienstleistern ermöglichen.

## **1.2 Zielsetzung**

Die Nutzung von AM ist durch den Sprung vom Prototyping zur Produktion in den letzten Jahren stark gestiegen und wird in der nahen Zukunft weiter steigen. Die AM-Supply-Chain ergänzt hierbei die traditionelle Supply Chain, braucht allerdings zu deren erfolgreichen Management neue Konzepte, Werkzeuge und Prozesse. Diese sollen in vorliegender Dissertation erarbeitet werden.

Diese Arbeit fokussiert aufgrund der Aktualität der Thematik auf Lösungen, die Firmen heute bei der Nutzung von AM unterstützen. Hierbei werden heute gültige Antworten auf Fragen zum Supply-Chain-Design (Make-or-Buy, Lieferantenwahl und Zusammenarbeit mit den Lieferanten), zu Kosten von AM im Buy-Szenario und zum Vorgehen beim Einstieg in die Technologien erarbeitet.

## **1.3 Struktur der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit wurde als kumulative Dissertation verfasst. Entsprechend den „Detailbestimmungen D-MTEC zum Doktoratsstudium“ setzt sich eine kumulative Dissertation aus mindestens drei wissenschaftlichen Aufsätzen, welchen eine Einleitung vorangestellt ist, zusammen. Diese Dissertation besteht aus zwei Teilen. Teil I stellt die Einleitung in Form eines Berichts dar, der aus sechs Kapiteln besteht. Teil II beinhaltet den Nachdruck der zehn im Rahmen dieser Dissertation verfassten Publikationen (eine A-Publikation, drei B-Publikationen, vier C-Publikationen und zwei D-Publikationen). Da die einleitenden Kapitel zum Teil zur Zusammenfassung der Ergebnisse der Publikationen dienen, können einzelne Abschnitte innerhalb der Kapitel wortwörtliche oder übersetzte Textstellen aus den Publikationen der Dissertation enthalten (angelehnt an Willner, 2015). Eine ausführliche Darstellung des Aufbaus der vorliegenden Doktorarbeit ist in Tabelle 1 ersichtlich.

<b>Teil I</b>	<b>Bericht</b>
Kapitel 1	Einleitung: Erläutert die Motivation der Arbeit und verschafft einen Überblick über deren Aufbau
Kapitel 2	Hintergrund: Beleuchtet den Stand der Forschung und identifiziert den Forschungsbedarf
Kapitel 3	Forschungsfragen: Stellt die Forschungsfragen dieser Dissertation vor
Kapitel 4	Forschungsdesign: Erklärt die gewählte Forschungsstrategie
Kapitel 5	Ergebnisse: Weist die einzelnen Publikationen den Forschungsfragen zu und erläutert die Ergebnisse zu den Fragen
Kapitel 6	Zusammenfassung und Ausblick: Fasst die Kernergebnisse dieser Dissertation zusammen und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf
<b>Teil II</b>	<b>Nachdruck der Publikationen</b>

*Tabelle 1: Aufbau der Doktorarbeit*

## 1.4 Veröffentlichungen

Gemäss den Vorgaben des BWIs (Betriebswissenschaftliches Zentrum) sollte eine Doktorarbeit sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie einen Beitrag leisten. Hierzu werden die Publikationen gemäss den Kriterien in Tabelle 2 beurteilt. Tabelle 3 und Tabelle 4 stellen einen Überblick über die Publikationen und Präsentationen des Autors dar.

Wertung	Erklärung
A	Publikation in einem Journal, welches im Journal Citation Report (JCR) erscheint und einen Impact Factor > 0.4 hat. Publikationen im JCR verwenden in der Regel ein doppelblindes Peer-Review-Verfahren für die Zulassung von Artikeln.
B	Publikation in einem Journal oder auf einer Konferenz mit strengen wissenschaftlichen Standards bezüglich des Auswahlverfahrens der Beiträge. Dazu gehört mindestens ein Review-Verfahren, in welchem der gesamte Artikel begutachtet wird.
C	Publikation in einem Journal oder auf einer Konferenz mit einem gewissen Anspruch und mit Wissenschaftlern oder einer technologieorientierten Berufsgruppe als Zielgruppe.
D	Publikation in einem Journal oder einer Zeitung, welches bzw. welche sich an allgemeine Berufsgruppen richtet. Das Journal oder die Zeitung muss in seinem bzw. ihrem Fachgebiet über ein hohes Ansehen verfügen, um eine erfolgreiche Dissemination zu ermöglichen.

*Tabelle 2: Erklärung der Wertung der Publikationen (angelehnt an Verhasselt, 2012)*

#	Zitation	Wertung
1.	Baldinger, M.; Levy, G.; Schönsleben, P. und Wandfluh, M. (2015), „Additive Manufacturing Cost Estimation for Buy Scenarios“, <i>Rapid Prototyping Journal</i> (zur Publikation angenommen).	A
2.	Baldinger, M. und Duchi, A. (2013), „Price benchmark of laser sintering service providers“, in da Silva Bartolo, P. J. et al. (Eds.), <i>High Value Manufacturing: Advance Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping</i> , Leiria, Portugal, 1–5 Oktober 2013, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 37–42.	B (Konferenz)
3.	Baldinger, M. (2015), „Ansätze zum Management der Additive Manufacturing Supply Chain“, <i>RTeJournal – Fachforum für Rapid Technologie</i> , Vol. 2015. Präsentiert an der RapidTech, Erfurt, Deutschland, 10–11 Juni 2015.	B (Konferenz)
4.	Baldinger, M. (2014), „Digitales Ersatzteilmanagement mittels 3D-Druck“, <i>Instandhaltung im Wandel: Mit Technologieunterstützung ins Industriezeitalter 4.0</i> , Wien, Österreich, 8–9 Oktober 2014.	B (Konferenz)
5.	Baldinger, M.; Leutenecker, B. und Rippel, M. (2013), „Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren“, <i>Industriemanagement</i> , No. 2/2013.	C
6.	Baldinger, M. (2014), „Best Practice beim Kauf von Bauteilen aus dem 3D-Drucker“, <i>Maschinenmarkt</i> , No. 4/2014.	C
7.	Baldinger, M.; Gideon, L. und Schönsleben, P. (2014), „Was steckt hinter dem Schlagwort 3D-Druck?“, <i>IM+io</i> , No. 2/2014.	D
8.	Baldinger, M. (2014), „3D-Drucker revolutionieren die Supply Chain“, <i>GSI Network</i> , No. 2/2014.	D
9.	Baldinger, M. (2015), „Herausforderungen beim Einstieg in 3D-Druck“, <i>Maschinenbau</i> , 2015.	C
10.	Baldinger, M. (2015), „Das volle Potential von Additive Manufacturing braucht den richtigen Beschaffungsprozess“, <i>Mechanics.Now</i> , 2015.	C

Tabelle 3: Publikationen als Erstautor

Nr.	Titel der Präsentation	Art
1.	Baldinger, M.: 3D-Drucken im After-Sales, Accenture Customer Service & Support Roundtable, München, Deutschland, 06.06.2013	Präsentation
2.	Baldinger, M.: Supply Chain Fragestellungen rund um 3D-Druck, AM Seminar@ETHZ, Zürich, Schweiz, 12.06.2013	Präsentation
3.	Baldinger, M.: Price benchmark of laser sintering service providers, VRAP 2013 Conference, Leiria, Portugal, 03.05.2013	Präsentation
4.	Baldinger, M.: Digitales Ersatzteilmanagement mittels 3D-Druck, ÖVIA-Kongress, Wien, Österreich, 08.10.2014	Präsentation
5.	Baldinger, M.: Einführung in die 3D-Druckverfahren, Materialien, Integration in die Value Chain, ITZ Experten und Additive Manufacturing, Emmenbrücke, Schweiz, 03.11.2014	Präsentation
6.	Baldinger, M.: Supply Chain für 3D-Druck, Manufacturing across scales, ETH, Zürich, Schweiz, 10.11.2014	Präsentation
7.	Baldinger, M.: 3D-Lohnfertiger in der EU: auf was muss ich achten?, Professional 3D-Printing Forum, Basel, Schweiz, 18. und 20.11.2014	Präsentation
8.	Baldinger, M.: How to create value with 3D printing, Swiss Innovation Forum, Basel, Schweiz, 20.11.2014	Präsentation
9.	Baldinger, M.: Make-or-Buy decision for 3D printing, Euromold, Frankfurt, Deutschland, 25. und 27.11.2014	Präsentation
10.	Baldinger, M.: Ansätze zum Management der Additive Manufacturing Supply Chain, RapidTech, Erfurt, Deutschland, 11.06.2015	Präsentation
11.	Baldinger, M.: Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette & Herausforderungen bei der Umsetzung und Integration von additiver Fertigung in meine bestehende Supply Chain, Kick-off-Event der AMX, Luzern, Schweiz, 24.06.2015	Präsentation
12.	Baldinger, M.: Impact of 3D printing on physical product development, Ignite, Zürich, Schweiz, 04.09.2015	Präsentation
13.	Baldinger, M.: Einkaufsplattform für Additive Manufacturing, ETH AM Community, Zürich, Schweiz, 23.09.2015	Präsentation
14.	Baldinger, M.: Make-or-Buy für 3D-Druck, Professional 3D Printing Forum der technischen Rundschau, Windisch, Schweiz, 20.10.2015	Präsentation
15.	Baldinger, M.: Digitalisierung der Produktion, Swiss ICT Symposium, Luzern, Schweiz, 11.11.2015	Präsentation

*Tabelle 4: Präsentationen vor einem wissenschaftlichen oder gewerblichen Publikum*

## 2 Hintergrund

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Additive Manufacturing

Die folgende Einführung in Additive Manufacturing basiert auf der Literaturrecherche in Baldinger et al. (2013, Publikation 5).

Ausgangspunkt von AM ist ein digitales 3D-Modell eines Produkts oder Bauteils. Dieses wird von einer Software in Schichten gleicher Dicke „geschnitten“. Eine generative Fertigungsmaschine „druckt“ jede einzelne dieser Schichten, vergleichbar mit einem normalen 2D-Drucker. So wird das Produkt Schicht um Schicht aufgebaut. Es existieren verschiedene AM-Technologien, welche mittlerweile eine breite Palette an Materialien verarbeiten können (z. B. Kunststoffe, Metalle, Keramiken) (z. B. Verl et al., 2013). Die Technologien unterscheiden sich von den traditionellen Fertigungsverfahren durch folgende Eigenschaften: *additiv*, *generisch*, *digital* und *direkt*.

*Additiv*: Mittels AM werden Produkte Schicht um Schicht aufgebaut. Daher werden weder der Zugang eines abtragenden Werkzeugs noch Formen benötigt. Somit unterliegen diese Technologien nicht den gängigen „Design for Manufacturing“-Restriktionen (z. B. keine Hinterschnitte bei spanender Bearbeitung, keine Hohlräume bei Spritzguss) (Hague et al., 2004). Durch den schichtweisen Aufbau sind der Komplexität der einzelnen Schicht kaum Grenzen gesetzt – vergleichbar mit 2D-Druckern, bei denen es irrelevant ist, ob ein komplexes Gemälde oder ein einfaches Quadrat gedruckt wird. Dies führt zu einer anderen Kostenstruktur als bei den traditionellen Verfahren, wobei die Komplexität der Bauteile keine Zusatzkosten verursacht. Zudem ist die Komplexität grundsätzlich weniger limitiert. Ein Vergleich der Kostenstruktur von AM mit der von traditioneller Fertigung kann unter „Complexity for free“ in Abbildung 3 gefunden werden. Aufgrund dieser Kostenstruktur ist das Design des finalen Produkts kaum begrenzt in seiner Komplexität und das Design kann für die zu erfüllende Funktionalität optimiert werden.

*Generisch*: AM-Technologien kennen keine produktspezifischen Werkzeuge oder Vorbereitungen, sondern können alle 3D-Modelle generisch produzieren. Dies führt zu einer anderen Kostenstruktur als bei werkzeuggestützten Verfahren der Massenproduktion (z. B. Spritzguss). Die Herstellung des Werkzeugs (oder das Schreiben von Maschinencode) stellt produktbezogene Fixkosten dar, welche auf die gesamte Produktionsmenge verrechnet werden müssen. Aus diesem Grund fallen die Kosten pro Produkt mit zunehmender Stückzahl. Die Stückkosten bei AM bleiben hingegen konstant (siehe „No Economies of Scale“ in Abbildung 3). Ob 1'000 gleiche, 1'000 jeweils modifizierte oder 1'000 verschiedene Produkte gefertigt werden, hat keinen Kosteneffekt (Gebhardt, 2007).

*Digital*: AM-Technologien arbeiten mit einer digitalen 3D-Datei als Daten-Input. Anders als bei traditionellen Verfahren ist kein manuelles, verfahren-spezifisches Übersetzen nötig, wie beispielsweise das Erstellen einer Spritzgussform oder das Schreiben von Maschinencode.

*Direkt*: Endprodukte werden direkt auf *einer* AM-Maschine gefertigt (abgesehen von allfälliger Nachbearbeitung). Dahingegen werden bei vielen anderen Verfahren Produkte nacheinander von verschiedenen Maschinen bearbeitet. Somit sind bei AM kein grosser Maschinenpark und keine Fertigungslinie notwendig.

### 2.1.2 Begrifflichkeit

Additive Manufacturing geht auf ein Patent für die Technologie Stereolithography von Chuck Hull aus dem Jahre 1986 zurück. 1987 wurde die erste solche Maschine durch die neu gegründete Firma 3D-Systems auf der Messe Autofact vorgestellt (Gebhardt, 2007). Obschon Verl et al. (2013) aufzeigen, dass beispielsweise bereits 1860 eine Technologie für die schichtweise Herstellung von dreidimensionalen Objekten entwickelt wurde, gilt das Patent von Chuck Hull als Beginn von AM. In den folgenden Jahren kam eine Vielzahl weiterer Technologien hinzu, welche im nächsten Abschnitt beschrieben werden. ASTM (2012) standardisiert in Zusammenarbeit mit ISO die Begrifflichkeiten rund um die Technologien im Standard F2792. Hierbei wird Additive Manufacturing wie folgt definiert:

“additive manufacturing (AM), n—a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. Synonyms: additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, and freeform fabrication.”

Im deutschen Sprachgebrauch werden die Begriffe Additive Manufacturing, additive Fertigung und generative Fertigung verwendet. In dieser Dissertation wird von Additive Manufacturing oder AM gesprochen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Technologien, Anwendungsfelder und des Medienhypes der letzten Jahre werden weitere Begriffe für die Bezeichnung der Technologien verwendet, wobei allerdings meist eine Unschärfe besteht.

*Rapid Prototyping:* Das erste Anwendungsgebiet für AM war der Prototypenbau, was als Rapid Prototyping bezeichnet wird. Daher werden die Technologien häufig als Rapid-Prototyping-Technologien oder RP-Technologien bezeichnet. Heute gibt es neben dem Prototypenbau weitere Anwendungsfelder für AM, welche analog als Rapid Tooling, Rapid Manufacturing, etc. bezeichnet werden (mehr hierzu in Abschnitt 2.1.4). Viele englischsprachige Autoren nutzen daher die Rapid-Begriffe nur zur Bezeichnung der Anwendungsgebiete und nicht für die Bezeichnung der Technologien (z.B. Levy et al., 2003). Dies gilt auch für vorliegende Dissertation.

*Rapid-Technologien:* Der VDI (2014) und einige deutschsprachige Autoren (z.B. Verl et al., 2013) nutzen die Begriffe Rapid-Technologien und Rapid-Verfahren jeweils als Begriff für die Gesamtheit aller Technologien und somit als Synonym für AM. Dies birgt zwei Nachteile. Zum einen suggeriert der Begriff Rapid eine schnelle Produktion (Verl et al., 2013), zum anderen führt seine Benutzung zu oben beschriebener Unschärfe zwischen den Bezeichnungen für Anwendungsgebiete und Technologien.

*Layer Manufacturing, Solid Freeform Fabrication:* Diese Begriffe sind Synonyme für AM, welche sich allerdings nur begrenzt durchgesetzt haben.

*3D-Druck:* Der Begriff „3D Printing“ bezeichnet ein Patent des Massachusetts Institute of Technology (MIT) für die Technologie Binder Jetting. Er bezeichnet somit im engeren Sinne nur eine der vielen AM-Technologien. Während des Medienhypes der letzten Jahre wurde er allerdings zu einem Synonym für AM.

### 2.1.3 Technologien

AM steht für verschiedene Technologien. Die wichtigsten hiervon sollen im Folgenden vorgestellt werden. Bis anhin haben sich für die Technologien noch keine eindeutigen Bezeichnungen durchgesetzt. Verschiedene, teilweise widersprüchliche Nomenklaturen existieren:









### 2.1.3.5 Stereolithography (SL)

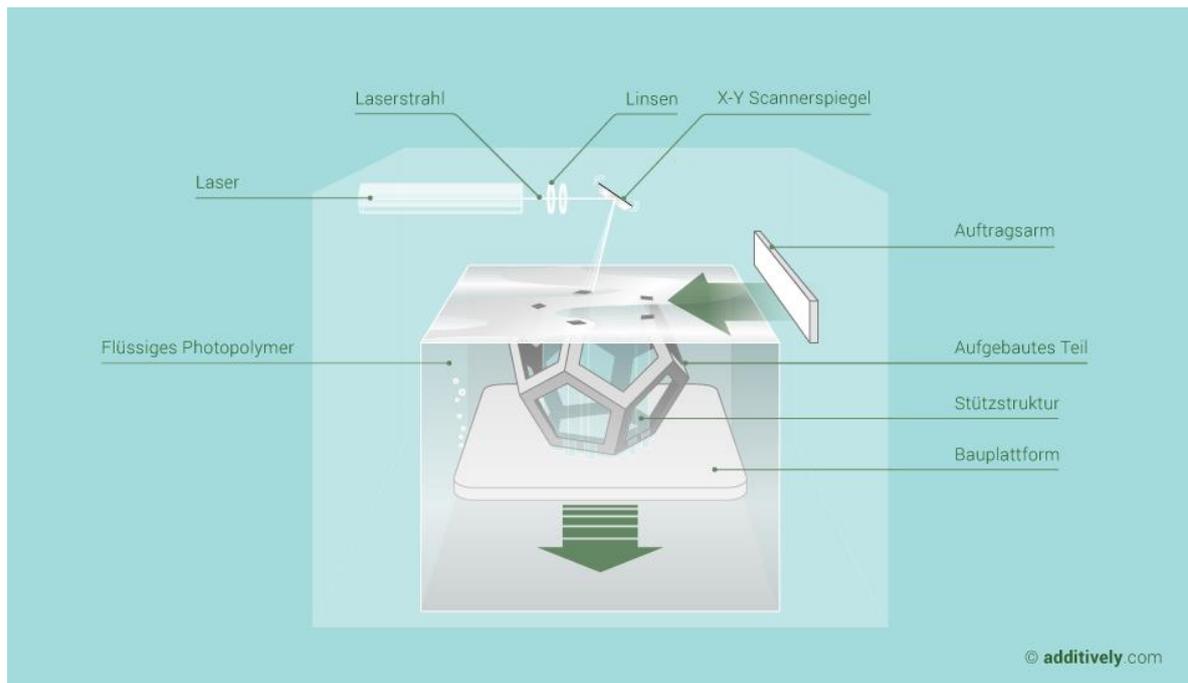


Abbildung 8: Stereolithography (Additively, 2015)

Eine Stereolithography-Maschine baut Teile aus einem flüssigen Fotopolymer durch UV-Licht-aktivierte Polymerisation auf. Die Teile werden auf einer Bauplattform innerhalb des Flüssigkeitsbades produziert. Die Oberfläche des Bades wird mittels des Lasers ausgehärtet. Danach senkt sich die Bauplattform und eine nächste Schicht wird darauf gebaut. Stereolithography benötigt eine Stützstruktur, welche aus dem gleichen Material aufgebaut wird. Die Technologie kann grosse Teile mit guter Oberflächengüte herstellen. Eine grosse Palette an Materialien ermöglicht spezifische Eigenschaften. Allerdings funktioniert die Technologie nur mit Fotopolymeren, welche mit der Zeit altern und somit nicht beständig sind.

Synonyme:

- VDI: Stereolithography (SL)
- ASTM: Vat Photopolymerization
- Maschinenhersteller: Stereolithography, SLA

### 2.1.3.6 Photopolymer Jetting (PJ)

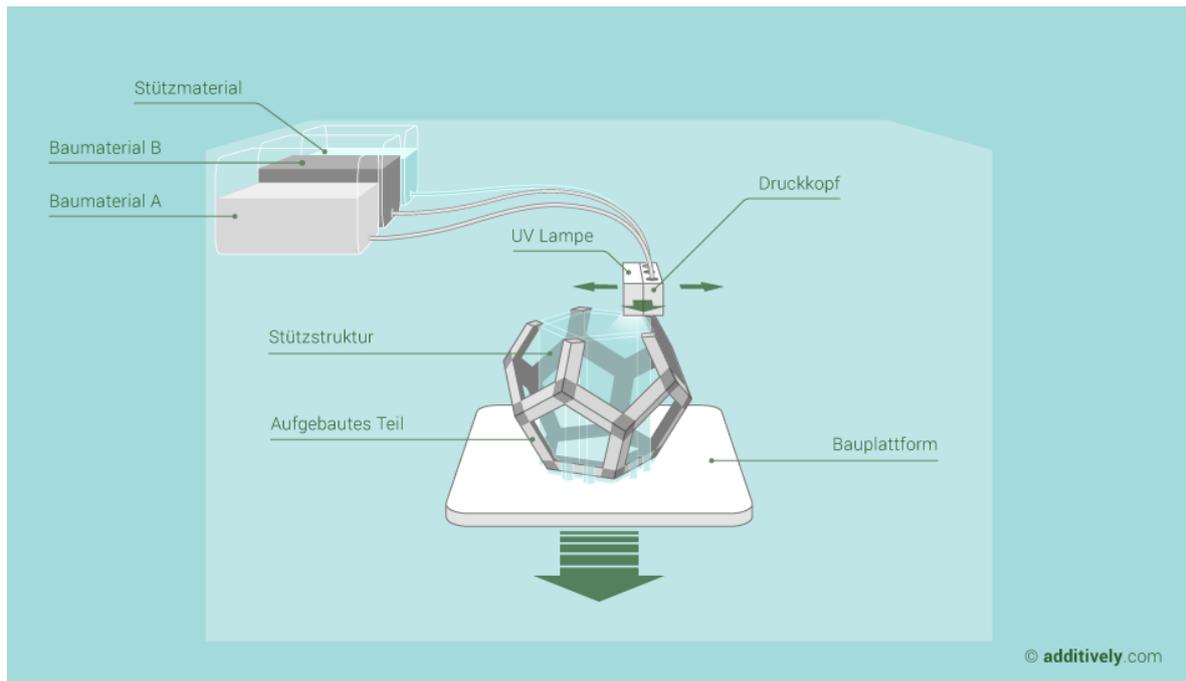


Abbildung 9: Photopolymer Jetting (Additively, 2015)

Eine Photopolymer-Jetting-Maschine verwendet Tintenstrahl-Druckköpfe, um flüssige Fotopolymere tröpfchenweise aufzutragen und sofort mittels UV-Lampen auszuhärten. Schichtweise werden die Teile so aufgebaut. Mehrere Materialien können gleichzeitig aufgetragen werden. Photopolymer Jetting benötigt eine Stützstruktur, um die Teile an der Bauplattform zu befestigen und Überhänge abzustützen. Sie wird normalerweise aus einem speziellen Material, das sich leicht entfernen lässt, gebaut.

Mehrere Materialien lassen sich gleichzeitig auftragen, was Teile aus mehreren Materialien und Farben erlaubt. Funktionell abgestufte Materialien sind so möglich. Photopolymer Jetting funktioniert nur mit Fotopolymeren und nicht mit Standardmaterialien. Diese sind nicht beständig über Zeit und verlieren ihre mechanischen Eigenschaften und ihre Geometrie. Die Materialien sind zudem teuer und der Bauprozess ist langsam.

Synonyme:

- VDI: Poly Jet Modelling (PJM)
- ASTM: Material Jetting
- Maschinenhersteller: Polyjet Modeling, Multijet Modeling, Polyjetting, Multijetting, Jetted Photopolymer

### 2.1.3.7 Material Jetting (MJ)

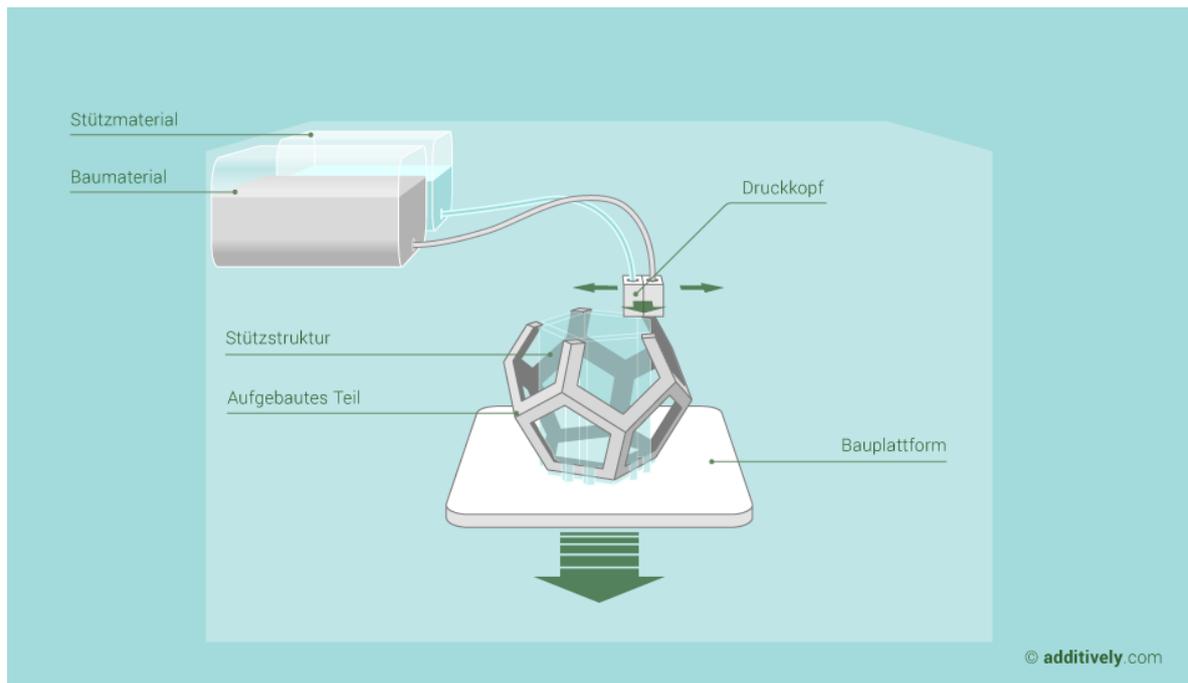


Abbildung 10: Material Jetting (Additively, 2015)

Eine Material-Jetting-Maschine nutzt Tintenstrahl-Druckköpfe, um geschmolzenes Material aufzusprühen, welches dann abkühlt und erstarrt. Schicht um Schicht können so Bauteile aufgebaut werden. Dabei werden in erster Linie Wachs-Materialien verwendet. Material Jetting benötigt eine Stützstruktur, um die Teile auf der Bauplattform zu befestigen und Überhänge abzustützen.

Material Jetting kann Teile in hoher Genauigkeit und mit guten Oberflächen produzieren. Allerdings funktioniert die Technologie nur mit Wachs-ähnlichen Materialien.

Synonyme:

- VDI: Multi-Jet Modelling (MJM)
- ASTM: Material Jetting
- Maschinenhersteller: Multijet Modeling, DOD, Drop on Demand, Thermojet, Inkjet Printing

### 2.1.3.8 Electron Beam Melting (EBM)

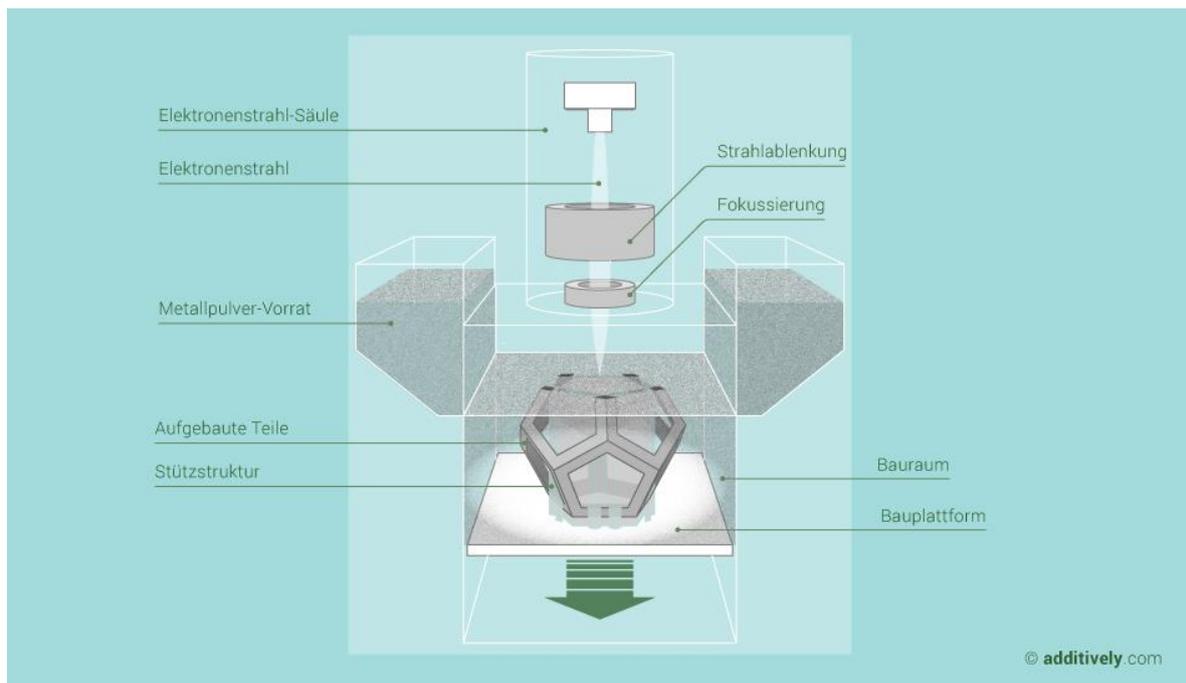


Abbildung 11: Electron Beam Melting (EBM)

Electron Beam Melting funktioniert ähnlich wie Laser Melting. Anstelle des Lasers wird ein Elektronenstrahl verwendet. Eine Electron-Beam-Melting-Maschine trägt eine Schicht Metallpulver auf eine Bauplattform auf. Diese wird mithilfe eines Elektronenstrahls selektiv geschmolzen. Die Bauplattform wird abgesenkt und die nächste Schicht Pulver wird aufgetragen. Durch Wiederholung des Vorgangs der schichtweisen Pulverauftragung sowie der selektiven Schmelzung werden die Teile im Pulverbett aufgebaut. Electron Beam Melting benötigt eine Stützstruktur, welche die Teile und Überhänge auf der Bauplattform verankert. Dies ermöglicht die Ableitung der Wärme vom Schmelzpunkt, wodurch Hitzebelastungen und Verformungen verhindert werden. Das gesamte Bauvolumen kann mit mehreren Teilen aufgefüllt werden, solange diese alle auf der Bauplattform befestigt sind. Teile werden im Vakuum gebaut.

Teile können aus Standard-Metallen mit hoher Dichte hergestellt werden. Allerdings ist die Auswahl an Materialien noch limitiert und der Prozess langsam und teuer.

Synonyme:

- VDI: Strahlschmelzen
- ASTM: Powder Bed Fusion
- Maschinenhersteller: EBM, Elektronenstrahl-Schmelzen

### 2.1.3.9 Prozesskette

Die AM-Technologien sind parallele Fertigungsprozesse. Das bedeutet, dass in einem Bauvorgang gleichzeitig mehrere Bauteile produziert werden. Abhängig von den gewünschten Eigenschaften werden Bauteile entweder direkt mittels AM hergestellt oder indirekt in der Kombination mit traditionellen Technologien.

- Direkte einstufige Herstellung: Hier wird das finale Bauteil direkt mittels AM hergestellt. Gegebenenfalls wird es noch selektiv nachbearbeitet (z. B. durch Schleifen zur Verbesserung der Oberfläche).

- Direkte mehrstufige Herstellung: Hier wird mittels AM ein Formkörper hergestellt, welcher bereits die geometrischen Eigenschaften des finalen Bauteils besitzt (Grünteil). Dieser wird dann weiter verarbeitet. Beispielsweise wird mittels Binder Jetting Metallpulver verklebt, welches anschliessend gesintert und infiltriert wird.
- Indirekte Herstellung: Hierbei wird ein Modell mittels AM erstellt, welches als Startpunkt für einen traditionellen Produktionsprozess verwendet wird. Die traditionelle Technologie produziert dann das finale Teil. Beispielsweise können Urmodelle für verschiedene Gussprozesse erstellt werden.

## **2.1.4 Anwendungen**

Additive Manufacturing steht nicht nur für mehrere Technologien, sondern auch für mehrere Anwendungsgebiete. Diese werden hier in Anlehnung an Verl et al. (2013) beleuchtet.

### **2.1.4.1 Rapid Prototyping**

Unter Rapid Prototyping versteht man die Anwendung von AM für die Produktion von Prototypen. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass Prototypen direkt ausgehend von digitalen Dateien mit kurzer Vorlaufzeit produziert werden können. Für diese Anwendung wurde AM ursprünglich entwickelt. Mittlerweile gibt es eine grosse Materialvielfalt, um eine grosse Breite von Anforderungen im Prototypenbau abzudecken.

### **2.1.4.2 Rapid Tooling**

Beim Rapid Tooling wird AM für die Produktion von Werkzeugen und Formen eingesetzt. Ein Hauptgrund für den Einsatz sind die geometrischen Freiheiten der Technologien, welche es erlauben, komplexe Kühlkanäle in die Formen zu integrieren. So können beispielsweise beim Spritzguss Zykluszeiten verkürzt und die Bauteilqualität erhöht werden.

### **2.1.4.3 Rapid Casting**

Um Bauteile im Gussprozess (Englisch: Casting) herzustellen, werden Modelle benötigt. Ein Urmodell wird verwendet um eine Form herzustellen, mit der verlorene Modelle, meist aus Wachs, erstellt werden. Diese werden mit einem Mantel überzogen, ausgebrannt und abgegossen. So entsteht das finale Bauteil (vergleiche Kalweit et al., 2011). Bei Rapid Casting wird AM eingesetzt, um Urmodelle oder direkt verlorene Modelle zu produzieren. Hierfür gibt es zwei Gründe. Erstens besteht die Möglichkeit, komplexere Modelle als mit traditionellen Fertigungsverfahren herzustellen. Somit lassen sich mittels des Gussprozesses komplexere Bauteile als bis anhin realisieren. Zweitens ist die Produktion von Modellen mittels AM teilweise günstiger und schneller als mit traditionellen Verfahren möglich.

### **2.1.4.4 Rapid Manufacturing**

Rapid Manufacturing beschreibt die direkte Produktion von Serienbauteilen mittels AM-Technologien und somit deren Einsatz als Produktionstechnologien. Das Konzept wird seit über einem Jahrzehnt diskutiert (vergleiche Levy et al., 2003), da es aufgrund der Eigenschaften von AM neue Möglichkeiten ergibt. Hierbei werden die Produktion von komplexeren Geometrien, die Integration von mehr Funktionalität in weniger Bauteile, neue Arten der Individualisierung bis hin zur Produktion von Unikaten und die Realisierbarkeit von On-Demand- und On-Location-Produktion angeführt (vergleiche hierzu Abschnitt 1.1)

Aufgrund noch vorhandener Limitationen von AM ist die Umsetzung von Rapid Manufacturing noch begrenzt. Hier sind vor allem die begrenzte Oberflächengüte und Genauigkeit der Bauteile, die limitierte Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Technologien sowie die hohen Kosten hervorzuheben. Zudem fehlen derzeit noch allgemeingültige Standards und Qualitätssicherungsprozesse (z. B. Gebhardt, 2007; Gausemeier, 2011; Verl et al., 2012; Scott et al., 2012). Aufgrund der beschriebenen Möglichkeiten ist das Potential von Rapid Manufacturing allerdings sehr gross. Momentan sind Laser Sintering und Laser Melting die vielversprechendsten Technologien für Rapid Manufacturing (Verl et al., 2012). Im Technologie-spezifischen Teil dieser Dissertation zu AM-Kosten wird daher auf diese zwei Technologien fokussiert.

### **2.1.5 Additive-Manufacturing-Dienstleister**

Im Jahr 2014 produzierten Dienstleister für Firmen AM-Bauteile im Wert von 1,5 Milliarden CHF. Daneben existiert ein zweiter Markt, in welchem Dienstleister AM nutzen, um Formen und Modelle für die traditionelle Fertigung herzustellen (siehe indirekte Herstellung unter 2.1.3.9). Dieser Markt für indirekt hergestellte Teile beläuft sich auf weitere 1,7 Milliarden CHF im Jahr 2014 (Wohlers, 2013, 2015, USD CHF 0,99, Annahme gleichbleibenden Wachstums zwischen 2013 und 2015). Somit umfasst der gesamte Dienstleistungsmarkt 2014 3,2 Milliarden CHF. Der Markt besteht aus einer Vielzahl von Anbietern. Additively (2015) listet alleine für Europa über 300 verschiedene Dienstleister. Diese haben meist einige wenige Technologien und Materialien im Haus. Bis vor kurzem haben Dienstleister ihren Kunden mithilfe von Weitervergabe von Aufträgen meist alle Technologien angeboten (Wohlers, 2013). Mittlerweile lässt sich hingegen eine Spezialisierung der Dienstleister auf ihre Kern-Technologien beobachten (Additively, 2015).

Für einige Firmen gehört der Einkauf von AM-Teilen, vor allem von Prototypen, bereits zum Standard. Grosse Firmen haben daher begonnen, Beziehungen zu mehreren Dienstleistern aufzubauen, und diese ihren bestätigten Lieferanten hinzugefügt (Wohlers, 2013). Ein Grossteil der Firmen nutzt die Technologien allerdings noch nicht regelmässig und hat daher keine existierenden Lieferantenbeziehungen. Diese Firmen behelfen sich meist ad hoc mit Online-Recherchen, wenn Bauteile benötigt werden. Die Realisierung von AM-Bauteilen ist für sie mit viel Aufwand verbunden und viele Projekte werden daher nicht umgesetzt (Baldinger, 2015, Publikation 10).

Cohen (2014) argumentiert, dass die Integration von AM in die Einkaufsabteilung in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Da die Beschaffungsvolumen von AM-Teilen bei vielen Firmen bis anhin gering waren, wurde diesem Thema wenig Beachtung geschenkt. Mit dem stetigen Wachstum des Dienstleistungsmarktes wird sich dies jedoch ändern.

### **2.1.6 Wichtige Begriffe und Konzepte**

In diesem Abschnitt werden verschiedene Begriffe und Konzepte eingeführt, welche für die Betrachtung von Kosten und Supply-Chain-Fragestellungen rund um AM relevant sind. Bauteilparameter beschreiben die für die Produktion und Kosten relevanten Eigenschaften der Bauteile. Produktionsparameter beschreiben einen Bauvorgang, in dem verschiedene Bauteile gleichzeitig produziert werden.

Eine Bestellung beschreibt die Bauteile, welche eine Firma von einem Dienstleister zusammen bestellt. Dies bedeutet nicht, dass eine Bestellung direkt in einem Bauvorgang produziert wird. Dienstleister konsolidieren häufig Bestellungen von verschiedenen Firmen und produzieren

Bauteile zusammen. Somit unterscheiden sich gewisse Parameter einer Bestellung von den Parametern der Produktion (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)

### **Bauteilparameter**

*Volumen:* Das Volumen  $V_i$  von Bauteil  $i$  in  $\text{cm}^3$ .

*Bounding Box:* Die kleinste Box  $BB_i$  in  $\text{cm}^3$ , welche das gesamte Bauteil  $i$  umgibt.

*Höhe (Z-Richtung):* Die Höhe  $H_i$  des Bauteils  $i$  in  $\text{cm}$ , welche typischerweise minimiert wird.

*Toleranzen:* Die für die Bauteile einzuhaltenden Toleranzen.

*Eigenschaften:* Die für das Bauteil zu erreichenden mechanischen und chemischen Eigenschaften (z. B. Bruchdehnung). Sie werden in erster Linie durch die Wahl der passenden AM-Technologie und des passenden Materials abgebildet.

### **Produktionsparameter**

*Schichtdicke:* Die Schichtdicke beschreibt die Dicke der aufgetragenen Schichten in  $\text{mm}$ . Je feiner die Schichtdicke, desto besser sind die erreichten Toleranzen und desto kleiner ist der Treppeneffekt, welcher sich durch den schichtweisen Aufbau auf der Oberfläche der Bauteile ergibt.

*Bauraum:* Eine AM-Maschine besitzt einen Bauraum, in welchem eines oder mehrere Bauteile parallel produziert werden. Dieser wird durch die Dimension der Bauplatte in X- und Y-Richtung und die maximale Bauhöhe in Z-Richtung beschränkt und als  $BR_{\text{Maschine}}$  in  $\text{cm}^3$  angegeben.

*Bauteilorientierung:* Bauteile werden in Z-Richtung Schicht um Schicht aufgebaut. Daher unterscheiden sich die Bauteileigenschaften in Z-Richtung von denen in X- und Y-Richtung. AM-Bauteile sind somit anisotrop. Sofern dieser Eigenschaftsunterschied für ein Bauteil relevant ist, muss entschieden werden, in welche Richtung es aufgebaut wird. Dies wird unter Bauteilorientierung verstanden. Sofern eine spezifische Bauteilorientierung zur Erreichung der Eigenschaften und Toleranzen nötig ist, müssen gegebenenfalls die Bounding Box und die Höhe neu berechnet werden. Die Bounding Box und die Höhe können in diesem Fall nicht minimiert werden, sondern müssen dieser Orientierung Rechnung tragen.

*Bounding Box der Bauteile eines Bauvorgangs:* Die Bounding Box des Bauvorgangs  $BB_{\text{Prod}}$  beschreibt die minimale Box, in welche alle Bauteile eines Bauvorgangs passen. Sie kann durch geschicktes Schachteln der Bauteile minimiert werden. Dabei müssen allerdings spezifische Orientierungen der Bauteile beachtet werden, sofern diese existieren (Ruffo et al., 2006a).

*Packing Ratio eines Bauvorgangs:*  $PR_{\text{Prod}}$  beschreibt die Auslastung des Bauraums eines Bauvorgangs. Hierbei wird die Bounding Box der Bauteile eines Produktionslaufs durch das gesamte Volumen des Bauraums geteilt (Ruffo et al., 2006a).

$$PR_{\text{Prod}} = \frac{BB_{\text{Prod}}}{BR_{\text{Maschine}}}$$

*Materialverbrauch:* Die Masse des Materials in Gramm, die für einen Produktionslauf verbraucht wird. Der Materialverbrauch setzt sich je nach Technologie anders zusammen. Bei allen Technologien umfasst er das Material, welches für die Produktion der Bauteile benötigt wird. Hinzu kommt gegebenenfalls das Material, welches für die Stützstruktur verwendet wird. Bei Laser Sintering muss zudem beachtet werden, dass das lose, nicht verbaute Pulver während des Bauvorgangs altert und daher nur ein gewisser Teil davon wiederverwendet werden kann. Der

Anteil des Pulvers, welcher nicht wieder verwendet wird, muss ebenfalls zum Materialverbrauch hinzugerechnet werden.

*Recyclingrate:* Bei Laser Sintering wird der Bauraum aus einer Mischung von neuem und bereits verwendetem (recyceltem) Pulver gefüllt. Die Recyclingrate beschreibt hierbei den Prozentsatz recycelten Pulvers, welcher verwendet wird. Je höher die Recyclingrate, desto tiefer sind der Materialverbrauch und somit die Kosten der Bauteile. Ziel eines Maschinenbetreibers ist es daher, die Recyclingrate so hoch wie möglich anzusetzen ohne dass die Qualität der produzierten Bauteile beeinträchtigt wird (Ruffo et al., 2006a).

### Bestellungsparameter

*Stückzahl:* Die Anzahl  $Q_i$ , welche von Bauteil  $i$  produziert werden soll.

*Totales Volumen:* Das totale Volumen  $V_{tot}$  der Bestellung ergibt sich aus der Aufsummierung der Volumen der  $n$  verschiedenen Bauteile.

$$V_{tot} = \sum_{i=1}^n V_i * Q_i$$

*Totale Bounding Box:* Der Dienstleister konsolidiert Bauteile verschiedener Bestellungen und erstellt damit die Bounding Box des Bauvorgangs. Dies bedeutet aus der Perspektive der Firma, dass nicht klar ist, wie die Bauteile der Bestellung geschachtelt werden. Daher wird die totale Bounding Box  $BB_{tot}$  der Bestellung ohne Verschachtelung berechnet. Sie ergibt sich daher aus der Aufsummierung der Bounding Boxes der Bauteile (Baldinger et al., 2015, Publikation 1).

$$BB_{tot} = \sum_{i=1}^n BB_i * Q_i$$

*Durchschnittliche Packing Ratio:* Die durchschnittliche Packing Ratio  $PR_{avr}$  ist das Verhältnis des totalen Volumens zur totalen Bounding Box aller Bauteile einer Bestellung (Baldinger et al., 2015, Publikation 1).

$$PR_{avr} = \frac{V_{tot}}{BB_{tot}}$$

*Max. Height:* Die maximale Höhe  $H_{max}$  aller Teile ist bei tiefer Maschinenauslastung relevant, da sie die Anzahl Schichten bestimmt, welche minimal aufgebaut werden müssen (Baldinger et al., 2015, Publikation 1).

$$H_{max} = MAX(H_i)$$

*Lieferfrist:* Die Lieferfrist wird in Arbeitstagen angegeben.

## 2.2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf

Bisher lag der Hauptfokus der AM-Forschung auf der Entwicklung der Technologien, um sie zur Tauglichkeit in der Serienproduktion zu führen. Die Forschung war und ist daher stark von Ingenieursthemen geprägt. Materialentwicklung, Technologieentwicklung und Qualitätssicherung wurden als die Themenfelder mit der höchsten Forschungsaktivität identifiziert (Gausemeier et al., 2013).

Während der letzten Jahre nahm die Nutzung von AM stetig zu. Hierbei wird von Firmen immer stärker auf Dienstleister zurückgegriffen. Aufgrund dieser Entwicklung gewinnen neue Themen

an Bedeutung. Da die Volumen der beschafften AM-Bauteile zunehmen, werden die Kosten von AM immer wichtiger. Obschon Kosten von vielen Autoren als kritischer Aspekt identifiziert wurden (z.B. Gebhardt, 2007; Verl et al., 2012), existiert hierzu relativ wenig Wissen (Munguía et al., 2008). Aufgrund der zunehmenden Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern stellt sich die Frage nach dem richtigen Supply-Chain-Design. Gausemeier et al. (2013) identifizierten Supply-Chain-Management als Themengebiet mit tiefer Forschungsintensität. Zudem stellt sich die Frage, wie Firmen, die AM-Dienstleistungen einkaufen, am Besten in AM einsteigen. Für diese stellen sich andere Fragen als für eine Firma, die AM-Equipment selbst anschafft und betreibt. Im Folgenden wird aufgezeigt, wo die AM-Forschung zu Kosten, Supply-Chain-Management und Einstieg steht, und der jeweilige Forschungsbedarf identifiziert.

## **2.2.1 Kosten von Additive Manufacturing**

### **2.2.1.1 Stand der Forschung zu den Kosten von Additive Manufacturing**

Viele Studien beschäftigten sich mit AM-Kosten. Fast alle analysierten hierbei ein Make-Szenario, wobei Maschinen im Haus betrieben werden. Mehrere Autoren identifizierten die verschiedenen Typen von Kosten im Zusammenhang mit AM (z.B. Gebhardt, 2007; Gibson et al., 2009). Eine nächste Gruppe von Studien beschäftigte sich mit dem Aufsummieren und Runterbrechen dieser Kosten auf einzelne Bauteile, welche zusammen produziert werden (Ruffo et al., 2006a, 2006b; Baumers et al., 2012, 2013; Zhang und Bernard, 2013; Rickenbacher et al., 2013). Kosten pro Teil wurden teilweise mit traditionellen Fertigungsmethoden verglichen (Hopkinson und Dicknes, 2003; Hopkinson, 2006). Da dieser direkte Vergleich oft nicht vorteilhaft ist, beschäftigten sich Atzeni et al. (2010) und Atzeni und Salmi (2012) damit, wie durch ein Redesign von Bauteilen und Baugruppen ein positiver Business Case erzielt werden kann. Neuere Studien nahmen einen umfassenderen Blick auf AM-Kosten ein, indem sie beispielsweise Qualitätskosten (Levy und Schmid, 2012) oder Supply-Chain-Kosten (Khajavi et al., 2014) inkludierten.

Von den Autoren wurden verschiedene Faktoren identifiziert, welche die Kosten von AM beeinflussen. Aus der Sicht eines Maschinenbetreibers/Dienstleisters sind diese: Bauraumauslastung, Materialverbrauch, Maschinenauslastung, Prozesszuverlässigkeit und Prozessgeschwindigkeit (Gebhardt, 2007), Volumen aller Bauteile im Bauraum und Packing Ratio des gesamten Bauraums (Hopkinson und Dicknes, 2003), Höhe (Z-Richtung), Schichtdicke und Recyclingrate des Pulvers (Ruffo et al., 2006a, 2006b), Handling-Kosten pro Teil (Verl et al., 2012) und Implementierung von Qualitätssicherungsprozessen (Levy und Schmid, 2012). Verschiedene Autoren wiesen auf den Vorteil hin, dass Bauteilkomplexität bei AM keinen Einfluss auf die Kosten hat (z.B. Lipson, 2011).

Ruffo et al. (2006a) und weitere fanden die folgende Beziehung zwischen den Kosten pro  $\text{cm}^3$  (oder Bauteil) und dem totalen Volumen (Volumen \* Anzahl Bauteile) für das Make-Szenario: Die Kosten pro  $\text{cm}^3$  fallen mit zunehmendem totalen Volumen bis zu einem gewissen Schwellenwert. Danach stabilisieren sich die Kosten pro  $\text{cm}^3$  und sind fast nicht mehr vom totalen Volumen abhängig.

Obschon heute viele Firmen AM-Bauteile bei Dienstleistern einkaufen, gibt es nach dem Wissen dieses Autors nur eine Studie, die sich mit AM-Kosten im Buy-Szenario beschäftigt. Ruffo et al. beleuchteten im Jahr 2007 die Make-or-Buy-Frage und verglichen die Kosten für die Produktion von zwei Bauteilen im Haus mit den angebotenen Preisen von zwei Dienstleistern. Die Autoren

kamen zu dem Schluss, dass die Preise bei Dienstleistern aufgrund von mangelndem Wettbewerb zu hoch sind und daher das Make-Szenario zu empfehlen ist.

### **2.2.1.2 Forschungsbedarf: Preis- und Geschäftsmodelle auf dem AM-Dienstleistermarkt**

Wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, ist der AM-Dienstleistermarkt in den letzten Jahren stark gewachsen und viele Firmen kaufen heute Bauteile auf diesem ein. Allerdings gibt es für ein solches Buy-Szenario abgesehen von Ruffo et al. (2007) keine Studien zu Kosten, obschon dies ein kritischer Aspekt ist. Es besteht daher ein Forschungsbedarf, um die Preisstruktur auf dem Dienstleistermarkt und somit die Kosten für Firmen in einem Buy-Szenario besser zu verstehen. Insbesondere geht es um die folgenden Fragen:

- Welche Kostentreiber für AM sind unter Kontrolle einer Firma?
- Welche dieser Kostentreiber schlagen sich in den Preismodellen der Dienstleister als Preistreiber nieder?
- Welche Preisspannen existieren auf dem Dienstleistermarkt?
- Existiert die von Ruffo et al. (2006a) identifizierte Kostenkurve auch als Preiskurve auf dem Dienstleistermarkt?
- Welche Geschäftsmodelle existieren bei Dienstleistern?

⇒ Forschungsfrage 1a: Welche Geschäfts- und Preismodelle existieren auf dem AM-Dienstleistermarkt?

### **2.2.1.3 Forschungsbedarf: AM-Kostenschätzung für ein Buy-Szenario**

Um eine erfolgreiche Rapid-Manufacturing-Anwendung umzusetzen, müssen Bauteile spezifisch für AM konstruiert werden (z. B. Hague et al., 2004; Gibson et al., 2010). Aus diesem Grund muss die Entscheidung, AM für ein Bauteil einzusetzen, möglichst früh im Produktentwicklungsprozess gefällt werden, wenn Bauteil- und Baugruppendesigns noch nicht festgelegt sind. Um diese Entscheidung zu fällen, müssen Ingenieure die Bauteilkosten schätzen können.

Es wurde eine Vielzahl von Techniken entwickelt, um Bauteilkosten in der traditionellen Fertigung zu schätzen (z. B. Sheldon et al., 1990; Rehman und Guenov, 1998). Grundsätzlich lassen sich hierbei qualitative und quantitative Techniken unterscheiden. Niazi et al. (2006) kamen zu dem Schluss, dass sich qualitative Techniken für frühe Punkte im Produktentwicklungszyklus eignen, da sie relativ wenige Daten benötigen und ohne grossen Aufwand angewandt werden können. Auch wenn sie häufig ungenaue Resultate produzieren, sind sie doch eine gute Basis für Entscheidungen zu diesem Zeitpunkt.

Tabelle 5 klassifiziert die existierenden Studien hinsichtlich Kostenschätztechnik (quantitativ vs. qualitativ) und Supply-Chain-Design (Make vs. Buy). Aus zwei Gründen eignen sich die existierenden Studien zu AM-Kosten nicht für die oben beschriebene Herausforderung. Erstens braucht es früh im Produktentwicklungsprozess qualitative Methoden zur Kostenschätzung (z. B. Niazi et al., 2006). Zweitens kaufen viele Firmen Bauteile bei externen Lieferanten und brauchen somit eine Kostenschätzung für ein Buy-Szenario.

Methode	Make	Buy
Qualitativ		Forschungsbedarf
Quantitativ	Baumers et al., 2012, 2013 Gebhardt, 2007 Gibson et al., 2009 Ruffo et al., 2006a, 2006b Hopkinson und Dicknes, 2003 Hopkinson, 2006 Atzeni, 2010, 2012 Zhang und Bernard, 2013 Rickenbacher et al., 2013 Levy und Schmid, 2012 Khajavi et al., 2014	Ruffo et al., 2007

*Tabelle 5: Publikationen von Kostenmodellen für Additive Manufacturing*

Nach dem Wissensstand des Autors existiert bis anhin keine AM-Kostenstudie, welche einen qualitativen Ansatz zur Kostenschätzung in einem Buy-Szenario wählt. Diese Lücke soll in der Forschungsfrage 1b adressiert werden.

⇒ Forschungsfrage 1b: Wie können Kosten von AM-Bauteilen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess abgeschätzt werden, wenn diese bei Dienstleistern gefertigt werden (Buy-Szenario)?

## 2.2.2 Supply-Chain-Design für Additive Manufacturing

### 2.2.2.1 Stand der Forschung zum Supply-Chain-Design für Additive Manufacturing

Wenn eine Firma AM nutzen möchte, stellt sich die Frage nach dem Supply-Chain-Design. Dieses umfasst angelehnt an Schönsleben (2011) folgende vier Punkte:

1. Make-or-Buy-Entscheidung
2. Strategische Beschaffung mit Auswahl der Lieferanten
3. Gestaltung der Beziehung und Form der Zusammenarbeit mit diesen Lieferanten
4. Standortplanung und Setup des Produktionsnetzwerks

Wie bereits erwähnt, wurde rund um Supply-Chain-Fragestellungen bis anhin nur wenig Forschung betrieben. Wenn die Forschung weiter auf Supply-Chain-Design eingegrenzt wird, existieren nur eine Handvoll Publikationen, welche Tabelle 6 zeigt. Diese beschäftigen sich vor allem mit Punkt 4, das heisst, wie Produktionsnetzwerke für AM gestaltet werden können. Dies rührt daher, dass AM Supply Chains längerfristig grundlegend verändern und die Produktion auf Abruf in einem dezentralen Netzwerk ermöglichen kann. Diese Möglichkeit hat viele Autoren begeistert. Die einzige aktuelle Studie, welche Firmen derzeit beim Supply-Chain-Design unterstützt, ist Cohen (2014).

Punkt	Autor und Jahr	Inhalt
1	Ruffo et al., 2007	Kostenvergleich basierend auf zwei spezifischen Bauteilen
2	Munguía et al., 2008	Umfrage unter Lieferanten gibt gewisse Einblicke für Lieferantenauswahl
2	Cohen, 2014	Weist darauf hin, dass die Einkaufsabteilung und die enge Zusammenarbeit mit Dienstleistern wichtig für eine erfolgreiche Nutzung der AM-Technologien sind
4	Morales et al., 2012	Aufzeigen von Potentialen der dezentralen Produktion auf Abruf, wie Einsparungen, Transportkosten etc.
4	Walter et al., 2004	Digitales Ersatzteilmanagement mit Produktion in dezentralem Netzwerk
4	Holmström et al., 2010	Digitales Ersatzteilmanagement mit Produktion in dezentralem Netzwerk
4	Tuck et al., 2007	High-level-Analyse, wie gewisse Supply-Chain-Prinzipien durch AM beeinflusst werden könnten
4	Rommel und Fischer, 2013	Aufzeigen des strategischen Potentials von AM im Ersatzteilmanagement
4	Ariadi et al., 2008	Entwurf eines Geschäftsmodells und Produktionsnetzwerks für den B2C-Markt

*Tabelle 6: Publikationen rund um das Supply-Chain-Design für Additive Manufacturing*

### **2.2.2.2 Forschungsbedarf: Supply Chain für Additive Manufacturing**

Da bis anhin nicht untersucht, ist es unklar, welche Supply-Chain-Designs und -Prozesse Firmen für die Zusammenarbeit mit AM- Dienstleistern verwenden. Die Vermutung liegt nahe, dass AM innerhalb der normalen Supply Chain abgebildet wird. Aufgrund der Unterschiede zu traditionellen Produktionsverfahren sollten aber AM-spezifische Punkte beachtet werden. Beispielsweise muss bei der Gestaltung der Zusammenarbeit mit den Lieferanten (Punkt 3) dem Umstand Rechnung getragen werden, dass AM für die Produktion von kleinen Stückzahlen eingesetzt wird (im Gegensatz zur heutigen Produktion von Grossserien). Wenige grosse Bestellungen werden durch viele kleine Bestellungen unterschiedlicher Bauteile abgelöst. Diese Situation führt zu einem Paradigmenwechsel bei der Interaktion zwischen Firmen und den Dienstleistern. Die heutigen Einkaufsprozesse für Firmen-spezifische Teile funktionieren grösstenteils immer noch manuell und sind daher aufgrund des hohen administrativen Aufwands nicht für die vielen kleinen Bestellungen geeignet. Aus diesem Grund müssen Einkaufsprozesse an die spezifischen Anforderungen von AM angepasst werden. Wie im vorgängigen Abschnitt aufgezeigt, gibt es momentan keine Einblicke, wie Firmen dies tun oder tun sollten. Generell existieren in der Literatur bis anhin keine konkreten Empfehlungen für die Punkte 1 bis 3 des Supply-Chain-Designs. Diese Lücke wird in der Forschungsfrage 2 adressiert.

- ⇒ Forschungsfrage 2a: Make-or-Buy: Wie sehen Make- und Buy-Szenario in Bezug auf Kosten und Risiken aus?
- ⇒ Forschungsfrage 2b: Was gilt es bei der Auswahl der AM-Dienstleister zu beachten?
- ⇒ Forschungsfrage 2c: Wie müssen Einkaufsprozesse für die Zusammenarbeit mit AM-Dienstleistern ausgestaltet werden?

## 2.2.3 Einstieg in Additive Manufacturing

### 2.2.3.1 Stand der Forschung zum Einstieg in Additive Manufacturing

Eine McKinsey-Umfrage unter produzierenden Unternehmen (Cohen et al., 2014) zeigte, dass 40% der Firmen noch kein Wissen zu AM besitzen, welches über die Berichterstattung in den Medien hinausgeht. Weitere 12% gaben an, dass AM zwar Relevanz für ihr Unternehmen hat, sie allerdings zuerst mehr Wissen aufbauen müssen. Somit hat über die Hälfte der produzierenden Firmen noch keinen ausreichenden Wissensstand, um die Möglichkeiten und Herausforderungen von AM zu beurteilen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erfahrungen des Autors dieser Dissertation aus der Zusammenarbeit mit der Industrie.

Eine Vielzahl von Autoren diskutierte die Möglichkeiten von AM sowie die Herausforderungen beim Einstieg aus der Perspektive von Entwicklungsabteilungen und Ingenieuren (z. B. Verl et al., 2013). Von Cohen (2014) wurde die Perspektive der Geschäftsleitung einer Firma eingenommen, die in AM einsteigen möchte. Der Autor stellt in seiner Studie ein Framework vor, wie das Potential von AM und die benötigten Kompetenzen strategisch beurteilt werden können.

### 2.2.3.2 Forschungsbedarf: Einstieg in Additive Manufacturing

Basierend auf der Erfahrung in der Industrie und dem Stand der Literatur lässt sich festhalten, dass eine Mehrheit der produzierenden Unternehmen Wissen über AM aufbauen muss, um die Technologien erfolgreich einzusetzen. Bis anhin bieten verschiedene Autoren Informationen für Ingenieure, die die Technologien nutzen möchten, sowie Cohen (2014) einen Leitfaden für die Geschäftsleitung von produzierenden Firmen, mit dem diese schnell einen ersten Überblick über die Möglichkeiten und Herausforderungen erhalten kann. Wie Cohen (2014) selbst hervorhebt, sollten sich aber unterschiedliche Unternehmensbereiche, wie beispielsweise die Einkaufsabteilung, die Qualitätssicherung oder die Konstruktion, mit den Technologien beschäftigen. Hilfreich wären hierzu Leitfragen, welche über alle Unternehmensbereiche hinweg eine schnelle erste Einführung in die Möglichkeiten und Herausforderungen von AM erlauben. Diese Leitfragen werden in der Forschungsfrage 3 erarbeitet.

- ⇒ Forschungsfrage 3a: Welche Leitfragen unterstützen die unternehmensweite Diskussion über Möglichkeiten und Herausforderungen von Additive Manufacturing?

### 3 Forschungsfragen

Firmen nutzen zunehmend Dienstleister, die AM-Bauteile im Auftrag fertigen. Die AM-Forschung hat die Perspektive dieser Firmen, welche ein Buy-Szenario wählen, noch nicht ausreichend analysiert. In dieser Arbeit werden daher Konzepte, Werkzeuge und Prozesse entwickelt, welche es Firmen ermöglichen, effizient mit Dienstleistern zusammenzuarbeiten und damit die AM-Supply-Chain auch im Fall eines Buy-Szenarios effektiv zu managen. Übergeordnetes Ziel ist die effiziente und risikoarme Nutzung der AM-Technologien durch Firmen und damit die Stärkung deren längerfristigen Wettbewerbsfähigkeit.

1. Kosten von Additive Manufacturing im Buy-Szenario
  - a. Welche Geschäfts- und Preismodelle existieren auf dem AM-Dienstleistermarkt?
  - b. Wie können Kosten von AM-Bauteilen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess abgeschätzt werden, wenn diese bei Dienstleistern gefertigt werden (Buy-Szenario)?
2. Supply Chain für Additive Manufacturing
  - a. Make-or-Buy: Wie sehen Make- und Buy-Szenario in Bezug auf Kosten und Risiken aus?
  - b. Was gilt es bei der Auswahl der AM-Dienstleister zu beachten?
  - c. Wie müssen Einkaufsprozesse für die Zusammenarbeit mit AM- Dienstleistern ausgestaltet werden?
3. Herausforderungen beim Einstieg
  - a. Welche Leitfragen unterstützen die unternehmensweite Diskussion über Möglichkeiten und Herausforderungen von Additive Manufacturing?

## 4 Forschungsdesign

Im Rahmen dieser Doktorarbeit soll sowohl in der Forschung als auch in der Industrie ein Mehrwert geschaffen werden. Aufgrund der Aktualität der Fragestellungen und der wenigen verfügbaren Forschungsergebnisse sollen möglichst praxisnahe Lösungen erarbeitet werden. Zur Beantwortung der im Rahmen dieser Dissertation adressierten Forschungsfragen werden unterschiedliche Forschungsdesigns verwendet (siehe Tabelle 7).

Frage	Forschungsdesign			
	Benchmark	Kostenanalyse	Fallstudien	Aktionsforschung
1a	X	X		
1b		X		
2a	X	X	X	
2b	X	X	X	
2c			X	X
3a				X

Tabelle 7: Verwendete Forschungsdesigns

### 4.1 Benchmark

#### 4.1.1 Grundlagen

Benchmarking ist ein Management-Konzept, bei welchem die Performance verschiedener Unternehmen verglichen wird. Meist ist das Ziel, die Performance eines Unternehmens zu steigern (Wah et al., 1998). Beim Preis-Benchmarking werden Preise als Performancedimension verglichen. Dies wird beispielsweise für die Auswahl von Lieferanten verwendet (Dyer et al., 1998).

#### 4.1.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit

##### 4.1.2.1 Datenerhebung

Durch Preis-Benchmarking sollen Einblicke in den AM-Dienstleistermarkt sowie wichtige Erkenntnisse für die Dienstleisterauswahl generiert werden. Die Datenbasis wurde durch das Einholen von Angeboten für die Produktion von Referenzbauteilen mittels Laser Sintering in PA12 in verschiedenen Stückzahlen generiert. 40 Laser-Sinter-Dienstleister wurden basierend auf Wohlers (2013) und einer Google-Suche identifiziert. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die geografische Verteilung und den Rücklauf. Von den 40 Anbietern hatten 8 eine automatische Angebotsfunktion, bei welcher die Teile hochgeladen, die Spezifikation eingegeben und der Preis automatisch berechnet werden. Den anderen 32 Anbietern wurden die Teile mit einer kurzen Beschreibung des Forschungsprojekts entweder via E-Mail oder spezielles Formular zugestellt (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2).

Geografie	Anzahl Dienstleister	Anzahl Rückmeldungen
Asien	7	2
Europa	16	11
Nordamerika	17	8
Total	40	21

Tabelle 8: Geografische Verteilung und Rückmeldungen der Laser-Sinter-Dienstleister (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)

#### 4.1.2.2 Analyse

Basierend auf vorangehender Literaturrecherche werden mögliche Kostentreiber identifiziert. Durch die spezifische Konstruktion der verschiedenen Referenzteile (vergleiche Abbildung 12) und die Anfrage verschiedener Stückzahlen kann der Einfluss der verschiedenen Kostentreiber auf die Preise identifiziert werden. Um die Wichtigkeit der verschiedenen Kostentreiber zu ermitteln, wird zudem eine Regressionsanalyse durchgeführt.

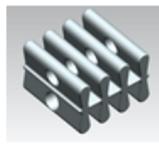
Eigenschaften	Teil A	Teil B	Teil C	Teil D	Teil E
Geometrie					
Volumen (cm <sup>3</sup> )	27	54	27	27	27
Packing Ratio	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1
Höhe (z in cm)	3	3	3	3.78	3
Komplexität	Tief	Tief	Tief	Tief	Hoch

Abbildung 12: Referenzteile für den Preis-Benchmark (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)

## 4.2 Kostenanalyse

### 4.2.1 Grundlagen

Es gibt eine grosse Anzahl von Techniken, um Kosten zu schätzen. Niazi et al. (2006) klassifizieren diese in vier Gruppen:

- Qualitativ intuitive Techniken: Diese Techniken basieren auf Erfahrung. Typischerweise wird das Wissen eines Experten genutzt, um die Kosten zu schätzen.
- Qualitativ analoge Techniken: Diese Techniken basieren auf historischen Daten von ähnlichen Produkten. Die Ähnlichkeit wird hierbei genutzt, um die Kosten für ein neues Produkt zu schätzen.
- Quantitativ parametrische Techniken: Diese Techniken schätzen die Kosten, indem sie die relevanten Bausteine, aus welchen sich die Kosten zusammensetzen, identifizieren.
- Quantitativ analytische Techniken: Diese Techniken zerlegen Produkte in ihre elementaren Bestandteile und Aktivitäten, welche zu deren Herstellung nötig sind. Diese Komponenten werden dann berechnet und aufsummiert.

Nach Niazi et al. (2006) eignen sich vor allem qualitative Techniken für den in der Forschungsfrage 1b beschriebenen Zweck. Die intuitiven Techniken sind hierbei eine gute Lösung, sofern

ein Experte grobe Kostenschätzungen durchführen kann. Für traditionelle Fertigungsverfahren beschäftigen Firmen daher oft Kosten-Ingenieure. Vielen Firmen fehlt allerdings das Know-how, um dies für AM zu tun. Daher sind analoge Techniken die vielversprechendste Option. Dabei werden Kosten von neuen Produkten basierend auf einem Datensatz von historischen Produkten geschätzt. Verknüpft werden diese über Ähnlichkeitskriterien. In dieser Dissertation werden zu diesem Zweck Mittelwertberechnungen in verschiedenen Datengruppen und Regressionsanalysen genutzt.

## **4.2.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit**

### **4.2.2.1 Datenerhebung**

Mithilfe der Kostenanalyse sollen konkrete Werkzeuge zur Kostenschätzung von AM-Bauteilen für den Alltag in Firmen geschaffen werden. Diese basiert auf einem Datensatz der Additively-Plattform, welcher im Jahr 2014 gesammelt wurde und 499 Angebote für AM-Bauteile in den Technologien Laser Sintering und Laser Melting umfasst. Die Daten umfassen Preise für die Produktion der Bauteile. Basierend auf einer begrenzten Anzahl von Beobachtungen können einige Aussagen über Preise für Nachbearbeitungen gemacht werden. Transport sowie weitere Supply-Chain-Kosten wurden nicht erfasst (Baldinger et al., 2015, Publikation 1).

### **4.2.2.2 Analyse**

In einem ersten Schritt wird überprüft, ob die Volumen-Kosten-Beziehung in Ruffo et al. (2006a) auch für Buy-Szenarien hält. Im zweiten Schritt werden die Daten nach den zwei wichtigsten Ähnlichkeitsvariablen, Gesamtvolumen und durchschnittlicher Packing Ratio, gruppiert. Die Berechnung von durchschnittlichen Kosten pro  $\text{cm}^3$  innerhalb der Gruppen ergibt Preismatrizen, welche für Kostenschätzungen verwendet werden können. Da ab einem gewissen Schwellenwert eine lineare Beziehung zwischen Gesamtvolumen und Gesamtkosten besteht, werden in einem dritten Schritt Regressionsanalysen verwendet, um ein weiteres Schätzmodell zu entwickeln. Aufgrund der limitierten Anzahl von Beobachtungen wird dies nur für Laser Sintering in PA12 durchgeführt (Baldinger et al., 2015, Publikation 1).

## **4.3 Fallstudienforschung**

### **4.3.1 Grundlagen**

Bei der Fallstudienforschung, einem empirischen Forschungsdesign, werden aktuelle Probleme in ihrem natürlichen Umfeld studiert. Dabei lassen sich nach Yin (2013) deskriptive, explorative und explanative Fallstudienforschung unterscheiden. Deskriptive Fallstudienforschung wird angewandt, wenn keine oder nur wenige theoretische Grundlagen verfügbar sind und erste Theorien zur Erklärung erarbeitet werden sollen. Explorative Fallstudien basieren auf einigen bekannten theoretischen Zusammenhängen und erweitern die vorhandenen Erkenntnisse. Explanative Fallstudien werden zur Überprüfung existierender Theorien genutzt. Ziel jeder Fallstudienforschung ist die Suche nach fallübergreifenden Mustern (Voss, 2009).

Zur Datenerhebung werden am häufigsten Interviews eingesetzt (Karlsson, 2009). Hierbei lassen sich qualitative und quantitative Interviews unterscheiden. Bei der qualitativen Interviewtechnik

wird den Befragten grosser Spielraum überlassen. Dies ermöglicht das Sammeln vieler Informationen auch über die Interviewthematik hinaus. Aufgabe des Interviewers ist es zu verhindern, dass zu weit vom Thema abgeschweift wird. Bei quantitativen Interviews hingegen sind Fragen und Ablauf klar definiert und die Antworten sollten kurz, präzise und, wenn möglich, quantifizierbar sein. Solche Interviews sind daher nur in Themengebieten möglich, in denen der Interviewer detaillierte Vorkenntnisse besitzt (Bortz et al., 2005). Daneben können weitere Methoden zur Datenerhebung genutzt werden, wie Beobachtungen oder Dokumentenanalyse.

### 4.3.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit

Als explorative Fallstudien wurden zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 zehn qualitative Interviews durchgeführt. Hierbei sollten AM-spezifische Punkte bei der Make-or-Buy-Entscheidung, der Dienstleisterauswahl und der Gestaltung der Einkaufsprozesse identifiziert werden. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Industriesektoren und die Grösse der Organisationen der Fallstudienpartner. Die Hauptanwendung von AM aller Fallstudienpartner ist Rapid Prototyping. Durch die unterschiedliche Wahl der Industriesektoren und Unternehmensgrössen werden die Generalisierbarkeit der Forschungsergebnisse sowie deren Praxisrelevanz sichergestellt. Die erkannten Muster werden fallübergreifend analysiert und zu generischen Ergebnissen kondensiert.

Fallstudie	A	B	C	D	E
Industriesektor	Maschinenindustrie	Maschinenindustrie	Automobilindustrie	Sanitärindustrie	Beratungsunternehmen
Grösse (Anzahl Mitarbeiter)	86'000	49'000	280'000	12'000	500
Fallstudie	F	G	H	I	J
Industriesektor	Maschinenindustrie	Hochschule	Maschinenindustrie	Haushaltsgeräteindustrie	Maschinenindustrie
Grösse (Anzahl Mitarbeiter)	22'000	1'431	4'000	1'700	4'000

Tabelle 9: Übersicht über die Charakteristika der durchgeführten Fallstudien

## 4.4 Aktionsforschung

### 4.4.1 Grundlagen

Bei der Aktionsforschung wird ein real existierendes Problem aus der Praxis mithilfe wissenschaftlicher Methoden gelöst. Die Lösungen werden dabei durch die enge Zusammenarbeit zwischen Praktikern und Forschern entwickelt. Hierbei werden mehrere Prozessschritte iterativ durchlaufen (Coughlan und Coughlan, 2002):

- Diagnose: Hierbei wird gemeinsam das zugrunde liegende Problem analysiert. Dabei werden wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse berücksichtigt.

- Aktionsplanung: Handlungsoptionen zur Lösung des Problems werden erarbeitet und bewertet.
- Aktionsdurchführung: Die ausgewählte Handlungsoption wird in diesem Schritt auf das Problem angewandt. Die Einflussnahme des Forschenden auf das Untersuchungsobjekt grenzt hierbei die Aktionsforschung klar von der Fallstudienforschung ab (Baskerville, 1997).
- Bewertung: Die Konsequenzen der durchgeführten Aktion werden bewertet.
- Spezifizierung: Hier werden die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse verdichtet. Als Ergebnis dieses Schritts kann auch ein nächster Zyklus der Aktionsforschung spezifiziert werden.

## 4.4.2 Anwendung innerhalb der Doktorarbeit

Die Forschungsfragen 2c und 3 sind in der Praxis aktuell vorhanden, aber von Firmen noch nicht beantwortet worden. Aus diesem Grund eignet sich hier Aktionsforschung, da das zugrunde liegende Problem gelöst werden kann und so neue Erkenntnisse für die Forschung gewonnen werden können. Die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis wurde hierbei im Rahmen des Forschungsprojekts „Additively – Procurement tools for 3D printing“ erbracht.

### 4.4.2.1 Forschungsprojekt: Additively – Procurement tools for 3D printing

**Art des Projekts:** Forschungsprojekt zusammen mit dem ETH-Spin-off Additively

**Laufzeit:** 2014–2015

**Website:** [www.additively.com](http://www.additively.com)

**Inhalt:** Additive Manufacturing, auch als 3D-Druck bezeichnet, macht momentan den Sprung vom Prototyping zur Produktionstechnologie. Die Technologie ermöglicht die Produktion auf Abruf von kundenindividuellen Produkten in kleinen Stückzahlen (im Gegensatz zur heutigen Vorab-Produktion von Grossserien). Dies führt zu einem Paradigmenwechsel bei der Interaktion zwischen Käuferfirmen und deren Produktions-Dienstleistern: Wenige grosse Bestellungen werden durch viele kleine Bestellungen unterschiedlicher Bauteile abgelöst. Die heutigen Einkaufsprozesse in der Auftragsfertigung funktionieren grösstenteils noch manuell und sind daher aufgrund des hohen administrativen Aufwands nicht für die vielen kleinen Bestellungen bei AM geeignet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die erste E-Procurement-Lösung spezifisch für AM entwickelt, die die oben genannte Situation adressiert.

**Nutzung und Relevanz:** Eine vierstellige Anzahl von Angebotsanfragen für AM-Teile im Wert eines höheren siebenstelligen CHF-Betrags wurden über die Additively-Plattform abgewickelt. Mehrere tausend Nutzer sind auf der Plattform aktiv (Stand Oktober 2015). Basierend auf auftretenden Herausforderungen und Feedbackloops mit den Nutzern wurden die Plattform und die zugrunde liegenden Prozesse kontinuierlich weiterentwickelt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Zuordnung der Publikationen zu den Forschungsfragen

Tabelle 10 veranschaulicht die Zuordnung der einzelnen Publikationen zu den in Kapitel 3 beschriebenen Forschungsfragen.

Nr.	Titel der Publikation	Wertung	1. Kosten	2. Supply Chain	3. Einstieg
1	Additive Manufacturing Cost Estimation for Buy Scenarios	A	X	X	
2	Price benchmark of laser sintering service providers	B	X	X	
3	Ansätze zum Management der Additive Manufacturing Supply Chain	B		X	
4	Digitales Ersatzteilmanagement mittels 3D-Druck	B			X
5	Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren	C			X
6	Best Practice beim Kauf von Bauteilen aus dem 3D-Drucker	C		X	
7	Was steckt hinter dem Schlagwort 3D-Druck	D		X	X
8	3D-Drucker revolutionieren die Supply Chain	D		X	
9	Herausforderungen beim Einstieg in 3D-Druck	C			X
10	Das volle Potential von Additive Manufacturing braucht den richtigen Beschaffungsprozess	C		X	

Tabelle 10: Publikationen und Zuordnung zu den Forschungsfragen (vergleiche auch 1.4)

## 5.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1

### 5.2.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1a: Welche Geschäfts- und Preismodelle existieren auf dem AM-Dienstleistermarkt?

Wie in Abschnitt 2.2.1.2 erläutert, existiert bis anhin erst wenig Wissen über Geschäfts- und Preismodelle auf dem AM-Dienstleistermarkt. Da viele Firmen aber Bauteile bei Dienstleistern beziehen, dient die Forschungsfrage 1a zur Beantwortung folgender Fragen:

- Welche Kostentreiber für AM sind unter Kontrolle einer Firma?
- Welche dieser Kostentreiber schlagen sich in den Preismodellen der Dienstleister als Preistreiber nieder?
- Welche Preisspannen existieren auf dem Dienstleistermarkt?
- Existiert die von Ruffo et al. (2006a) identifizierte typische Kostenkurve auch als Preiskurve auf dem Dienstleistermarkt?
- Welche Geschäftsmodelle existieren bei Dienstleistern?

Die hier präsentierten Resultate basieren auf Baldinger und Duchi (2013, Publikation 2) und Baldinger et al. (2015, Publikation 1) und sind grösstenteils direkt von diesen übersetzt. Die Ergebnisse sind, falls nicht anders vermerkt, für die Technologie Laser Sintering in PA12 gültig. Die Preiskurven wurden zudem für Laser Melting in Edelstahl und Aluminium erstellt.

#### 5.2.1.1 Kostentreiber unter Kontrolle einer Firma

Nur ein Teil der in der Literatur identifizierten Kostentreiber ist unter Kontrolle einer Firma, welche AM-Bauteile einkauft, und daher relevant für diese. Beispielsweise ist die Auslastung des Bauraums nicht unter deren Kontrolle, kann aber gegebenenfalls durch die Bestellmenge beeinflusst werden. Die Bestellmenge kann daher ein relevanter Kostentreiber sein, die Auslastung des Bauraums aber nicht. Tabelle 11 fasst die vorgeschlagenen Treiber der Kosten pro  $\text{cm}^3$  für Firmen zusammen. Die Bauteilparameter sind die eigentlichen Eigenschaften des Bauteils. Kosten pro  $\text{cm}^3$  sollten:

- Abnehmen mit zunehmendem Volumen aufgrund fixer Handling-Kosten pro Teil.
- Zunehmen mit abnehmender Packing Ratio, da weniger Bauteile in den Bauraum passen.
- Zunehmen mit zunehmender Höhe, sofern die Maschine schlecht ausgelastet ist.
- Zunehmen mit kleineren Toleranzen, da spezifische Bauteilorientierungen, restriktivere Recyclingraten und aufwendigere Qualitätssicherungsprozesse eingehalten werden müssen.

Die Produktionsparameter können meist nicht durch die Firma beeinflusst werden. Die Schichtdicke kann aber teilweise durch die Firma gewählt werden. Kosten pro  $\text{cm}^3$  sollten:

- Zunehmen mit abnehmender Schichtdicke aufgrund zunehmender Bauzeit.

Zuletzt beeinflussen die Bestellungsparameter die Kosten. Kosten pro  $\text{cm}^3$  sollten:

- Abnehmen mit zunehmender Stückzahl, sofern der Bauraum nicht vollständig ausgelastet ist. Wenn verschiedene Bauteile kombiniert werden, um den Bauraum komplett auszulasten, sollten Kosten nicht von der Stückzahl abhängen.
- Zunehmen mit kürzerer Lieferfrist, da freie Kapazität vorgehalten werden muss.

Bauteilparameter	Produktionsparameter	Bestellungsparameter
Volumen	Schichtdicke	Stückzahl
Packing Ratio		Lieferfrist
Höhe (Z-Richtung)		
Toleranz		

Tabelle 11: Kostentreiber unter Kontrolle einer Firma

Im kommenden Abschnitt wird überprüft, welche der vorgeschlagenen Kostentreiber relevant für die Preise von AM-Teilen und somit Preistreiber sind.

### 5.2.1.2 Preistreiber

Die Benchmark-Teile wurden so konstruiert, dass sich durch den Vergleich der Preise der verschiedenen Teile testen lässt, welche Bauteilparameter die Preise beeinflussen. Tabelle 12 zeigt, bei wie viel Prozent der Dienstleister einer der Treiber relevant ist bei der Preisberechnung, bei Stückzahl 1 bzw. bei Stückzahl 100. Beispielsweise ist Packing Ratio bei 76 % der Dienstleister preisrelevant bei Stückzahl 100. Stückzahl ist bei 90 % der Dienstleister relevant.

Preistreiber	% relevant bei Stückzahl 1	% relevant bei Stückzahl 100
Volumen	82 %	76 %
Packing Ratio	50 %	76 %
Höhe (Z-Richtung)	27 %	14 %
Komplexität	9 %	19 %
Stückzahl	-	90 %

Tabelle 12: Prozentsatz der Dienstleister, bei denen der jeweilige Preistreiber Anwendung findet (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)

Variabel	Koeffizient	Standardfehler	P-Wert
Achsenabschnitt	10,82	4,79	0,04
Volumen (cm <sup>3</sup> )	-0,03	0,02	0,17
Packing Ratio	-1,31	1,53	0,39
Höhe (cm)	0,10	0,79	0,90
Komplexität (0, 1)	0,01	0,61	0,98
Schichtdicke (mm)	-24,60	9,80	0,01
Toleranz (mm)	-2,43	3,01	0,42
Stückzahl (#)	-0,03	0,01	< 0,01
Lieferfrist (Tage)	0,02	0,05	0,52

Tabelle 13: Regression von potentiellen Preistreibern auf Preis pro cm<sup>3</sup> (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2)

Zudem wurde der Einfluss der verschiedenen Preistreiber durch Regression analysiert. Dabei wurden Volumen, Packing Ratio, Höhe, Komplexität (kodiert als 1 für hoch und 0 für tief), Schichtdicke, Toleranz, Stückzahl und Lieferfrist auf Preis pro  $\text{cm}^3$  regressiert. Die Resultate können in Tabelle 13 gefunden werden. Die Richtung der Wirkung ist wie vorausgesagt, abgesehen von Lieferfrist. Entgegen den Erwartungen ergeben längere Lieferzeiten höhere Preise. Allerdings sind Höhe, Komplexität und Lieferfrist hoch insignifikant (P-Wert über 0.5). Nach kontinuierlicher Elimination der insignifikanten Variablen sind einzig Volumen, Stückzahl und Schichtdicke relevante Preistreiber bei einem 95%-Konfidenzintervall.

Neben den relevanten Preistreibern in der Regression hat Packing Ratio bei den meisten Dienstleistern einen Einfluss auf den Preis (bei 76 % bei Stückzahl 100 und bei 50 % bei Stückzahl 1).

Höhe, Komplexität und Lieferfrist scheinen die am wenigsten wichtigen Preistreiber zu sein. Trotzdem werden Höhe und Komplexität bei einigen wenigen Dienstleistern bei der Preisberechnung berücksichtigt (vergleiche Tabelle 12). Zu Toleranz kann leider keine abschliessende Aussage getroffen werden. In der Regression ist sie nicht signifikant. Dies bedeutet, dass die von den Dienstleistern veranschlagten Toleranzen keinen Einfluss auf die Preise haben. Allerdings wurden die realisierten Toleranzen nicht überprüft, was eine Limitation dieser Untersuchung darstellt. Es wäre interessant den Einfluss der wirklich erzielten Toleranzen auf die Preise besser zu verstehen.

Als Resultat lässt sich festhalten, dass Dienstleister unterschiedliche Treiber in der Preisberechnung berücksichtigen und daher keine abschliessende Liste mit Preistreibern erstellt werden kann. Die wichtigsten Preistreiber sind Volumen, Stückzahl, Packing Ratio und Schichtdicke. Anzumerken ist, dass Schichtdicke ein Produktionsparameter und nicht zwingend unter Kontrolle der Firma ist. Meist wird die Schichtdicke von den Dienstleistern so festgelegt, dass die benötigten Eigenschaften und Toleranzen erfüllt werden.

### 5.2.1.3 Preisspanne auf dem Dienstleistermarkt

Abbildung 13 zeigt einen Boxplot für die angebotenen Preise pro  $\text{cm}^3$  bei Stückzahl 1. Es existiert eine grosse Preisspanne. Beispielsweise reichen die Preise pro  $\text{cm}^3$  für Bauteil A von 0,46 bis 12,79 EUR, was einem Faktor von 28 entspricht.

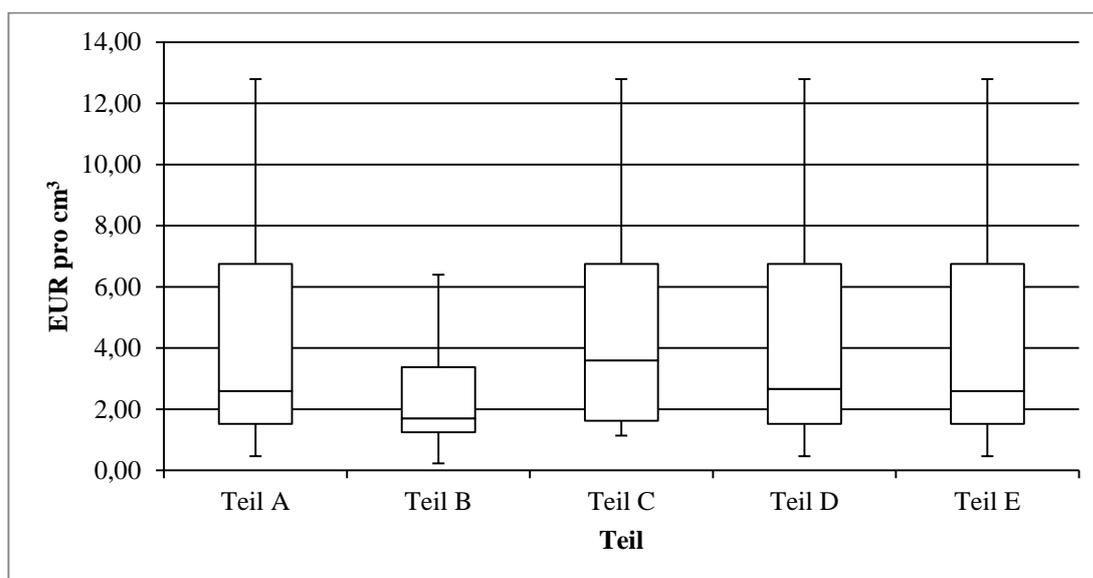


Abbildung 13: Angebotener Preis pro  $\text{cm}^3$  bei Stückzahl 1 in EUR

Abbildung 14 zeigt einen Boxplot für die angebotenen Preise pro  $\text{cm}^3$  bei Bestellmenge 100. Die Preisspanne ist tiefer als bei Stückzahl 1. Für Bauteil A reicht sie beispielsweise von 0,32 bis 2,22 EUR pro  $\text{cm}^3$ , was einem Faktor von 7 entspricht.

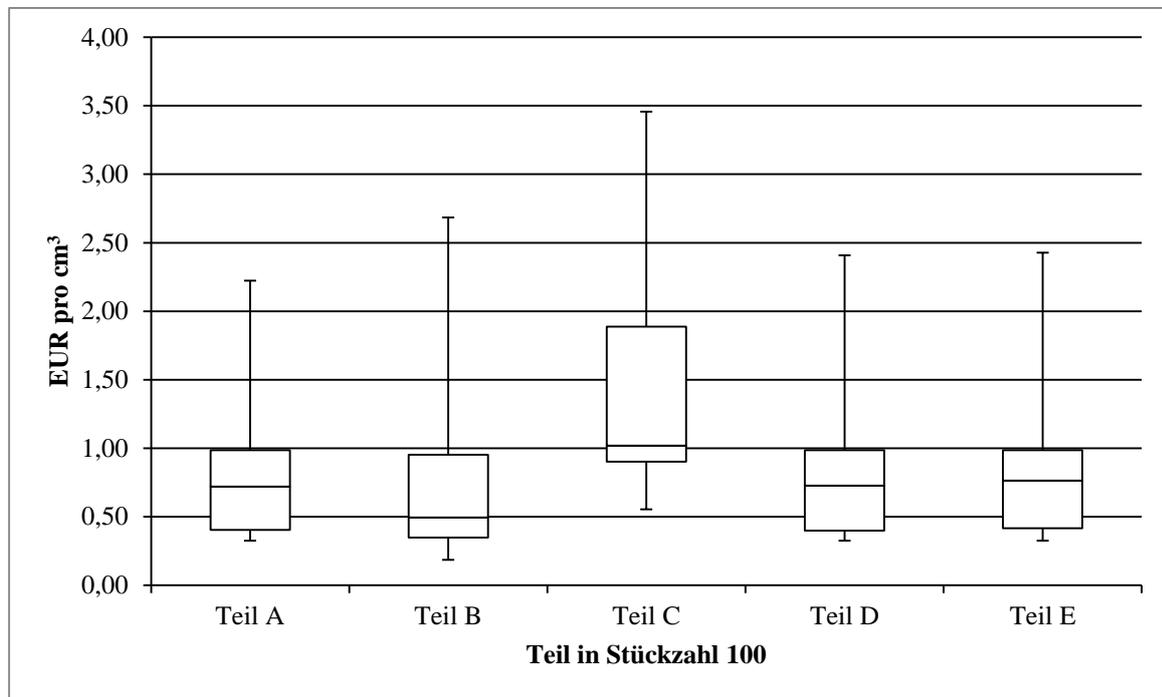


Abbildung 14: Angebotener Preis pro  $\text{cm}^3$  bei Stückzahl 100 in EUR

Die Resultate zeigen sehr grosse Preisunterschiede zwischen den verschiedenen Dienstleistern. Dies trifft insbesondere bei Stückzahl 1 zu. Der Effekt von Stückzahl auf den Preis soll daher im nächsten Abschnitt detaillierter analysiert werden.

#### 5.2.1.4 Preiskurve auf dem Dienstleistermarkt

Abbildung 15, Abbildung 17 und Abbildung 16 zeigen die durchschnittliche Preiskurve basierend auf totalem Volumen (Volumen pro Bauteil \* Stückzahl). Die Preise pro  $\text{cm}^3$  fallen bis zu einem totalen Volumen von etwa  $500 \text{ cm}^3$  für PA12 und etwa  $100 \text{ cm}^3$  für Edelstahl und Aluminium. Nach diesem Schwellenwert bleiben die Kosten pro  $\text{cm}^3$  jeweils stabil. Da der typische Bauraum bei Laser Sintering grösser ist als bei Laser Melting, könnte dies den höheren Schwellenwert erklären. Die durchschnittlichen auf dem Dienstleistermarkt realisierten Preise folgen somit der Kostenkurve, welche Ruffo et al. (2006a) für Maschinenbetreiber identifizierten.

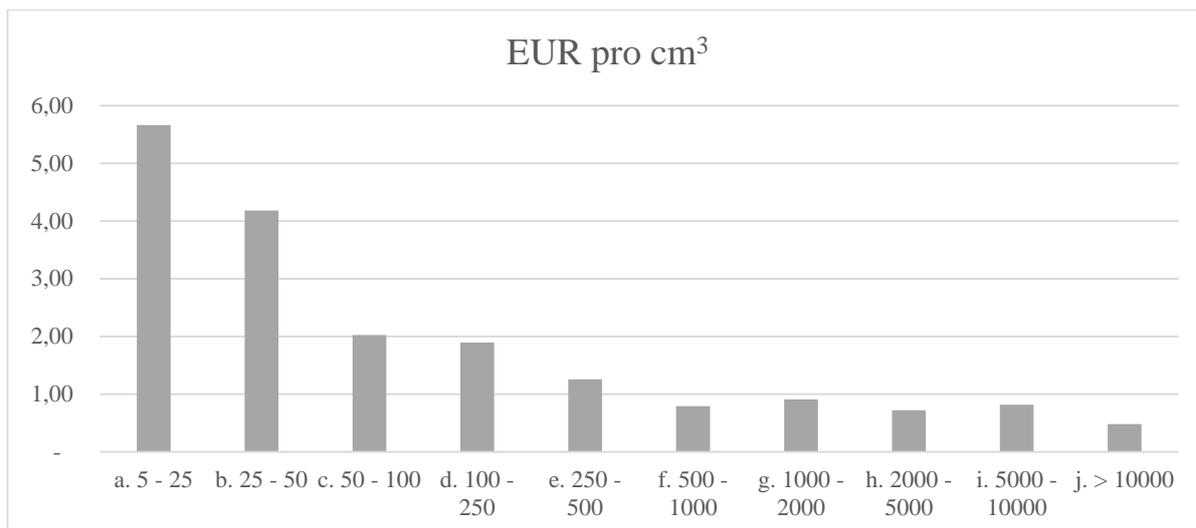


Abbildung 15: EUR pro cm<sup>3</sup> für PA12 für verschiedene totale Volumen-Klassen

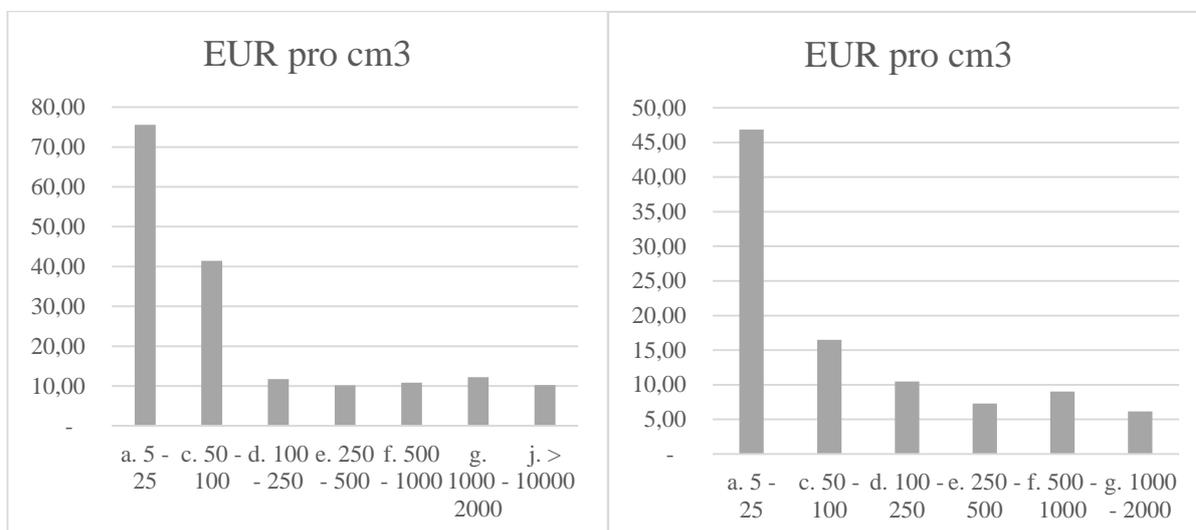


Abbildung 17: EUR pro cm<sup>3</sup> für Edelstahl

Abbildung 16: EUR pro cm<sup>3</sup> für Aluminium

### 5.2.1.5 Geschäftsmodelle von Dienstleistern

Im Durchschnitt folgt die Preisstruktur auf dem Dienstleistermarkt der Kostenkurve im Make-Szenario von Ruffo et al. (2006a). Da Dienstleister, wie in Abschnitt 5.2.1.2 beschrieben, unterschiedliche Preistreiber berücksichtigen, muss dies aber nicht zwingend für alle Anbieter gelten. Um den Einfluss von Stückzahl (oder totalem Volumen) besser zu verstehen, werden die Preise pro cm<sup>3</sup> bei Stückzahl 1 gegen die Preise pro cm<sup>3</sup> bei Stückzahl 100 in Abbildung 18 geplottet. Die gestrichelte Linie zeigt an, wo die Preise pro cm<sup>3</sup> bei beiden Stückzahlen identisch sind. Zwei verschiedene Gruppen von Dienstleistern existieren. Dienstleister in Gruppe A nahe bei der gestrichelten Linie verlangen ähnliche Preise pro cm<sup>3</sup> bei Stückzahl 1 und 100. Auf der anderen Seite verrechnen Anbieter in Gruppe B höhere Preise bei kleinen Mengen (zwischen 5 und 10 EUR pro cm<sup>3</sup>) als bei grossen Mengen (zwischen 0,5 und 1 EUR pro cm<sup>3</sup>). Diese Preise folgen somit den Kosten, wenn die Bauteile einer Bestellung alleine im Bauraum gefertigt werden (abnehmende Kosten mit zunehmender Stückzahl / totalem Volumen, wie von Ruffo et al. (2006a) berichtet). Deshalb schlägt der Autor dieser Dissertation in Publikation 2 vor, diese Gruppe als „Bestellungserfüller“ („Order Fulfillers“) zu bezeichnen, welche ein Kosten-plus-

Marge-Preismodell auf jede einzelne Bestellung anwenden. Auf der anderen Seite verlangt Gruppe A ähnliche Preise pro  $\text{cm}^3$ , wenn 1 oder 100 Teile bestellt werden. Die Preisreduktion kann wahrscheinlich als Mengenrabatt angesehen werden. Diese Dienstleister scheinen Bestellungen verschiedener Firmen zu konsolidieren, um eine hohe Auslastung des Bauraums sicherzustellen. Die Kosten werden dann gleichmässig auf alle Bauteile heruntergebrochen. Somit sind die Preise unabhängig von der Stückzahl. Diese Anbieter werden vom Autor daher als „Konsolidierer“ („Consolidators“) bezeichnet. Somit wurden zwei verschiedene Preismodelle von Dienstleistern identifiziert. Zwischen diesen zwei Gruppen existieren verschiedene Dienstleister, die vermutlich einen Mix dieser zwei Modelle anwenden.

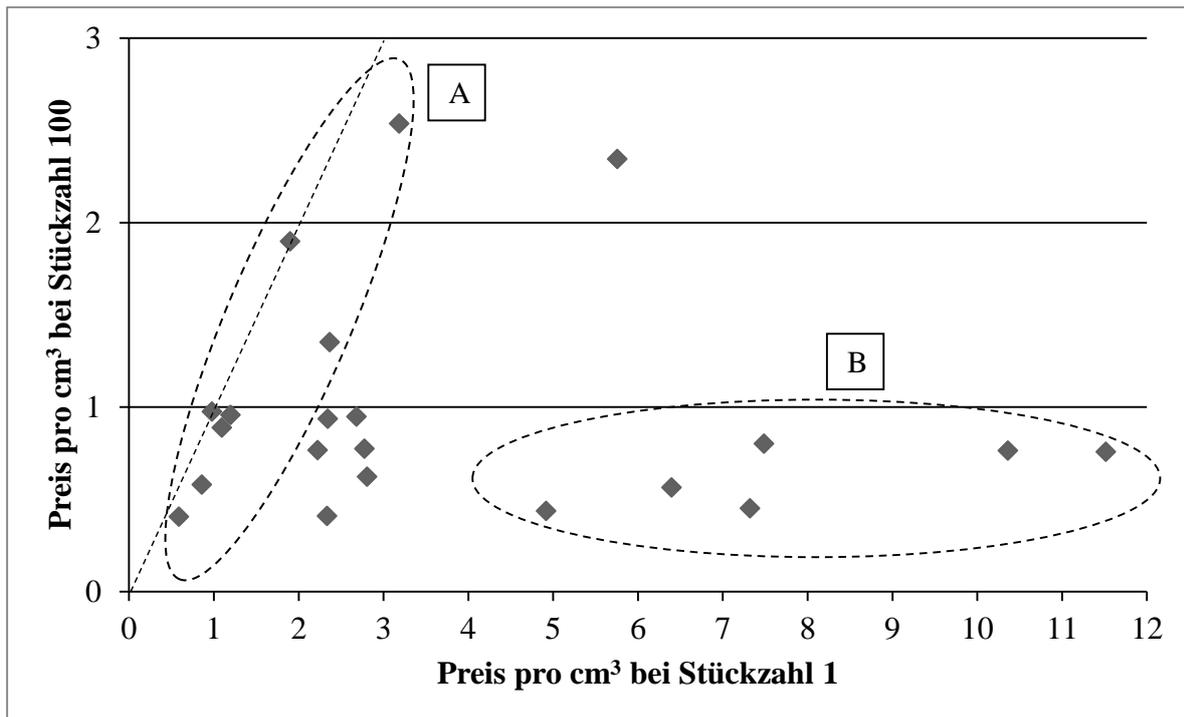


Abbildung 18: Plot von Preis pro  $\text{cm}^3$  bei Stückzahl 1 gegen Preis pro  $\text{cm}^3$  bei Stückzahl 100 in EUR

Tabelle 14 fasst Durchschnittspreise, Schichtdicke und Lieferfrist der zwei Gruppen von Dienstleistern zusammen. Wie besprochen, sind die Preise bei Stückzahl 1 bei den Bestellungserfüllern (Gruppe B) höher als bei den Konsolidierern (Gruppe A). Bei Stückzahl 100 verhalten sich die Preise umgekehrt. Da die Konsolidierer das Risiko der Auslastung des Bauraums tragen, ist es plausibel, dass sie dieses Risiko durch eine höhere Marge kompensieren. Da bei Stückzahl 100 der Bauraum bei beiden Gruppen gut ausgelastet ist, könnte dies aufgrund der höheren Marge der Konsolidierer die höheren Preise erklären. Die durchschnittliche Lieferfrist ist bei den Konsolidierern höher, da diese mehr Flexibilität benötigen, um eine hohe Auslastung zu erreichen. Die Bestellungserfüller arbeiten durchschnittlich mit feineren Schichtdicken. Ein möglicher Grund könnte sein, dass sie durch die Spezialisierung auf grosse Bestellungen mehr Serienteile produzieren. Bei Serienteilen steht die Qualität im Fokus, was die feineren Schichten erklären könnte. Abschliessend lässt sich dies allerdings nicht beantworten.

Grundsätzlich zeichnen sich hier zwei unterschiedliche Geschäftsmodelle ab. Eine Analogie hierzu kann beispielsweise im Transportwesen gefunden werden. Dort gibt es mit den Paketservice-Anbietern ebenfalls Konsolidierer und mit den FTL-Linehaul-Anbietern Bestellungserfüller.

Geschäftsmodell	EUR pro cm <sup>3</sup> (Stückzahl 1)	EUR pro cm <sup>3</sup> (Stückzahl 100)	Schichtdicke (mm)	Lieferfrist (Tage)
Konsolidierer	1,52	1,20	0,13	6,88
Bestellungserfüller	8,00	0,63	0,11	4,00

*Tabelle 14: Durchschnitt von Preis pro cm<sup>3</sup> bei Stückzahl 1 bzw. 100, Schichtdicke und Lieferfrist von Bestellungserfüllern und Konsolidierern*

## **5.2.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 1b: Wie können Kosten von AM-Bauteilen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess abgeschätzt werden, wenn diese bei Dienstleistern gefertigt werden (Buy-Szenario)?**

Wie in Abschnitt 2.2.1.3 erläutert, brauchen Firmen Werkzeuge, um die Kosten von AM-Bauteilen früh im Produktentwicklungsprozess abzuschätzen. Da viele Firmen Bauteile bei Dienstleistern produzieren lassen, entwickelt die Forschungsfrage 1b für diesen Zweck ein qualitatives Schätzmodell, um Preise abzuschätzen. Die hier präsentierten Resultate basieren auf Baldinger et al. (2015, Publikation 1) und sind grösstenteils direkt von diesen übersetzt.

### **5.2.2.1 Preismatrizen**

Wie in Abschnitt 5.2.1.2 identifiziert, sind Volumen, Stückzahl und Packing Ratio die drei wichtigsten Preistreiber einer Bestellung, welche sicher unter Kontrolle einer Firma sind. Zur analogen Kostenschätzung werden daher die zwei Ähnlichkeitsvariablen totales Volumen (= Volumen \* Stückzahl) und Packing Ratio verwendet. Durch Gruppierung der Daten ergibt sich die Preismatrize in Tabelle 15 für Laser Sintering in PA12. Der Preis pro cm<sup>3</sup> sollte von links nach rechts (mit zunehmender Packing Ratio) und von oben nach unten (mit zunehmendem totalem Volumen) abnehmen. Alle Felder mit mindestens fünf Beobachtungen (welche fett hervorgehoben sind) erfüllen diese Beziehung. Diese gut definierten Felder repräsentieren typische Laser-Sintering-Teile. Für untypische Teile in den nicht gut definierten Feldern kann Extrapolation verwendet werden, um die Kosten pro cm<sup>3</sup> zu schätzen.

Für Laser Melting in Edelstahl und Aluminium ist die Anzahl von Beobachtungen limitiert, was zu vielen nicht gut definierten Feldern in den Preismatrizen in Tabelle 16 und Tabelle 17 führt. Die Matrizen liefern trotzdem eine gute Grundlage für grobe Kostenschätzungen.

Die minimalen Preise liegen bei 0,147 EUR pro cm<sup>3</sup> für PA12, 3,43 EUR pro cm<sup>3</sup> für Edelstahl und 3,23 EUR pro cm<sup>3</sup> für Aluminium.

EUR pro cm <sup>3</sup>	Packing-Ratio-Gruppe			
Totales-Volumen-Gruppe (cm <sup>3</sup> )	a. < 0,05	b. 0,05 – 0,1	c. 0,1 – 0,5	e. 0,5 – 1
a. 5 – 25	4,71	<b>8,38</b>	<b>5,42</b>	<b>4,95</b>
b. 25 – 50	15,96	<b>4,18</b>	<b>3,69</b>	
c. 50 – 100	3,48	<b>2,17</b>	<b>1,91</b>	1,33
d. 100 – 250	<b>2,74</b>	<b>2,29</b>	<b>1,70</b>	1,23
e. 250 – 500	1,65	<b>1,52</b>	<b>1,11</b>	1,71
f. 500 – 1000		0,79	<b>0,79</b>	0,77
g. 1000 – 10000	<b>1,61</b>	<b>0,98</b>	<b>0,71</b>	0,40
h. > 10000			<b>0,48</b>	

Tabelle 15: Kostenmatrize Laser Sintering PA12 (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

EUR pro cm <sup>3</sup>	Packing-Ratio-Gruppe		
Totales-Volumen-Gruppe (cm <sup>3</sup> )	a. < 0,05	b. 0,05 – 0,1	c. 0,1 – 0,5
a. 5 – 25		79,99	75,05
c. 50 – 100			<b>41,42</b>
d. 100 – 250			11,73
e. 250 – 500		12,40	6,87
f. 500 – 1000		19,28	7,99
g. 1000 – 10000		15,77	<b>10,84</b>
h. > 10000	10,26		

Tabelle 16: Kostenmatrize Laser Melting Edelstahl (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

EUR pro cm <sup>3</sup>	Packing-Ratio-Gruppe		
Totales-Volumen-Gruppe (cm <sup>3</sup> )	a. < 0,05	b. 0,05 – 0,1	c. 0,1 – 0,5
a. 5 – 25		46,87	
c. 50 – 100		<b>16,51</b>	
d. 100 – 250	10,49		
e. 250 – 500		<b>7,30</b>	
f. 500 – 1000	7,57	<b>9,51</b>	
g. 1000 – 10000		6,38	5,80

Tabelle 17: Kostenmatrize Laser Melting Aluminium (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

### 5.2.2.2 Regressionsanalyse

Für die Laser-Sintering-PA12-Angebote mit totalem Volumen über 500 cm<sup>3</sup> werden die Variablen totales Volumen, totale Bounding Box, Anzahl Teile und maximale Höhe auf totale Preise (= Preise pro cm<sup>3</sup> \* totales Volumen) regressiert. Maximale Höhe ist hierbei hoch insignifikant mit einem P-Wert von 0.81 und wird daher aus der Regression eliminiert. Tabelle 18 fasst die Resultate der Regressionsanalyse der bei einem 95%-Konfidenzlevel signifikanten Variablen zusammen.

Regressionsstatistik				
Multiple R	0,95027			
R Square	0,903013			
Angepasstes R Square	0,90102			
Standardfehler	1334,517			
Beobachtungen	150			
	Koeffizient	Standardfehler	T-Stat	P-Wert
Achsenabschnitt	459,2793	120,5703	3,809223	0,000205
Totales Volumen	0,213105	0,013257	16,07543	4,11E-34
Totale Bounding Box	0,019741	0,00263	7,507003	5,5E-12
Anzahl Teile	2,567172	0,192242	13,35389	4,39E-27

Tabelle 18: Regression mit nur signifikanten Variablen (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

Dies ergibt die folgende Formel für die Schätzung von Preisen von Bauteilen in PA12 mit einem Volumen über 500 cm<sup>3</sup>:

$$C_{tot} = 459 + 0.213 * V_{tot} + 0.0197 * BB_{tot} + 2.57 * Q_{tot}$$

### 5.2.2.3 Empfehlung für Kostenschätzungen

Die Resultate der Schätzmodelle werden anhand der Preise aus dem Benchmark (Baldinger und Duchi, 2013, Publikation 2) in Tabelle 19 validiert. Da die Resultate der Preismatrizen vielversprechender aussehen und das Regressionsmodell nur für Teile über 500 cm<sup>3</sup> angewandt werden kann, empfiehlt der Autor in Publikation 1 die Nutzung der Preismatrizen zur Schätzung von Bauteilkosten früh im Produktentwicklungsprozess.

Ingenieure können die Preismatrizen nutzen, um die Kosten für die Produktion von Bauteilen auf dem Dienstleistermarkt mittels totalem Volumen und Packing Ratio zu schätzen. Diese zwei Variablen sollten schon zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses grob verfügbar sein. Daher erfüllen die Modelle den angestrebten Zweck. Des Weiteren wurden minimale Preise von 0,14 EUR für PA12, 3,43 EUR für Edelstahl und 3,23 EUR für Aluminium gefunden. Dies gibt einen Anhaltspunkt, bei welchen Kosten gelandet werden kann, wenn Bauteile und Bestellungen dahingehend optimiert werden.

Teile	Totales Volumen	Pack Ratio	# von Teilen	Materi al	EUR pro cm <sup>3</sup>	Preisma trizen	Differe nz	Regress ion	Differe nz
A (1)	27	0,50	1	PA12	4,20	3,69	-12 %		
A (100)	2'700	0,50	100	PA12	0,87	0,71	-19 %	0,53	-40 %
B (1)	54	0,50	1	PA12	2,48	1,91	-23 %		
B (100)	5'400	0,50	100	PA12	0,74	0,71	-4 %	0,39	-47 %
C (1)	27	0,10	1	PA12	4,70	4,18	-11 %		
C (100)	2'700	0,10	100	PA12	0,90	0,98	9 %	0,68	-24 %

Tabelle 19: Kostenvergleich Benchmark mit Schätzmodellen (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

## 5.3 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2

Wie in Abschnitt 2.2.2.2 erläutert, existiert bis anhin erst wenig Wissen darüber, welche AM-spezifischen Punkte Firmen beachten sollten, wenn sie die folgenden Fragen zum Supply-Chain-Design beantworten:

- Make-or-Buy: Wie sehen Make- und Buy-Szenario in Bezug auf Kosten und Risiken aus?
- Was gilt es bei der Auswahl der AM-Dienstleister zu beachten?
- Wie müssen Einkaufsprozesse für die Zusammenarbeit mit AM- Dienstleistern ausgestaltet werden?

Die hier präsentierten Resultate basieren auf Baldinger et al. (2015, Publikation 1), Baldinger und Duchi (2013, Publikation 2), Baldinger (2015, Publikation 3), Baldinger (2014, Publikation 6), Baldinger et al. (2015, Publikation 7) und Baldinger (2015, Publikation 10) und sind grösstenteils direkt von diesen übersetzt oder übernommen.

### 5.3.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2a: Make-or-Buy: Wie sehen Make- und Buy-Szenario in Bezug auf Kosten und Risiken aus?

#### 5.3.1.1 Kosten

Zentral für die Make-or-Buy-Frage sind die in den jeweiligen Szenarien zu erzielenden Kosten. Bis anhin hat einzig die Studie von Ruffo et al. (2007) diesen Vergleich für zwei Referenzbauteile durchgeführt. Sie kam zu dem Schluss, dass der AM-Dienstleistermarkt im Jahr 2007 nicht kompetitiv genug und die Kosten im Vergleich zu einem Make-Szenario daher zu hoch waren.

Mit den Preismatrizen aus Abschnitt 5.2.2.1 existiert ein Werkzeug, um Kosten für das Buy-Szenario einfach abzuschätzen. Tabelle 20 zeigt die Resultate, wenn die Preise von Bauteilen aus anderen Kostenstudien geschätzt und verglichen werden. Der erste Vergleich mit der Studie von Ruffo et al. (2007) zeigt, dass die Preise auf dem Dienstleistermarkt in den vergangenen Jahren

stark gesunken sind. Die geschätzten Preise für die zwei Referenzteile liegen 63 % bzw. 42 % tiefer.

Der Vergleich der geschätzten Preise mit den in den Make-Studien ermittelten Kosten ermöglicht eine quantitative Aussage zur Make-or-Buy-Frage. Verglichen mit Ruffo und Hague (2007) und Baumers et al. (2012) ergeben die Matrizen leicht tiefere Preise. Einzig die Studie von Ruffo et al. (2006a) fand tiefere Kosten. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, dass die Autoren die Auslastung des Bauraums dahingehend optimierten, minimale Kosten zu erreichen. Zur Erstellung der Preismatrizen wurden reale Bestellungen verwendet, welche nicht zur Minimierung der Kosten optimiert wurden. Zudem berechnen die Matrizen durchschnittliche Marktpreise. Dies bedeutet, dass durch den Vergleich mehrerer Angebote typischerweise bessere Preise erzielt werden können. Die Resultate legen daher nahe, dass heute im Make- und Buy-Szenario vergleichbare Kosten realisiert werden können. Als weiterer Punkt gilt zu beachten, dass viele Firmen keine ausreichenden Volumen an Bauteilen haben, um AM-Maschinen gut auszulasten. Ist dies der Fall, erhöhen sich die Kosten im Make-Szenario schnell. Firmen tragen im Make-Szenario das Risiko der Auslastung.

Studie	Make-or-buy	Teile	Totales Volumen	Pack Ratio	# von Teilen	Materi al	EUR pro cm <sup>3</sup> Studie	Preism atrizen	Differ enz
Ruffo et al. (2007)	Buy	Rotary knob	881	0,38	100	PA12	2,13	0,79	-63 %
		Belt cover	2'228	0,04	10	PA12	2,77	1,61	-42 %
Ruffo et al. (2006 a)	Make	Lever	7'110	0,12	1'000	PA12	0,49	0,71	44 %
Ruffo und Hague (2007)	Make	Basket	470'164	0,08	20'200	PA12	0,81	0,67	-18 %
Baumers et al. (2012)	Make	Basket	497	0,27	85	Edelstahl	8,67	6,87	-21 %

Tabelle 20: Kostenvergleich mit bestehenden Studien (Baldinger et al., 2015, Publikation 1)

### 5.3.1.2 Risiken

Neben den Kosten müssen die damit verbundenen Risiken bei der Make-or-Buy-Entscheidung beachtet werden. Ein zentraler Punkt bei dieser Betrachtung basiert darauf, dass AM für eine ganze Reihe unterschiedlicher Technologien steht und somit jede Anwendung mit verschiedenen Technologien umgesetzt werden kann. Dies soll anhand eines Beispiels illustriert werden. Wenn eine Firma Bauteile aus Edelstahl benötigt, können diese auf sechs verschiedenen Wegen mittels AM realisiert werden:

1. Die Teile können mittels Laser Melting direkt einstufig aus Edelstahl aufgebaut werden.
2. Die Teile können mittels Electron Beam Melting direkt einstufig aus Edelstahl aufgebaut werden.
3. Mit Binder Jetting können die Teile in einem direkten mehrstufigen Prozess hergestellt werden. Im ersten Schritt wird mittels Binder Jetting Metallpulver zu einem Grünteil verklebt. Das so entstandene Grünteil wird in einem Ofenprozess gesintert und infiltriert.
4. Die Teile können allerdings auch durch Binder Jetting in einem indirekten Prozess hergestellt werden. Hierbei wird nicht das Teil als solches aufgebaut, sondern eine Form (also ein Negativ) aus Giessereisand. Die Teile können danach aus Edelstahl im Sandgussverfahren hergestellt werden.
5. Stereolithography kann in einem anderen indirekten Prozess verwendet werden. Hierbei wird ein Urmodell (also ein Positiv) durch die UV-aktivierte Aushärtung eines flüssigen Fotopolymer-Bades aufgebaut. Dieses wird abgeformt, um Wachsmodele zu erstellen, die als verlorene Formen im Feinguss verwendet werden.
6. Als letzte Variante kann Material Jetting verwendet werden, um die verlorenen Wachsmodele direkt herzustellen.

Welches die richtige Technologie für die Bauteile ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum ersten hängt es von dem Bauteil selbst ab, insbesondere dem Volumen und der Komplexität. Zudem sind die mechanischen und chemischen Anforderungen an das Bauteil entscheidend. Auch die benötigte Stückzahl hat einen Einfluss auf die Wahl. Die sechs Alternativen haben zudem unterschiedliche Vorlaufzeiten.

AM-Equipment ist teuer (mehrere 10'000 bis > 1'000'000 CHF), weshalb sich eine Firma meist für eine oder einige wenige Technologien entscheiden muss, wenn diese im Haus betrieben werden sollen. Bei der Make-or-Buy Entscheidung ist meist nicht klar, welche AM-Anwendungen in den kommenden Jahren realisiert werden sollen. Welche Technologien die Firma benötigt, lässt sich daher nicht mit Sicherheit beantworten. Ein Make-Szenario ist somit mit einem hohen Risiko verbunden, da der Business Case für das Investment auf der Annahme beruht, dass sich die Anwendungen der nächsten Jahre mit der gewählten Technologie umsetzen lassen. Ist dies nicht der Fall wird die Maschine schlecht ausgelastet sein und der angestrebte Return on Investment wird sich nicht realisieren lassen. Erschwerend kommt hinzu, dass neue Technologien entwickelt werden, wie beispielsweise die CLIP-Technologie von Carbon3D (2015) oder der Multi-Jet Fusion Technologie von HP (HP 3D printing (2015)). Die Zusammenarbeit mit Dienstleistern erlaubt die Verminderung des Risikos und gibt maximale Flexibilität, sodass immer die optimale Technologie für eine Anwendung genutzt werden kann.

### **5.3.1.3 Weitere Gesichtspunkte**

Die Zusammenarbeit mit Dienstleistern bringt weitere Vorteile mit sich. Bei Dienstleistern kann immer auf das neuste Equipment und die neusten Technologien zugegriffen werden. Zudem ist für AM viel spezifisches Knowhow nötig. Anders als in den Medien suggeriert, ist AM keine „Plug-and-play“-Anwendung. Ein optimales Resultat kann nur dank der Erfahrung des Maschinenoperators erzielt werden (Gebhardt, 2007). Auch hier sind Dienstleister häufig im Vorteil.

Eine Investition in AM lohnt sich vor allem dann, wenn die Weiterentwicklung der Technologien über das am Markt Verfügbare einen kompetitiven Vorteil darstellt oder in Zukunft darstellen soll. Ansonsten sprechen die oben stehenden Punkte für die Zusammenarbeit mit Dienstleistern. Trotzdem entscheiden sich viele Firmen für ein Make-Szenario, welches mit hohen Risiken verbunden ist. Hauptgrund ist meist der administrative Aufwand, der bei der Zusammenarbeit

mit externen Dienstleistern entsteht und viele der Vorteile von AM verhindert. Zum Beispiel können schnelle Vorlaufzeiten und günstige kleine Serien nur bedingt realisiert werden, da langsame, zeitintensive und somit teure Beschaffungsprozesse dies verunmöglichen. Diese Probleme entstehen in erster Linie daher, dass sich die normalen Einkaufsprozesse für firmenspezifische Bauteile nur bedingt für AM eignen. Als Ergebnis zu Forschungsfrage 2c wurden Einkaufsprozesse spezifisch für AM entwickelt, welche diese Probleme lösen (siehe hierzu 5.3.3). Dank dieser Einkaufsprozesse können Dienstleister effizient genutzt werden und das Risiko eines Make-Szenarios vermieden werden.

### **5.3.2 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2b: Was gilt es bei der Auswahl der AM-Dienstleister zu beachten?**

Um AM optimal im Buy-Szenario zu nutzen, sollten Firmen mit einem Portfolio von Dienstleistern zusammenarbeiten. Dafür sprechen drei Gründe. Erstens steht AM für eine ganze Reihe unterschiedlicher Technologien, und für jede Anwendung sollte die passendste Technologie verwendet werden. Dienstleister haben aber meist nur einige wenige Technologien im Haus. Um auf die volle technologische Breite zugreifen zu können, sollte Firmen somit Zugang zu mehreren Dienstleistern haben.

Der zweite Punkt basiert auf den in Abschnitt 5.2.1.5 beschriebenen unterschiedlichen Geschäftsmodellen der Dienstleister. Für jede Bestellung sollten Firmen Dienstleister mit dem passenden Geschäftsmodell wählen. Wenn eine Bestellung ein grosses totales Volumen umfasst, welches den Bauraum gut auslastet, sollten sie einen Bestellungserfüller anfragen. Wenn allerdings kleine Stückzahlen realisiert werden sollen, können bessere Preise bei Konsolidierern erreicht werden. Da die Dienstleister unterschiedliche Preistreiber berücksichtigen, sollten Firmen mit mehreren Anbietern zusammenarbeiten, um für jede Bestellung den richtigen Partner zur Verfügung zu haben.

Drittens sollten sich Firmen bewusst sein, dass sich die AM-Technologien in den kommenden Jahren schnell weiterentwickeln werden und sich der Dienstleistermarkt aufgrund der hohen Dynamik stark verändern wird. Firmen werden daher ihre Dienstleister laufend anpassen müssen.

Diese drei Punkte sprechen dafür, dass Firmen mit einem Portfolio von Dienstleistern für AM zusammenarbeiten sollten, welches sich zudem leicht anpassen lassen sollte.

### **5.3.3 Ergebnisse zur Forschungsfrage 2c: Wie müssen Einkaufsprozesse für die Zusammenarbeit mit AM-Dienstleistern ausgestaltet werden?**

#### **5.3.3.1 Aufhebung von Limitationen im Supply-Chain-Setup**

Die traditionellen Fertigungsmethoden haben dem Produktdesign viele Restriktionen auferlegt, welche für AM nicht mehr gelten. Diese neuen Möglichkeiten werden z. B. von Gibson et al. (2010) unter „Design for Additive Manufacturing“ beschrieben.

In gleicher Weise hat die traditionelle Fertigung durch ihre Skaleneffekte zu vielen Restriktionen im Supply-Chain-Setup geführt. Diese gelten nicht für die AM-Supply-Chain, wodurch folgende Verbesserungen ermöglicht werden:

- Reduktion von Losgrössen: Aufgrund von bauteilspezifischen Rüstkosten müssen bei traditioneller Fertigung grosse Losgrössen produziert werden. Dies führt zu hohen Lagerbeständen und Obsoleszenz. Da bei AM keine bauteilspezifischen Rüstkosten existieren, kann in kleinen Losgrössen produziert werden.
- Reduktion von Lieferzeiten: Da keine Werkzeuge gebaut werden müssen und in kleineren Stückzahlen produziert wird, können die Lieferzeiten verkürzt werden.
- Bedarfsgerechte Produktion auf Abruf: Reduzierte Losgrössen und Lieferzeiten ermöglichen vermehrt eine bedarfsgerechte Produktion auf Abruf nach Kundenauftrag.
- Dezentrale Produktion: Grosse Losgrössen und Werkzeuge führen traditionell zu einer Zentralisierung der Produktion. Dies ist theoretisch für AM nicht nötig. Da AM jedoch oft mit traditionellen Bauteilen kombiniert wird, sind die Möglichkeiten zur dezentralen Produktion beschränkt.
- Customization auf der Bauteil-Ebene: Da oft bauteilspezifische Werkzeuge oder Maschinencodes benötigt werden, werden einzelne Bauteile traditionell nicht kundenspezifisch gestaltet. Die Customization findet daher über den modularen Aufbau aus verschiedenen Standardteilen statt. AM ermöglicht hingegen die kundenspezifische Anpassung auf der Bauteil-Ebene.
- Kontinuierliche Weiterentwicklung von Bauteilen: Sobald in ein Werkzeug oder einen Maschinencode investiert wird, findet ein „Design Freeze“ statt und das Bauteil kann nicht mehr weiterentwickelt werden. Da diese Vorabinvestitionen bei AM nicht bestehen, können Bauteile kontinuierlich weiterentwickelt werden.

### 5.3.3.2 Anforderungen an Einkaufsprozesse

Um die Vorteile der AM-Supply-Chain zu realisieren und möglichst effizient mit einem in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Portfolio von Dienstleistern zusammenzuarbeiten, ergeben sich spezifische Anforderungen an AM-Einkaufsprozesse.

- Der Aufwand und die Vorlaufzeit pro Bestellung muss reduziert werden: Aufgrund kleinerer Losgrössen und Produktion auf Abruf ergeben sich bei AM viele Bestellungen über kleine Beträge anstelle weniger Bestellungen über grosse Beträge. Das Volumen einer AM-Bestellung beträgt typischerweise einige hundert bis einige tausend CHF. Da auf Abruf produziert wird, sind die Bestellungen zudem meist zeitkritisch. Im Prototyping sind kurze Leadtimes von wenigen Tagen von der Idee bis zum Erhalt des Bauteils normal. Daher müssen der Aufwand und die Vorlaufzeit pro Bestellung reduziert werden.
- AM-Nutzer benötigen direkten Zugang zu den Dienstleistern: Bei der traditionellen Fertigung werden Teile entwickelt und nach einem Design Freeze dem Einkauf „übergeben“. Hierbei verwaltet der Einkauf die begrenzte Anzahl eingefrorener Bauteile und ist der einzige Kontaktpunkt zu den Lieferanten. AM-Bauteile werden aber kontinuierlich weiterentwickelt und/oder an individuelle Kundenbedürfnisse angepasst. Dies führt zu einer grossen Anzahl verschiedener Bauteile, welche nicht sinnvoll vom Einkauf verwaltet werden können. Zudem führt der Weg über den Einkauf zu einer künstlichen Verlängerung der Lieferzeit. Daher sollten AM-Bauteile direkt von den Mitarbeitern, die sie anpassen oder weiterentwickeln, bei Dienstleistern angefragt werden. Aus diesem Grund brauchen alle AM-Nutzer einen direkten Zugang zu den Dienstleistern. Die Aufgabe des Einkaufs konzentriert sich darauf, geeignete Dienstleister für die Firma auszuwählen und mit diesen sinnvolle Konditionen zu verhandeln. Ein solcher dezentraler Einkaufsprozess existiert heute beispielsweise beim

Kanban-System für Standardteile in der Montage. Hier wird die Bestellung dezentral vom Monteur durch dessen Verbrauch ausgelöst (vergleiche z.B. Schönsleben, 2011)

- Der Aufwand für die Dienstleisterauswahl muss reduziert werden: Der Dienstleistermarkt ist aufgrund des schnellen Wachstums und der technologischen Entwicklung unübersichtlich. Die Auswahl von Dienstleister ist daher aufwendig.
- Ein Dienstleisterwechsel muss einfach möglich sein: Firmen benötigen ein Standardinterface zu allen Dienstleistern, um auch bei einer grossen Anzahl von AM-Nutzern problemlos zu wechseln.

### 5.3.3.3 Heutige Situation beim Einkauf von AM-Teilen

Viele Firmen versuchen heute, AM-Teile mittels ihrer normalen Einkaufsprozesse für firmenspezifische Bauteile abzuwickeln. Diese Einkaufsprozesse funktionieren vereinfacht wie folgt: Ein Ingenieur konstruiert beispielsweise ein Bauteil für Spritzguss. Sobald er die Konstruktion beendet hat, „übergibt“ er das Bauteil an den Einkauf. Dieser kontaktiert mehrere Lieferanten und verhandelt die Kosten für den Bau eines Werkzeuges und die Produktion einer ersten Serie. Der Einkauf entscheidet sich für einen Lieferanten, und einige Monate später sind die Bauteile im Haus (vergleiche Abbildung 19). Dieser manuelle und zeitaufwendige Prozess funktioniert gut, sofern selten Bestellungen über grosse Beträge anfallen und lange Vorlaufzeiten existieren. Zudem müssen die Anforderungen standardisiert abbildbar sein.

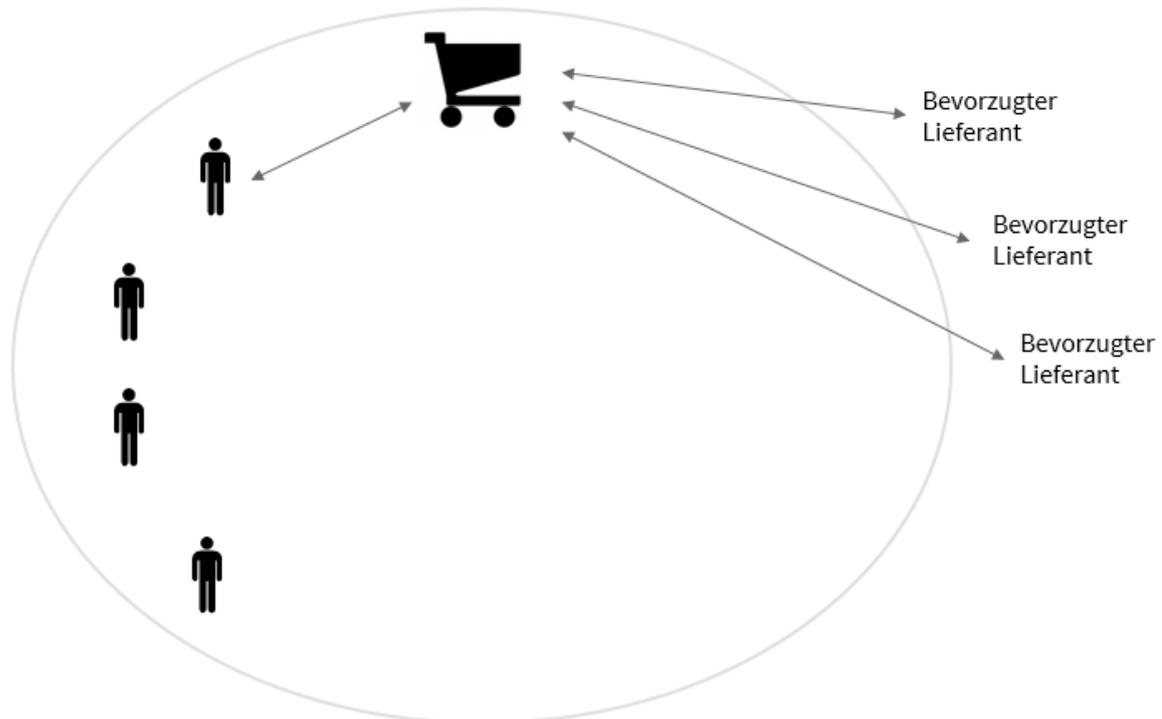


Abbildung 19: Vereinfachte Darstellung des heutigen Einkaufsprozesses für firmenspezifische Bauteile (Baldinger, 2015, Publikation 10)

Aufgrund in Abschnitt 5.3.3.2 dargestellten spezifischen Anforderungen haben sich in vielen Firmen abgewandelte Einkaufsprozesse für AM etabliert. Hierbei wird der „Umweg“ über den Einkauf umgangen und jeder Ingenieur kümmert sich selbst um seine Bauteile. Das heisst, der Ingenieur sucht sich seine Lieferanten, holt Angebote ein und bestellt Bauteile. Dadurch entsteht ein aufwendiger und wenig standardisierter Prozess, welcher zu einer grossen Anzahl externer Dienstleister führt (vergleiche Abbildung 20).

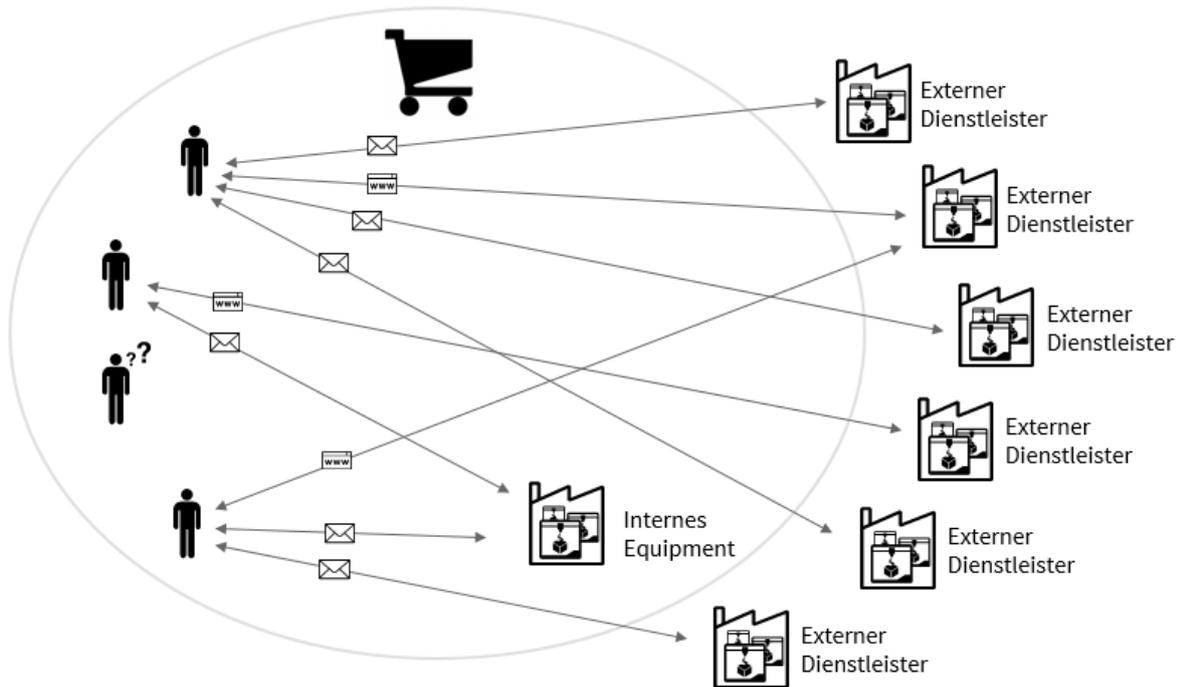


Abbildung 20: Abgewandelter Einkaufsprozess für AM (Baldinger, 2015, Publikation 10)

Dieser Ansatz funktioniert zwar, hat aber einige Nachteile:

- Hoher administrativer Aufwand für Ingenieure, da Bauteile ad hoc und in Eigenregie beschafft werden müssen. Dies führt häufig zu langen Google-Recherchen und Diskussionen, wodurch viele Projekte nicht umgesetzt werden.
- Die volle Breite von AM kann nicht genutzt werden, da ein Ingenieur meist mit den gleichen ein oder zwei Lieferanten zusammenarbeitet, die einige wenige Technologien und Materialien im Haus haben.
- Keine Kontrolle des Prozesses durch den Einkauf: Da der Prozess nicht standardisiert ist, hat der Einkauf keine Kontrolle und kann seiner Aufgabe, Lieferanten auszuwählen, Volumen zu bündeln und vorteilhafte Konditionen zu verhandeln, nicht nachkommen.
- Unsicherer Datenaustausch über E-Mail und verschiedene Lieferantenportale.
- Die Integration von AM-Equipment, welches innerhalb der Firma vorhanden ist, in den Prozess ist nur schwierig möglich.

#### 5.3.3.4 E-Procurement-Systeme als mögliche Lösung

E-Procurement steht für elektronische Einkaufsprozesse, insbesondere für Internet-basierte Lösungen. Hierbei gibt es verschiedene Kategorien, wobei elektronische Marktplätze grosse Zahlen von Lieferanten und Kunden verbinden (Schönsleben, 2011). Ein neutraler und öffentlicher Marktplatz verspricht hierbei eine Reduktion der Transaktionskosten:

- Reduzierte Abwicklungskosten: Durch die Digitalisierung und teilweise Automatisierung des Einkaufsprozesses kann der Arbeitsaufwand für die Abwicklung von Bestellungen stark reduziert werden (Muffatto und Payaro, 2004).
- Reduzierte Suchkosten: Durch die Verbindung vieler Lieferanten und die Aggregation von Informationen werden die Suchkosten für Käufer reduziert (Standing et al., 2010).
- Reduzierte Wechselkosten: Durch die offene Architektur des Internets und die niedrigen Setup-Kosten sind Wechselkosten zwischen Lieferanten innerhalb elektronischer Marktplätze tief (Roche, 1995).

Werden die spezifischen Anforderungen an AM-Einkaufsprozesse aus Abschnitt 5.3.3.2 unter diesem Kontext betrachtet, stellen die ersten zwei Punkte eine Reduktion der Abwicklungskosten, der dritte eine Reduktion der Suchkosten und der vierte eine Reduktion der Wechselkosten dar. Daher scheint ein AM-spezifisches E-Procurement-System ein geeignetes Mittel zu sein, um die Anforderungen zu adressieren.

### 5.3.3.5 AM-Einkaufsprozess mittels E-Procurement-System

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Additively – Procurement tools for 3D printing“ wurde ein solches AM-spezifisches E-Procurement-System entwickelt. An die Plattform sind über 300 Dienstleister in Europa und somit der grösste Teil der Anbieter angeschlossen. Abbildung 21 illustriert den AM-Einkauf einer Firma mittels dieses Systems. Hierbei haben die AM-Nutzer und die Einkaufsabteilung Zugang zu dem System. Die Einkaufsabteilung definiert die bevorzugten Dienstleister der Firma und kann die verhandelten Konditionen hinterlegen. Ingenieure haben über das System Zugriff auf diese Dienstleister. Sie sehen sofort, welche Technologien und Materialien zu welchen Konditionen bei welchen Dienstleistern zur Verfügung stehen. Mittels eines standardisierten und effizienten Prozesses können sie Angebote einholen und Bauteile bestellen. Das System generiert direkt die richtigen Informationen, um die Bestellung im ERP-System zu erfassen. Die digitalen 3D-Modelle werden über die gesicherte Schnittstelle der Plattform an die Dienstleister übermittelt.

Der Einkauf erhält eine volle Datenbasis über die Nutzung von AM in der Firma. Diese Datenbasis kann dazu genutzt werden, das AM-Geschäft regelmässig auszuschreiben und gute Konditionen mit den Dienstleistern zu verhandeln. An die Plattform sind über 300 Dienstleister in Europa angeschlossen, was die Identifikation neuer Dienstleister vereinfacht und einen Dienstleisterwechsel mit minimalem Aufwand ermöglicht. Mittels des E-Procurement-Systems können AM-Bauteile mit minimalem Aufwand und minimaler Vorlaufzeit realisiert werden.

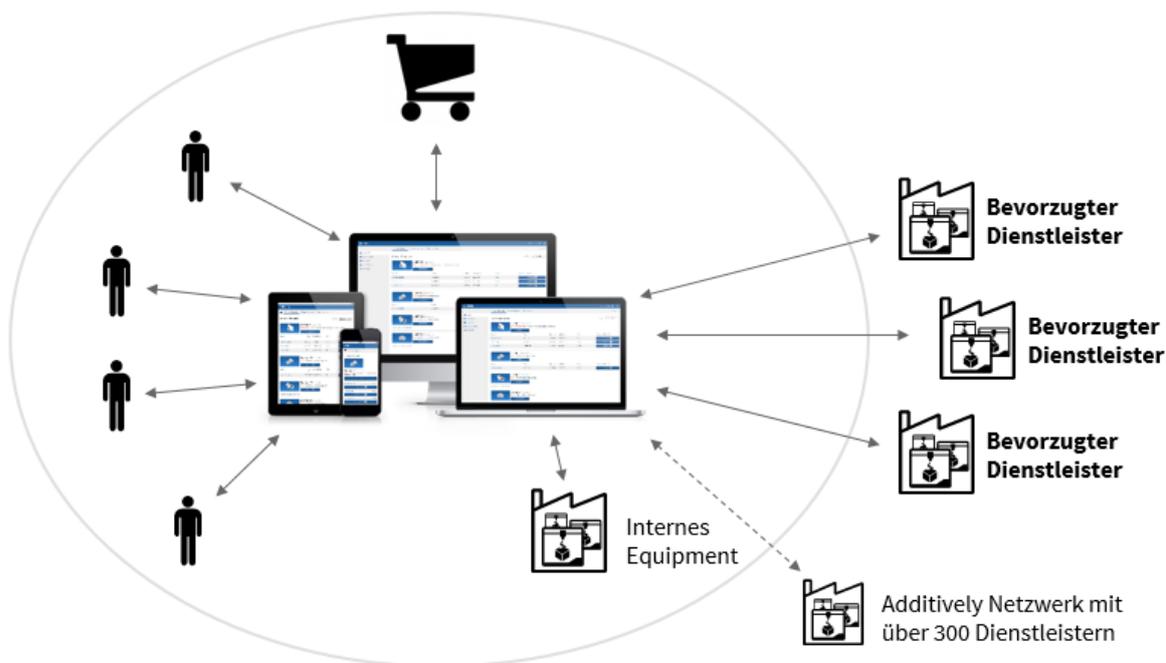


Abbildung 21: Setup des AM-spezifischen E-Procurement-Systems Additively (Baldinger 2015, Publikation 10)

## 5.4 Ergebnisse zur Forschungsfrage 3

Wie in Abschnitt 2.2.3.2 aufgezeigt, existiert bis anhin kein einfacher Leitfaden für Firmen, die in AM einsteigen möchten, welcher über alle Unternehmensbereiche genutzt werden kann. Ein solcher wird in der Forschungsfrage 3 als Ergebnis aus der Zusammenarbeit mit Firmen im Rahmen des Forschungsprojekts „Additively – Procurement tools for 3D printing“ erstellt. Die Innovation liegt hierbei in den folgenden Punkten:

- Vier einfache Leitfragen, an welchen die Möglichkeiten und Herausforderungen von AM aufgezeigt werden.
- Die erste Technologieübersicht mit Dimensionen, welche aus der Perspektive von Firmen relevant sind, die die Technologien anwenden wollen (vergleiche Abbildung 23). Andere Übersichten, wie beispielsweise die von Verl et al. (2013), nehmen die Perspektive eines Maschinenbetreibers ein. Dies zeigt sich daran, dass die Hauptdimension die Form des Ausgangsmaterials ist (z. B. flüssig, pulverförmig). Die Form des Ausgangsmaterials ist für Anwenderfirmen aber irrelevant. Die hier vorgestellte Technologieübersicht ermöglicht eine Auswahl der passenden Technologien für eine Anwendung.
- Die Darstellung der verschiedenen AM-Anwendungen nach Potential und Schwierigkeit der Umsetzung, welche eine Empfehlung für den Einstieg abgibt (vergleiche Abbildung 24).

Im Folgenden werden die vier Leitfragen wie in Baldinger (2015, Publikation 9), mit Ergänzungen aus Baldinger et al. (2014, Publikation 7), vorgestellt.

### 5.4.1 Ergebnisse zur Forschungsfrage 3a: Welche Leitfragen unterstützen die unternehmensweite Diskussion über Möglichkeiten und Herausforderungen von Additive Manufacturing?

Das Potential der AM-Technologien basiert auf den Unterschieden zu den traditionellen Verfahren. Viele Firmen möchten dieses nutzen. Der Einstieg in die Technologien stellt sie allerdings vor verschiedene Herausforderungen, die sich am besten anhand der folgenden vier Fragen darstellen lassen:

1. Warum: Welcher Mehrwert soll durch AM realisiert werden?
2. Was: Welche Bauteile sollen mittels AM gefertigt werden?
3. Mit welcher Technologie: Welche Technologie und welches Material eignen sich für die Bauteile?
4. Wie: Wie können Bauteile schnell und effizient umgesetzt werden?

#### 5.4.1.1 Warum: Welcher Mehrwert soll durch AM realisiert werden?

AM um des AM willen anzuwenden ist fast nie erfolgreich. Firmen sollten sich daher als Erstes fragen, welcher Mehrwert erzielt werden soll. Hierbei können die sechs Anwendungsfelder aus Abbildung 22 hilfreich sein. Die Felder unterscheiden die verschiedenen AM-Anwendungen nach dem Mehrwert, der damit generiert werden soll.

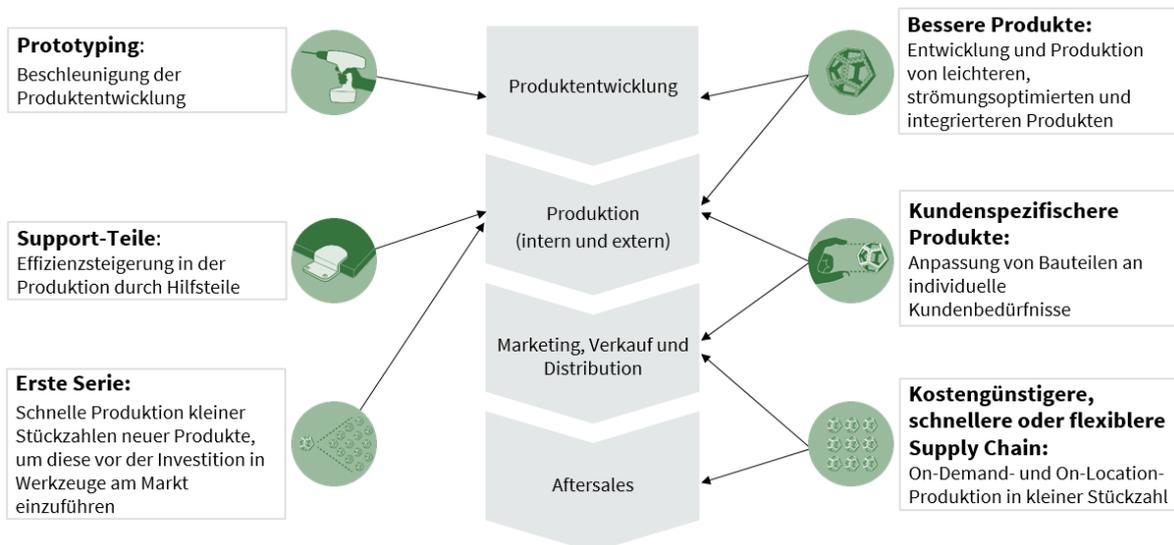


Abbildung 22: AM-Anwendungsfelder nach Mehrwert (von Präsentation am Professional 3D Printing Forum der technischen Rundschau, Windisch, Schweiz, 20.10.2015)

**Schnelleres Prototyping:** AM wurde zur Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses durch Rapid Prototyping entwickelt. Heute sind die Möglichkeiten vielfältig: Multi-Material-, vollfarbige und transparente Teile können als visuelle Prototypen produziert werden. Zudem lassen sich voll funktionsfähige Prototypen aus Kunststoff und Metall herstellen.

**Effizienzsteigerung durch Support-Teile:** AM-Hilfsteile können traditionelle (Produktions-) Prozesse effizienter gestalten. Beispielsweise werden Urmodelle oder verlorene Modelle für verschiedene Gussprozesse, Produktionsmittel, Schablonen, Montagehilfen etc. hergestellt.

**Flexiblerer Produktlaunch durch erste Serien:** Mittels AM können kleine erste Serien von neuen Produkten vor der Investition in Werkzeuge schnell und kostengünstig hergestellt werden. So ist ein schnellerer Produktlaunch möglich. Zudem können Produkte mit erstem Kundenfeedback bereits weiterentwickelt werden, bevor in Werkzeuge investiert wird. Im Englischen Sprachgebrauch wird dieses Anwendungsfeld als Bridge Manufacturing bezeichnet (Berman, 2012)

**Bessere Produkte:** Durch die bereits angesprochenen geometrischen Freiheiten können bessere Produkte realisiert werden. Beispielsweise können dank komplexeren Formen leichtere und strömungsoptimierte Bauteile umgesetzt werden. Zudem können mehr Funktionen in ein Produkt oder Bauteil integriert werden.

**Kundenindividuellere Produkte:** Bei AM wird direkt ab digitalen 3D-Modellen produziert. Dies ergibt neue Möglichkeiten bei der Customization. Parametrisierte CAD-Modelle ermöglichen die Anpassung an Kundenbedürfnisse bis hin zur Produktion von Unikaten.

**Kostengünstigere, schnellere und flexiblere Supply Chain:** Aufgrund fehlender Skaleneffekte kann auf Abruf und vor Ort in Losgröße 1 produziert werden. Dies ist zum Beispiel im Ersatzteilwesen äusserst interessant.

Die drei Anwendungsfelder links sind Prozessverbesserungen, bei welchen weiterhin mit einem traditionellen Verfahren produziert wird. Die drei Anwendungsfelder rechts sind Serienanwendungen, wobei AM direkt als Fertigungstechnologie eingesetzt wird. Firmen sollten entlang ihrer gesamten Wertschöpfungskette analysieren, mit welchen der AM-Anwendungsfelder sich Mehrwert generieren lässt. Hierzu ist AM-Anwendungs-Know-how erforderlich, welches entweder intern aufgebaut oder extern bezogen werden muss.

#### **5.4.1.2 Was: Welche Bauteile sollen mittels AM gefertigt werden?**

Jedes Bauteil wird spezifisch für eine Fertigungstechnologie konstruiert. Beispielsweise fallen beim Fräsen immer dann Kosten an, wenn Material entfernt wird. Dies führt dazu, dass Frästeile grundsätzlich „solide“ konstruiert werden, das heißt möglichst wenig Material vom Ausgangsblock entfernt werden muss. Bei AM ist dies genau umgekehrt. Kosten fallen immer dann an, wenn Material hinzugefügt wird. Aus diesem Grund müssen AM-Teile möglichst „filigran“ konstruiert werden.

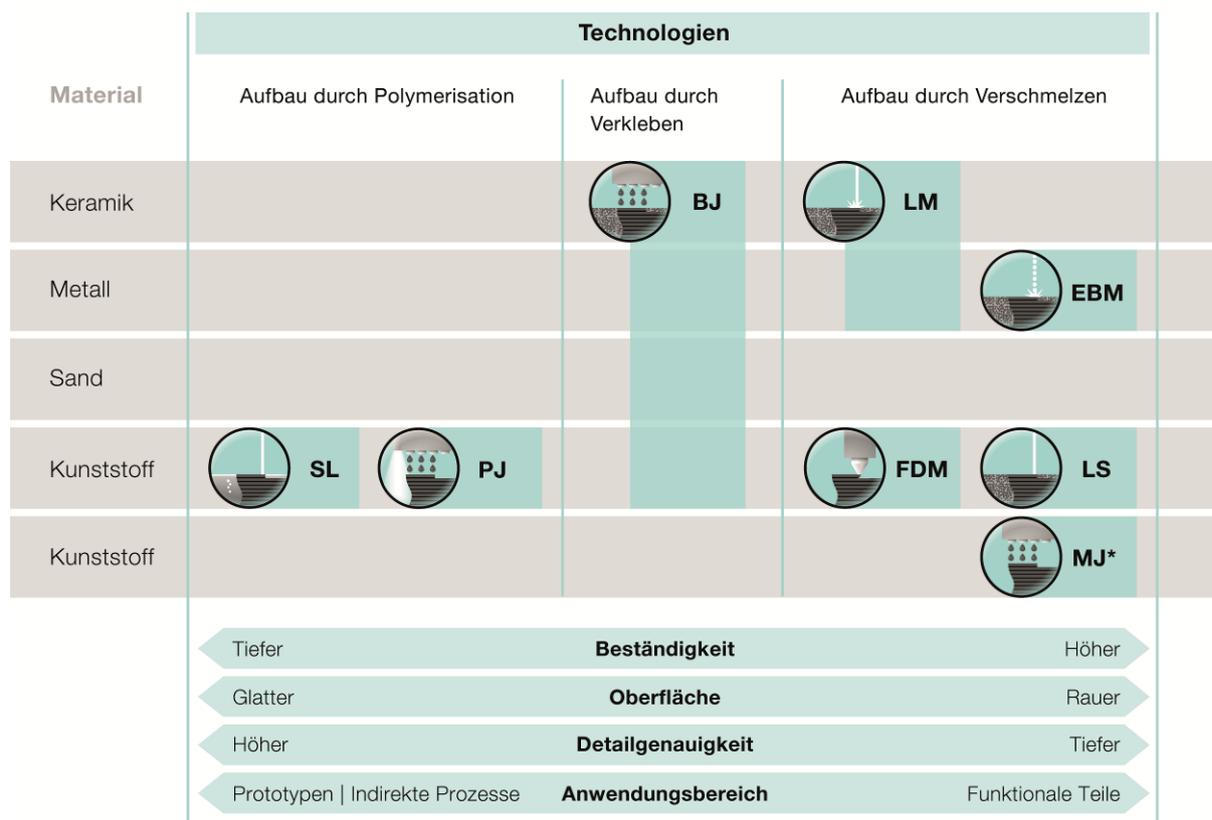
Darüber hinaus stellt AM Firmen vor weitere Herausforderungen in der Konstruktion. Um bessere Bauteile zu realisieren, muss die Komplexität der zu konstruierenden Teile stark erhöht werden. Dies ist meist um einiges anspruchsvoller als die Konstruktion traditioneller Teile. Um kundenspezifischere Bauteile zu produzieren, müssen parametrisierte CAD-Modelle erstellt werden, damit diese an individuelle Kundenbedürfnisse angepasst werden können. Eine weitere Schwierigkeit rührt daher, dass die Entscheidung, AM für die Produktion eines bestimmten Bauteils zu verwenden, möglichst früh im Produktentwicklungsprozess gefällt werden muss. Nur so können Bauteile und ganze Baugruppen spezifisch für die Technologien konstruiert werden.

Aufgrund eben genannter Punkte wird für Serienanwendungen AM-spezifisches Konstruktions-Know-how benötigt.

#### **5.4.1.3 Mit welcher Technologie: Welche Technologie und welches Material eignen sich für die Bauteile?**

Abbildung 23 hilft, einen Überblick über die wichtigsten AM-Technologien zu gewinnen und die Auswahl der richtigen Technologie zu vereinfachen. In der Vertikalen werden die Technologien nach den Materialien, die sie verarbeiten können, unterschieden. Die Horizontale gibt Auskunft darüber, wie die Teile aus dem Material Schicht um Schicht aufgebaut werden. Polymerisation heißt, dass ein flüssiges Fotopolymer mittels UV-Licht ausgehärtet wird. Hierbei handelt es sich um eine chemische Reaktion, welche das Bauteil Schicht um Schicht aufbaut. Verkleben bedeutet, dass Material in Pulverform mittels eines flüssigen Klebstoffes verbunden wird. Die Teile bestehen also aus verklebten Partikeln des Materials. Schmelzen bedeutet, dass das Ausgangsmaterial Schicht um Schicht aufgeschmolzen wird und beim Abkühlen erstarrt. Die Teile bestehen also aus dem verschmolzenen Material.

Der Aufbau der Teile ist elementar für die Eigenschaften und somit die Anwendungsmöglichkeiten. Für die Polymerisations-basierten Technologien wurden spezialisierte Fotopolymere entwickelt. Sie ermöglichen die Herstellung von Teilen mit guter Oberfläche und hohen Details. Da die Teile aber aus einem Fotopolymer bestehen, sind ihre Eigenschaften nicht stabil über längere Zeit. Die Teile „altern“ und verlieren ihre mechanischen Eigenschaften. Daher werden sie in erster Linie zur Herstellung von Prototypen und für indirekte Prozesse verwendet. Anders sieht es aus bei Teilen, die über Verschmelzen entstanden sind. Sie bestehen aus Standard-Materialien, die vergleichbare Beständigkeit und Eigenschaften wie traditionell hergestellte Teile besitzen. Sie werden daher eingesetzt, um direkt funktionale Bauteile zu produzieren. Aufgrund der Limitation der Prozesse erreichen sie aber weniger gute Oberflächen und weniger feine Details als die Polymerisationsteile. Dazwischen liegt Binder Jetting als Technologie, die mittels Klebstoff Pulver verklebt. Dadurch sind auch hier die Beständigkeit und die Eigenschaften im Vergleich zu Serienteilen begrenzt.



\*MJ erzielt glatte Oberfläche und genaue Details

**Binder Jetting (BJ), Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modelling (FDM), Photopolymer Jetting (PJ), Material Jetting (MJ), Laminated Object Modeling (LOM), Laser Melting (LM), Laser Sintering (LS), Stereolithography (SL), Indirect Process**

© additively.com

Abbildung 23: Übersicht über wichtige AM-Technologien (Baldinger et al., 2015, Publikation 7)

Der Aufbau definiert die Eigenschaften der additiv gefertigten Teile. Diese Teile können nun entweder direkt verwendet oder mit anderen Produktionstechnologien kombiniert werden. Die möglichen Prozessketten wurden in 2.1.3.9 beschrieben. Die Vielzahl verschiedener AM-Technologien und die Möglichkeiten zu deren Kombination mit anderen Prozessen führen zu einer hohen Komplexität. Um diese zu meistern, benötigen Firmen AM-Technologie-Know-how.

#### 5.4.1.4 Wie: Wie können Bauteile schnell und effizient umgesetzt werden?

Diese Frage wurde in der Forschungsfrage 2 in Abschnitt 5.3 ausführlich beantwortet.

#### 5.4.1.5 Wo soll heute begonnen werden?

Um AM erfolgreich einzusetzen, ist Anwendungs-, Konstruktions- und Technologie-Know-how nötig. Zudem müssen geeignete Einkaufsprozesse zur Umsetzung von Bauteilen bei Dienstleistern implementiert werden. Für Firmen stellt sich die Frage, wie an das Thema herangegangen werden soll, um dieses Know-how aufzubauen.

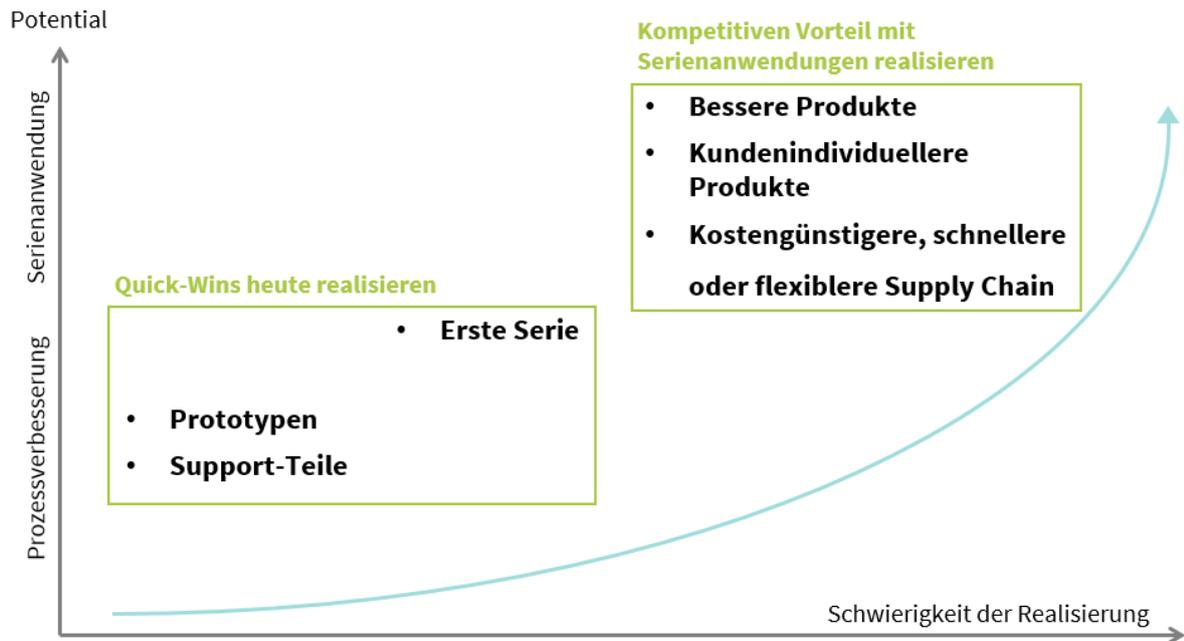


Abbildung 24: Potential und Schwierigkeit der Umsetzung der AM-Anwendungsfelder (Baldinger 2015, Publikation 9)

Abbildung 24 zeigt, wie sich die sechs AM-Anwendungsfelder bezüglich ihres Potentials und der Schwierigkeit bei ihrer Realisierung unterscheiden. Firmen sollten möglichst mit den Prozessverbesserungsanwendungen beginnen und diese als Quick-Wins heute realisieren. Häufig werden beispielsweise die Möglichkeiten im Prototyping nicht ausgeschöpft. Durch die Realisierung dieser Anwendungen wird Know-how aufgebaut. Mittels dieses Know-hows können mittelfristig Serienanwendungen realisiert und ein kompetitiver Vorteil generiert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Firmen nutzen AM immer intensiver und greifen zunehmend auf Dienstleister zurück, welche Bauteile im Auftrag produzieren. Dies geschieht aufgrund von hohen Risiken bei einer Investition in eigene AM-Maschinen. Dadurch entsteht eine neue Supply Chain für AM. Die AM-Forschung hat sich mit dem Management dieser Supply Chain noch nicht ausreichend beschäftigt. In der Praxis besteht vor allem ein Bedürfnis zu Fragen zum Supply-Chain-Design (Make-or-Buy, Lieferantwahl und Zusammenarbeit mit den Lieferanten), zu den Kosten von AM im Buy-Szenario und zum Vorgehen beim unternehmensweiten Einstieg in die Technologien. Die Hauptergebnisse dieser Dissertation sind Konzepte, Werkzeuge und Prozesse, die Firmen bei diesen Fragen unterstützen. Übergeordnetes Ziel ist die erfolgreiche Nutzung der Technologien durch Firmen und damit die Stärkung deren längerfristigen Wettbewerbsfähigkeit.

### 6.1 Beitrag zur Theorie

Die Ergebnisse zur Forschungsfrage 1 adressieren Lücken rund um AM-Kosten, welche entstanden sind, da Firmen zunehmend auf Dienstleister zurückgreifen. Hierbei wurden die zwei folgenden Beiträge zur Theorie geleistet.

*Erkenntnisse zu den Preis- und Geschäftsmodellen auf dem AM-Dienstleistermarkt:* Die Ergebnisse zu 1a bieten einen detaillierten Einblick in die Preis- und Geschäftsmodelle, welche auf dem AM-Dienstleistermarkt existieren. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Geschäftsmodelle identifiziert, welche als „Konsolidierer“ und „Bestellungserfüller“ bezeichnet werden.

*Erstes Kostenschätzmodell für Buy-Szenarios:* Um eine erfolgreiche Rapid-Manufacturing-Anwendung umzusetzen, müssen Bauteile spezifisch für AM konstruiert werden. Aus diesem Grund muss die Entscheidung, AM für ein Bauteil einzusetzen, möglichst früh im Produktentwicklungsprozess gefällt werden, wenn Bauteil- und Baugruppendesigns noch nicht festgelegt sind. Um diese Entscheidung zu fällen, müssen Ingenieure die Bauteilkosten schätzen können. Für die traditionellen Fertigungsverfahren existieren hierzu Werkzeuge zur Kostenschätzung, welche für AM bis anhin fehlten. In 1b wurden solche Werkzeuge für AM erstellt, welche die Kostenschätzung für ein Buy-Szenario ermöglichen.

Die Ergebnisse zur Forschungsfrage 2 bestehen aus Konzepten und Prozessen zum Management der AM-Supply-Chain. Da Firmen bis vor einigen Jahren nur begrenzt mit externen Dienstleistern zusammenarbeiteten, war der Forschungsbedarf in diesem Thema nicht gegeben. Dies hat sich nun geändert und folgende drei Punkte wurden zur Theorie beigetragen.

*Aktueller Kostenvergleich Make-or-Buy:* In 2a wurde ein aktueller Kostenvergleich zwischen Make und Buy erstellt und um Gesichtspunkte des Risikomanagements erweitert. Aufgrund der Vermeidung hoher Investitionsrisiken scheint ein Buy-Szenario empfehlenswert.

*Zusammenarbeit mit Portfolio von Dienstleistern:* In 2b wurden basierend auf den Ergebnissen der Forschungsfrage 1 konkrete Empfehlungen für Firmen bei der Auswahl der Dienstleister abgeleitet. Hierbei wurde die Zusammenarbeit mit einem Portfolio von Dienstleistern vorgeschlagen.

*Erstes AM-spezifisches E-Procurement-System:* In 2c wurde analysiert, welche spezifischen Punkte bei der Ausgestaltung von Einkaufsprozessen für AM beachtet werden müssen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bestehende Prozesse für den Einkauf von firmenspezifischen Bauteilen nur bedingt für AM eignen. Als mögliche Lösung wurde ein AM-spezifisches E-

Procurement-System entwickelt, welches eine effiziente Umsetzung eines Make-Szenarios ermöglicht. Das System erlaubt Firmen in AM einzusteigen ohne das Risiko hoher Investitionen unter Unsicherheit einzugehen.

Wie von Cohen (2014) argumentiert, müssen sich unterschiedliche Unternehmensbereiche mit AM beschäftigen, wenn eine Firma in die Thematik einsteigen möchte. Daher wurde in Forschungsfrage 3 folgender Beitrag geleistet.

*Vier Leitfragen, um die Möglichkeiten und Herausforderungen von AM im Unternehmen bereichsübergreifend zu diskutieren:* Es gibt eine Vielzahl von Unterstützung für Firmen, die in AM einsteigen möchten. Diese richten sich jeweils gezielt an einen bestimmten Unternehmensbereich (z.B. Verl et al. (2013) an Entwicklungsabteilungen, Cohen (2014) ans Management). Um eine gemeinsame Diskussion mit verschiedenen Unternehmensbereichen zu ermöglichen, wurde als Ergebnis zur Forschungsfrage 3 vier generische Leitfragen entwickelt, welche die Möglichkeiten und Herausforderungen beim Einstieg in AM aufzeigen. Durch die Verallgemeinerung geht die Detailtiefe verloren. Es kann aber eine engere Zusammenarbeit der beteiligten Bereiche erzielt werden.

## **6.2 Praktische Relevanz und Anwendung in der Industrie**

Aufgrund der Aktualität der Fragestellungen in der Praxis und weitgehend fehlender Empfehlungen aus der Forschung fokussiert diese Dissertation auf praxisrelevante Ergebnisse. Die in der Forschungsfrage 1 erarbeiteten Werkzeuge ermöglichen Firmen eine einfache Kostenschätzung. Die Ergebnisse zur Forschungsfrage 2 unterstützen Firmen beim konkreten Design ihrer heutigen AM-Supply-Chain. Die Leitfragen aus der Forschungsfrage 3 ermöglichen eine strukturierte Diskussion der Möglichkeiten und Herausforderungen von AM.

In dieser Arbeit wurde viel Wert auf die Dissemination gelegt, um die Ergebnisse der Industrie zugänglich zu machen. Hierbei wurden drei Kanäle genutzt. Erstens wurden die Ergebnisse publiziert (vergleiche Tabelle 3). Zweitens wurden die Ergebnisse auf einer Vielzahl von Veranstaltungen präsentiert (vergleiche Tabelle 4). Als dritter Kanal wurde auf der Additively-Homepage eine Lernumgebung geschaffen, welche Teile der in der Arbeit entwickelten Inhalte kostenlos zur Verfügung stellen. Dank der Lernumgebung können sich interessierte Firmen über AM informieren und weiterbilden. Die Homepage verzeichnet mittlerweile über 10'000 Besuche pro Monat, was zum einen die breite Streuung der Resultate sicherstellt und zum anderen das Bedürfnis aus der Industrie bestätigt. Die in der Forschungsfrage 2c erarbeiteten AM-Einkaufsprozesse wurden auf der Additively-Plattform umgesetzt. An das entwickelte E-Procurement-System sind bereits über 300 Dienstleister und mehrere tausend Firmenkunden angeschlossen (Stand Oktober 2015). Das System ermöglicht Firmen den Einstieg in AM ohne hohe Investitionen. Die Beratungsfirma Board of Innovation führt Additively daher als Lösung auf, welche es Firmen erlaubt Technologien mit geringeren Risiken zu nutzen (Board of Innovation, 2015).

## **6.3 Einschränkungen und Ausblick**

Im Folgenden werden die Einschränkungen der Doktorarbeit erläutert. Diese sollen neben der Einordnung der Arbeit auch den zukünftigen Forschungsbedarf aufzeigen.

Aufgrund des Fokus auf aktuelle, praxisrelevante Ergebnisse entstehen Einschränkungen für die Generalisierbarkeit der Ergebnisse in Bezug auf die Zukunft. Dies ist besonders für die Forschungsfrage 1 zutreffend. Die Erkenntnisse zum AM-Dienstleistungsmarkt und die Werkzeuge für die Kostenschätzung im Buy-Szenario basieren auf Marktdaten, welche eine Bestandsaufnahme der Preise zu einem gewissen Zeitpunkt darstellen. Des Weiteren wurde die erzielte Qualität der Bauteile nicht überprüft. Rund um das Qualitätsmanagement ergibt sich daher weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere stellt sich die Frage, wie Preise von Dienstleistern und die erzielte Qualität der Bauteile zusammenhängen.

Da ein Grossteil der AM-Anwendungen heute im Bereich Prototyping liegen, wurde die Forschungsfrage 2 in erster Linie basierend auf den Erfahrungen von Firmen mit der Prototypenbeschaffung beantwortet. Viele Punkte sprechen dafür, dass Rapid-Manufacturing-Bestellungen ähnliche Anforderungen haben und daher die Prozesse generalisierbar sind. Dies muss allerdings in Zukunft, wenn mehr Rapid-Manufacturing-Anwendungen vorhanden sind, überprüft werden. Da die beschafften Volumina heute noch eher tief sind, war eine detailliertere Ausarbeitung und Validierung der Prozesse nicht möglich. In weiterführenden Forschungen sollte die Aufgabenteilung zwischen AM-Nutzern und Einkäufern weiter beleuchtet und die jeweiligen Aufgaben detaillierter erarbeitet werden.

Die in der Forschungsfrage 3 entwickelten Leitfragen unterstützen Firmen bei den ersten Diskussionen über die Möglichkeiten und Herausforderungen von AM. Aufgrund steigender Erfahrung der Firmen mit den Technologien werden diese Leitfragen weiterentwickelt werden müssen. Die Leitfragen wurden in Workshops mit verschiedenen Firmen verwendet und als hilfreich eingeschätzt. Es besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf, um eine breite Validierung zu ermöglichen.

Grundsätzlich hat diese Doktorarbeit zusammen mit weiteren Arbeiten einen Beitrag geleistet, das Thema Supply-Chain-Management für Additive Manufacturing einen Schritt vorwärtszubringen und auf die Forschungsagenda zu setzen. Ein Indiz hierfür liefert die RapidTech, die führende Fachtagung für AM im deutschsprachigen Raum, welche angekündigt hat, ab 2016 einen neuen Vertiefungsblock zu Fragestellungen rund um AM-Dienstleistung einzuführen.

## 7 Literatur

Die Arbeiten mit Beteiligung des Autors dieser Dissertation sind in Abschnitt 1.4 zu finden.

3D Systems (2015), “3D Systems”, available at: [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com) (Stand 01.11.2015).

ASTM (2012), *F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM International, West Conshohocken, USA

Additively (2015), “Die 3D-Druck Plattform für Firmenkunden”, available at: [www.additively.com](http://www.additively.com) (Stand 01.11.2015).

Arcam (2015), “Arcam”, available at: [www.arcam.com](http://www.arcam.com) (Stand 01.11.2015).

Ariadi, Y., Hasan, S., Smith, P., und Rennie, A. E. W. (2008). „Development of an Additive Layer Manufacturing business model: creating an environment to support designers from concept to distribution”, available at: [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30630626/JRPS32-Development\\_of\\_an\\_ALM\\_Business\\_Model.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1446384411&Signature=fPs7n3qrkXPPonLBTcHrEDa%2Fiac%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDevelopment\\_of\\_an\\_Additive\\_Layer\\_Manufact.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30630626/JRPS32-Development_of_an_ALM_Business_Model.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1446384411&Signature=fPs7n3qrkXPPonLBTcHrEDa%2Fiac%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDevelopment_of_an_Additive_Layer_Manufact.pdf) (Stand: 01.11.2015).

Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P. und Salmi, A. (2010), “Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16 No. 5, pp. 308–317.

Atzeni, E. und Salmi, A. (2012), "Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62 No. 9-12, pp. 1147-1155.

Baskerville, R.L. (1997), “Distinguishing action research from participative case studies”, *Journal of Systems and Information Technology*, Vol. 1 No. 1, pp. 24-43.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. und Hague, R. (2012), “Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering”, in Bourell, D. et al. (Eds.), *Proceedings of Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX, 6-8 August 2012, Vol. 13.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., und Hague, R. (2013), “Transparency Built-in”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 17 No. 3, pp. 418-431.

Berman, B. (2012), "3-D printing: The new industrial revolution", *Business horizons*, Vol. 55 No. 2, pp. 155-162.

Board of Innovation (2015), “B2B revenue model options“, available at: <http://www.boardofinnovation.com/business-revenue-model-examples/> (Stand: 10.12.2015)

- Bortz, J. und Döring, N. (2005), *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, 3. überarbeitete Auflage, Springer, Berlin, Deutschland
- Carbon3D (2015), „Carbon3D“, available at: [www.carbon3d.com](http://www.carbon3d.com) (Stand 10.12.2015)
- Cohen, D. L. (2014), “Fostering Mainstream Adoption of Industrial 3D Printing: Understanding the Benefits and Promoting Organizational Readiness”, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 1 No. 2, pp. 62-69.
- Cohen, D.L., George, K. und Shaw, C. (2014), “Are you ready for 3D printing?”, *McKinsey Quarterly*, available at: [http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/are\\_you\\_ready\\_for\\_3-d\\_printing](http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/are_you_ready_for_3-d_printing) (Stand 01.11.2015).
- Concept Laser (2015), “Concept Laser”, available at: [www.concept-laser.de](http://www.concept-laser.de) (Stand 01.11.2015)
- Coughlan, P. und Coghlan, D. (2002), „Action research for operations management“, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 22 No. 2, pp. 220-240.
- Dyer, J. H., Cho, D. S., und Chu, W. (1998). “Strategic supplier segmentation: The next" best practice" in supply chain management”, *California management review*, Vol. 40 No. 2, pp. 57 – 77.
- Envisiontec (2015), “Envisiontec”, available at: [www.envisiontec.com](http://www.envisiontec.com) (Stand 01.11.2015).
- EOS (2015), “EOS”, available at: [www.eos.info](http://www.eos.info) (Stand 01.11.2015).
- Exone (2015), “Exone”, available at: [www.exone.com](http://www.exone.com) (Stand 01.11.2015).
- Gartner (2015), “Gartner's 2014 Hype Cycle for Emerging Technologies Maps the Journey to Digital Business”, available at: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918> (Stand 01.11.2015).
- Gausemeier, J., Wall, M. und Peter, S. (2013), „Research Strategies for Additive Manufacturing Technologie“, available at: [https://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/Download/data/DMRC\\_Studien/DMRC\\_Study\\_Strategy.pdf](https://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/Download/data/DMRC_Studien/DMRC_Study_Strategy.pdf) (Stand 01.11.2015).
- GE Reports (2014), “World’s first plant to print jet engine nozzles in mass production”, available at: <http://www.gereports.com/post/91763815095/worlds-first-plant-to-print-jet-engine-nozzles-in-mass> (Stand 01.11.2015).
- Gebhardt, A. (2007), *Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping-rapid tooling-rapid manufacturing*, Hanser Verlag, München, Deutschland.
- Gibson, I., Rosen, D.W. und Stucker, B. (2009), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, Berlin, Deutschland.

Hague, R., Mansour, S. und Saleh, N. (2004), "Material and design considerations for rapid manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 42 No. 22, pp. 4691–4708.

Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J. und Walter, M. (2010), "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 21 No. 6, pp. 687–697.

Hopkinson, N. und Dickens, P. (2001), "Rapid prototyping for direct manufacture", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7 No. 4, pp. 197-202.

Hopkinson, N. (2006), *Production Economics of Rapid Manufacture*, John Wiley & Sons, Chichester, England.

HP 3D printing (2015), "HP 3D printing with Multi Jet Fusion™ technology", available at: <http://www8.hp.com/us/en/commercial-printers/floater/3Dprinting.html> (Stand: 10.12.2015)

Kalweit, A., Paul, C., Peters, S. und Wallbaum, R. (2011), *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*, Springer, Berlin, Deutschland.

Karlsson, C. (2009), *Researching operations management*, Taylor & Francis, New York, USA

Khajavi, S. H., Partanen, J. und Holmström, J. (2014), "Additive manufacturing in the spare parts supply chain", *Computers in Industry*, Vol. 65 No.1, pp. 50-63.

Levy, G. N., Schindel, R. und Kruth, J. P. (2003), "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52 No. 2, pp. 589-609.

Levy, G. und Schmid, M. (2012), "Quality management and estimation of quality costs for additive manufacturing with SLS", paper presented at the Direct Digital Manufacturing Conference, 14-15 März 2012, Berlin, Deutschland.

Lipson, H. (2011), "The Shape of Things to Come: Frontiers in Additive Manufacturing", *Frontiers of Engineering*, pp.33–44.

Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs R., Bisson, P. und Marrs A. (2013), "Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy", *McKinsey Global Institute Report*, available at: [www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/Insights%20and%20pubs/MGI/Research/Technology%20and%20Innovation/Disruptive%20technologies/MGI\\_Disruptive\\_technologies\\_Full\\_report\\_May2013.ashx](http://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/Insights%20and%20pubs/MGI/Research/Technology%20and%20Innovation/Disruptive%20technologies/MGI_Disruptive_technologies_Full_report_May2013.ashx) (Stand 01.11.2015).

Morales Cantú, K. M. und Wisalchai Jonsson, E. (2012), "3D PRINTING FOR END PRODUCTS: A case study of the industry, its capabilities and value chain", available at: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A534968&dsid=-3183> (Stand 01.11.2015)

- Muffatto, M. und Payaro, A. (2004), "Integration of web-based procurement and fulfillment: A comparison of case studies", *International Journal of Information Management*, Vol. 24 No.4, pp. 295–311.
- Munguía, J., de Ciurana, J., und Riba, C. (2008), "Pursuing successful rapid manufacturing: a users' best-practices approach", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14 No. 3, pp. 173-179.
- Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. und Seneviratne, L. (2006), "Product cost estimation: Technique classification and methodology review", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128 No. 2, pp. 563-575.
- Rehman, S. und Guenov, M.D. (1998), "A methodology for modeling manufacturing costs at Conceptual design", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 35 No.3, pp. 623-626.
- Rickenbacher, L., Spierings, A. und Wegener, K. (2013), "An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 19 No. 3, pp. 208-214.
- Roche, E. (1995). "Business value of electronic commerce over interoperable networks". Discussion Paper, *National Science Foundation*, Rosslyn, VA, July 6–7.
- Rommel, S., und Fischer, A. (2013). „Additive Manufacturing—A Growing Possibility to Lighten the Burden of Spare Parts Supply", *Digital Product and Process Development Systems*, Springer, Berlin, Deutschland, pp. 112 - 123
- Ruffo, M., Tuck, C. und Hague, R. (2006a), "Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220 No. 9, pp. 1417-1427.
- Ruffo, M., Tuck, C. und Hague, R. (2006b), "Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA", *International Journal of Production Research*, Vol. 44 No. 23, pp. 5131-5146.
- Ruffo, M. und Hague, R. (2007), "Cost estimation for rapid manufacturing—simultaneous production of mixed components using laser sintering", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221 No. 11, pp. 1585-1591.
- Ruffo, M., Tuck, C. und Hague, R. (2007), "Make or buy analysis for rapid manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13 No. 1, pp. 23-29.
- Schönsleben, P. (2011), *Integriertes Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*, Springer, Heidelberg, Deutschland
- Scott, J., Gupta, N., Weber, C. L., Newsome, S., Wohlers, T. und Caffrey, T. (2012), "Additive Manufacturing: Status and Opportunities", *Science and Technology Policy Institute*, available at: [https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/IDA\\_AdditiveM3D\\_33012\\_Final.pdf](https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/IDA_AdditiveM3D_33012_Final.pdf) (Stand 01.11.2015)

Sheldon, D. F., Perks, R., Jackson, M., Miles, B.L. und Holland, J. (1990), "Designing for whole life costs at the concept stage", *Journal of Engineering Design*, Vol. 1 No. 2, pp. 131-145.

SLM Solutions (2015), "SLM Solutions", available at: [www.slm-solutions.com](http://www.slm-solutions.com) (Stand 01.11.2015).

Smithers Pira (2015) "Global market for 3D printing expected to reach over \$49 billion by 2025", available at: [http://www.smitherspira.com/news/2015/june/3d-print-market-expected-to-reach-\\$49b-by-2025](http://www.smitherspira.com/news/2015/june/3d-print-market-expected-to-reach-$49b-by-2025), (Stand 1.12.2015).

Standing, S., Standing, C. und Love, P. E. (2010) "A review of research on e-marketplaces 1997-2008" *Decision Support Systems*, Vol. 49 No. 1, pp. 41–51.

Stratasys (2015), "Stratasys", available at: [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com) (Stand 01.11.2015).

The Economist (2012), "The third industrial revolution", available at: <http://www.economist.com/node/21553017>, (Stand 01.11.2015)

Thomas, D. S. und Gilbert, S. W. (2014), "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing", *NIST special publication*, available at: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1176.pdf> (Stand 01.11.2015).

Tuck, C., Hague, R. und Burns, N. (2007), "Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice", *International Journal of Services and Operations Management*, Vol. 3 No. 1, pp. 1-22.

VDI (2014), *Richtlinie 3404: Additive Fertigung - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*, VDI, Düsseldorf, Deutschland

Verhasselt, S. (2012), *Möglichkeiten und Grenzen einer Anwendung von Postponement-Strategien in pharmazeutischen Supply Chains*, ETH Zurich, Zurich.

Verl, A., Grzesiak, A., Wolf, A., Becker, R. und Breuninger, J. (2012), *Generative Fertigung Mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion Durch Selektives Lasersintern*, Springer, Berlin, Deutschland

Voss, C., Tsikriktsis, N. und Frohlich, M. T. (2002), „Case research in operations management”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, pp. 195–219.

Voxeljet (2015), "Voxeljet", available at: [www.voxeljet.de](http://www.voxeljet.de) (Stand 01.11.2015).

Walter, M., Holmström, J., Tuomi, J. und Yrjölä, H. (2004), "Rapid manufacturing and its impact on supply chain management", *Proceedings of the Logistics Research Network Annual Conference*, pp. 9–10.

Wah Fong, S., Cheng, E. W., und Ho, D. C. (1998) "Benchmarking: a general reading for management practitioners" *Management Decision*, Vol. 36 No. 6, pp. 407-418.

Willner, O. (2015), *Strategien zur wettbewerbsfähigen Organisation des Engineerings kundenspezifischer Produkte*, ETH Zurich, Zurich.

Wohlers, T (2013), *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*, Colorado, USA

Wohlers, 2015, “Wohlers Associates Publishes 20th Anniversary Edition of Its 3D Printing and Additive Manufacturing Industry Report”, available at:  
<http://www.wohlersassociates.com/press69.html> (Stand 01.11.2015).

Yin, R.K., (2013), *Case study research: Design and methods*, Sage publications, London, England

Zhang, Y. und Bernard, A. (2013), “Generic build time estimation model for parts produced by SLS”, in da Silva Bartolo, P. J. et al. (Eds.), *High Value Manufacturing: Advance Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 1-5 October 2013, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 43-48.

## **Teil II: Nachdruck der Publikationen**

# Article Title Page

## Additive manufacturing cost estimation for buy scenarios

**Author Details** (please list these in the order they should appear in the published article)

Author 1 Name: Matthias Baldinger  
Department: BWI Center for Industrial Management  
University/Institution: ETH Zurich  
Town/City: Zurich  
Country: Switzerland

Author 2 Name: Gideon Levy  
University/Institution: TTA Technology Turn Around  
Town/City: Orselina  
Country: Switzerland

Author 3 Name: Paul Schönsleben  
Department: BWI Center for Industrial Management  
University/Institution: ETH Zurich  
Town/City: Zurich  
Country: Switzerland

Author 4 Name: Matthias Wandfluh  
Department: BWI Center for Industrial Management  
University/Institution: ETH Zurich  
Town/City: Zurich  
Country: Switzerland

*NOTE: affiliations should appear as the following: Department (if applicable); Institution; City; State (US only); Country. No further information or detail should be included*

**Corresponding author:** Matthias Baldinger  
**Corresponding Author's Email:** [mbaldinger@ethz.ch](mailto:mbaldinger@ethz.ch)

Please check this box if you do not wish your email address to be published

**Acknowledgments (if applicable):** This study was conducted by ETH Zurich. The data was provided by Additively Ltd., which operates an online marketplace for additive manufacturing.

### Biographical Details (if applicable):

[Author 1 bio] Matthias Baldinger is investigating in his PhD studies supply chain-related questions in additive manufacturing (AM), with a special focus on make-or-buy decisions and the structure of the AM service provider market.

[Author 2 bio] Prof. Dr. Gideon Levy is a Fellow of The International Academy for Production Engineering (CIRP). His contribution are related to additive manufacturing research and electro physical & chemical processes. He has been recognized with several AM awards (e.g. TCT Magazine "Top 25 Most Influential People in RPD&M", RTAM/SME Industry Achievement Award).

[Author 3 bio] Prof. Dr. Paul Schönsleben is professor of logistics, operations and supply chain management at ETH Zurich. He is head of the BWI Center for Industrial Management at ETH Zurich.

[Author 4 bio] Matthias Wandfluh is doing his PhD studies in the field of supply chain and operations management.



**Structured Abstract:**

**Purpose:** To design for additive manufacturing (AM), the decision to use AM needs to be taken early in the product development process. Therefore, engineers need to be able to estimate AM part cost based on the few parameters available at this point in the process. This paper develops suitable cost estimation models for buy scenarios, as many companies choose to buy parts at service providers.

**Design/methodology/approach:** This study applies analogical cost estimation techniques to a dataset of price quotations for laser sintering and laser melting parts.

**Findings:** The paper proposes easy-to-apply cost estimation models for laser sintering and laser melting for buy scenarios. Further, it generates new insights on the AM service provider market.

**Research limitations/implications:** The proposed models are only suitable for buy scenarios and are only a snapshot of cost achievable in 2014.

**Practical implications:** The proposed cost estimation models enable engineers to approximate AM part costs early in the product development process and thereby ease the decision to rapid manufacture certain parts.

**Originality/value:** This study addresses two gaps in the AM cost literature. It is the first study to take a qualitative approach to AM cost estimation, which is more suitable early in the product development process than the currently available quantitative studies. Further, it develops the first cost estimation for buy scenarios.

**Keywords:** Additive manufacturing cost, cost estimates, make-or-buy, service providers

**Article Classification:** Research paper

---

*For internal production use only*

**Running Heads:**

# Additive manufacturing cost estimation for buy scenarios

## Motivation

Even though it was originally developed for rapid prototyping, additive manufacturing (AM) is increasingly used for the direct production of final parts, which is referred to as rapid manufacturing (Hopkinson *et al.*, 2001; Levy *et al.*, 2003). As a production method, AM has great potential for two reasons: First, it may enable a supply chain with on-demand and on-location production of customized parts (Tuck *et al.*, 2007). Second, it offers new geometric freedoms, allowing complex lightweight structures or performance-optimized shapes, for instance. At present, laser sintering and laser melting seem to be the most promising technologies for rapid manufacturing (Grzesiak *et al.*, 2012).

To realize a successful rapid manufacturing application, it is crucial to design parts specifically for AM. Therefore, in analogy to 'Design for Manufacture' for traditional manufacturing, specific 'Design for Rapid Manufacturing' (Hague *et al.*, 2004) or 'Design for Additive Manufacturing' (Gibson *et al.*, 2010) rules have been proposed. Often it is not sufficient to change part design, but rather whole assemblies need to be redesigned (Atzeni *et al.*, 2010). This implies that the decision to rapid manufacture a part or assembly needs to be taken early in the product development process, when part and assembly design is not yet fixed.

To decide to rapid manufacture a part or assembly, engineers need to be able to estimate AM part cost. They therefore need a cost estimation model that is suitable early in the product development process. Several studies have looked at additive manufacturing cost, but they have two shortcomings for the above purpose. First, they used quantitative cost estimation techniques, which are less suitable early in the product development process than qualitative techniques (Niazi *et al.*, 2006). Second, many companies choose to buy AM parts at service providers (Gebhardt, 2007), wherefore they need an estimation model for

buy scenarios. However, only estimation models for make scenarios are currently available, where machines are operated in-house.

This study addresses the above gaps by developing qualitative cost estimation models for laser sintering and laser melting parts bought at service providers.

## **Literature review**

### *Cost estimation*

Most of a product's total lifecycle cost is defined during the conceptual design phase (Sheldon *et al.*, 1990). Therefore, cost estimation early in the product development process is crucial (Rehman and Guenov, 1998).

There are various cost estimation techniques. Niazi *et al.* (2006) classified them into four groups:

- **Qualitative: Intuitive techniques:** These techniques are based on experience. Typically, a domain expert's knowledge is used to estimate cost.
- **Qualitative: Analogical techniques:** These techniques are based on historical data. Similarity between historical and new parts is used to estimate cost.
- **Quantitative: Parametric cost estimation techniques:** These techniques estimate cost by expressing it as a function of its constituent variables, often referred to as cost drivers.
- **Quantitative: Analytical cost estimation techniques:** This approach, typically found in ERP environments (see Schönsleben, 2012), decomposes a product into elementary units, operations, and activities that are required in order to manufacture the product. The cost components are then summed up to derive product cost.

Niazi *et al.* (2006) concluded that qualitative techniques are favorable for cost estimation early in the product development process, as they require little information and are easy to apply. Even though they often lack accuracy, they are still a good foundation for decision making at this stage.

Intuitive techniques are a good solution, if a company has experts that can do rough-cut cost estimations. For traditional manufacturing methods, companies often employ cost engineers for this task. However, most companies do not have the required knowledge with regard to AM. Therefore, analogical techniques are the most suitable option. Here, part cost is estimated by comparing new parts to a dataset of historical parts according to certain similarity criteria. This study uses mean calculation within data groups and regression analysis in order to do so.

### *Additive manufacturing cost*

Many studies have looked into AM cost for laser sintering and laser melting. The majority of them analyzed cost for make scenarios, where machines are operated in-house. Several researchers identified the different types of cost associated with AM (e.g., Gebhardt, 2007; Gibson *et al.*, 2009). Further studies investigated how to sum up these different costs and break them down to actual parts built (Ruffo *et al.*, 2006a, 2006b; Baumers *et al.*, 2012, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Rickenbacher *et al.*, 2013). Cost per part is often compared to traditional manufacturing methods (Hopkinson and Dicknes, 2003; Hopkinson 2006). As this direct comparison is seldom favorable, Atzeni *et al.* (2010) and Atzeni and Salmi (2012) looked at how parts and assemblies can be redesigned to create a positive business case. Other recent studies took a more holistic view of AM cost, for instance by including quality assurance cost (Levy and Schmid, 2012) or supply chain cost (Khajavi *et al.*, 2014).

Ruffo *et al.* (2006a) and others found the following relationship between cost per  $\text{cm}^3$  (or part) and total volume (volume \* number of parts) for make scenarios: Cost per  $\text{cm}^3$  decreases with increasing total volume up to a certain threshold. After this threshold, cost per  $\text{cm}^3$  stabilizes, and there is a linear relationship between total volume and total cost.

Even though many companies choose to buy AM parts at service providers rather than invest themselves (Baldinger, 2013; Gebhardt, 2007), very few available studies looked at AM cost for buy scenarios. In 2007, Ruffo *et al.* concluded that the make scenario is more favorable due to lacking competition and resulting high prices at service providers. However,

this has changed in past years, and in 2012 the service provider market reached approx. EUR 700 million (USD 800 million) (Wohlers, 2013). Baldinger and Duchi (2013) conducted a global benchmark study with five reference parts. They found considerable variation in market prices and suggested an achievable cost per cm<sup>3</sup> of 0.5 – 1 EUR for laser sintering in PA12. However, this is only valid for parts similar to their benchmark parts ordered in comparable quantities.

Table 1 classifies the different studies in terms of cost estimation technique and supply chain setup. To our knowledge, there is currently no study available that takes a qualitative approach to estimating AM part cost. Further, no estimation model for buy scenarios exists. This study addresses the identified gap.

Table 1 about here

For the analogical cost estimation, this study uses the similarity criteria in Table 2 based on the part characteristics relevant in buy scenarios suggested by Baldinger and Duchi (2013).

Table 2 about here

## **Methodology**

### *Data set*

This study is based on service provider quotation data from a B2B online marketplace for AM ([www.additively.com](http://www.additively.com)). After excluding non-relevant and non-complete entries as well as all materials with less than 30 observations, the dataset consists of 499 quotations for laser sintering and laser melting parts in PA12, stainless steel, and aluminum collected in 2014. The dataset captures cost for direct part production. Based on a limited number of observations including post-processing, some insights into this topic can be generated. Transportation and other supply chain-related cost are excluded.

### *Analysis*

First, we check qualitatively if the volume – cost relationship in Ruffo *et al.* (2006a) also holds for buy scenarios. Second, the data is grouped for the two most important similarity

variables, total volume and packing ratio. Calculating the mean cost per  $\text{cm}^3$  within the groups leads to cost matrices that can be used for cost estimation. As only 4% of observations include post-processing, cost matrices only capture direct part production and the cost of post-processing is presented as a typical premium that is applied on top of cost for part production. Third, as there is a linear relationship between total volume and cost after a certain threshold, regression analysis is applied after this threshold to derive a second model to estimate part cost. Due to limited number of observations, this is only done for laser sintering in PA12.

In the discussion section, these models are applied to several sample parts from previous cost estimation studies.

## Results

### *Volume – cost relationship*

Figures 1, 2, and 3 show that the previously discussed total volume – cost relationship seems to hold for market prices achieved at service providers. The cost per  $\text{cm}^3$  decreases to a total volume of about  $500 \text{ cm}^3$  for PA12 and about  $100 \text{ cm}^3$  for stainless steel and aluminum. After this threshold, cost per  $\text{cm}^3$  stabilizes.

Figures 1, 2, 3 about here

### *Cost matrix*

Table 4 shows the cost matrix for laser sintering in PA12 derived from the data set. Cost per  $\text{cm}^3$  is expected to decrease from left to right (with increasing packing ratio) and from top to bottom (with increasing volume). All fields of the matrix with at least five observations (highlighted in bold) fulfill this relationship. These well-defined fields represent typical laser sintering parts. For untypical parts in the not defined or not well-defined fields, extrapolation can be used to get an estimated EUR per  $\text{cm}^3$ .

For laser melting in stainless steel and aluminum, the number of observations is limited, leading to many not defined or not well-defined fields in the cost matrices in Tables 4 and 5. However, the matrices still provide a rough indication of expected part cost.

Lowest costs observed are 0.147 EUR per cm<sup>3</sup> for PA12, 3.43 for stainless steel, and 3.23 for aluminum.

Tables 3, 4, 5 about here

For post-processing, we find an average premium of 37% for PA12, 26% for stainless steel and -3% for aluminum. The negative premium is not reasonable, however arises from the very low number of observations with post-processing in this material (only 3 observations).

### *Regression analysis*

For the laser sintering PA12 quotations with total volume above 500 cm<sup>3</sup>, the variables total volume, total bounding box (=total volume / average packing ratio), number of parts, and max. height are regressed onto total cost (= cost per cm<sup>3</sup> \* total volume). Height is highly insignificant with a P-Value of 0.81 and was therefore eliminated from the regression. Table 6 summarizes the results of the regression with only significant variables at the 95% level.

Table 6 about here

This leads to the following formula to estimate cost for PA12 parts with total volume above 500 cm<sup>3</sup>:

$$C_{tot} = 459 + 0.213 * V_{tot} + 0.0197 * BB_{tot} + 2.57 * Q_{tot}$$

## **Discussion**

### *Comparison to previous results*

In Table 7 the proposed models are applied to different parts of previous AM cost studies. Baldinger and Duchi's (2013) results can be used to validate the proposed models, as market prices should not have changed much between 2013 and 2014. Looking at the differences, the cost matrix seems to be leading to better results than the regression analysis. The results confirm that the situation on the service provider market today is

different than 2007, with expected average cost 42% respective 63% lower than reported by Ruffo *et al.* (2007) for the two sample parts.

Comparing the calculated cost to the results of the make studies gives some insights for make-or-buy decisions. Compared to Ruffo and Hague (2007) and Baumers *et al.* (2012), the models propose slightly lower cost. Only the Ruffo *et al.* (2006a) study reports cost below the models. The reason could be that they optimize utilization to minimize cost.

In this study, typical requests were not optimized for utilization. Further, the models calculate average market prices, which means that a company can typically do better than average by comparing multiple quotes. The results suggest that cost comparable to in-house production can be achieved on the market today.

Table 7 about here

### *Volume-cost relationship and threshold*

The study shows that the volume-cost relationship suggested by Ruffo *et al.* (2006a) and others also holds for buy scenarios. The threshold where cost per cm<sup>3</sup> stabilizes lies around 500 cm<sup>3</sup> for laser sintering in PA12 and around 100 cm<sup>3</sup> for laser melting in aluminum and stainless steel. Typical build volumes of machines are higher for laser sintering than for laser melting, which might explain the higher threshold for laser sintering. Companies ordering AM parts should be aware of this threshold and try to consolidate parts in order to request total volumes above it.

### *Estimating cost*

Validating the models against the Baldinger and Duchi (2013) study, the cost matrices lead to better results than the regression analysis. As the applicability of the regression is limited to laser sintering parts above 500 cm<sup>3</sup>, we propose the cost matrices as the model of choice for cost estimation early in the product development process.

Engineers can use the cost matrices to estimate part cost based on total volume and packing ratio. These variables should be available already at the beginning of the product development process, thus fulfilling the purpose discussed in this study.

Further, the study reports lowest cost per cm<sup>3</sup> of 0.14 EUR for PA12, 3.43 EUR for stainless steel and 3.23 EUR for aluminum. This gives an indication of what cost could be achieved if parts and orders were optimized to minimize cost.

### *Limitations*

This study has several limitations. The models are derived based on quotations from service providers, so they are only suitable to estimate cost for buy scenarios. As with any study on market prices, this is only a snapshot of cost achievable in 2014. Due to the low number of observations, post-processing cost is only captured in the form of a premium. Further work is needed in this field to enable a proper estimation. Estimating average market prices typically leads to an overestimation of cost, as companies can typically do better than average by comparing several quotations. Last, there are limitations due to the simplicity of the techniques, which estimate cost based on only a few variables.

The goal of this study is to propose cost estimation models that can easily be applied early in the product development process. Despite the limitations, the proposed models are simple to apply, and they seem to generate reasonable results. As Niazi *et al.* (2006) stated, the qualitative models lack accuracy, but they are still a good foundation for decisions early in the product development process.

## **Conclusions**

This study suggests qualitative cost estimation models based on cost matrices for engineers to estimate part cost when bought at service providers. The cost matrices only require total volume and average packing ratio as input variables and are therefore suitable for early in the product development process.

The study generates further insights on laser sintering and laser melting cost. First, cost per cm<sup>3</sup> achieved on the market decreases with total volume up to a certain threshold. This implies that companies should try to order parts with total volume above this threshold. Second, today's market prices seem to be comparable to cost achieved in-house. Third, the study suggests lowest cost achievable for laser sintering and laser melting as a reference for what could be achieved if parts and orders were optimized to minimize cost.

This study gives engineers a tool to estimate part cost early in the product development process and thereby eases the decision to rapid manufacture parts.

## References

- Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P. and Salmi, A. (2010), "Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16 No. 5, pp. 308–317.
- Atzeni, E. and Salmi, A. (2012), "Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62 No. 9-12, pp. 1147-1155.
- Baldinger, M and Duchi, A. (2013), "Price benchmark of laser sintering service providers", in da Silva Bartolo, P.J. et al. (Eds.), *High Value Manufacturing: Advance Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 37-42.
- Baldinger, M. (2013), "Best Practice beim Kauf von Bauteilen aus dem 3D-Drucker, *Maschinenmarkt*", Vol. 14, pp. 62-63.
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., and Hague, R. (2013), "Transparency Built-in". *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 17 No. 3, pp. 418-431.
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. and Hague, R. (2012), "Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser

- sintering”, in Bourell, D. et al. (Eds.), *Proceedings of Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*, 6-8 August, 2012, Austin, TX, Vol. 13.
- Gebhardt, A. (2007), *Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping-rapid tooling-rapid manufacturing*, Hanser Verlag, Munich, Germany.
- Grzesiak, A., Verl, A., Wolf, A., Breuninger, J., and Becker, R. (2013), *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern*, Springer Vieweg, Berlin, Germany.
- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2009), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, Berlin, Germany.
- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), “Design for additive manufacturing”. In Gibson, I. et al (Eds.), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, Berlin, Germany, pp. 283-316.
- Hague, R., Mansour, S. and Saleh, N. (2004), “Material and design considerations for rapid manufacturing”, *International Journal of Production Research*, Vol. 42 No.22, pp. 4691–4708.
- Hopkinson, N. and Dickens, P. (2001), “Rapid prototyping for direct manufacture”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7 No. 4, pp. 197-202.
- Hopkinson, N. (2006), *Production Economics of Rapid Manufacture*, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Khajavi, S. H., Partanen, J. and Holmström, J. (2014), “Additive manufacturing in the spare parts supply chain”, *Computers in Industry*, Vol. 65 No.1, pp. 50-63.
- Levy, G.N., Schindel, R. and Kruth, J.P. (2003), “Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52 No. 2, pp. 589-609.
- Levy, G. and Schmid, M. (2012), “Quality management and estimation of quality costs for additive manufacturing with SLS”, paper presented at the Direct Digital Manufacturing Conference, 14-15 March, 2012, Berlin, Germany.

- Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. and Seneviratne, L. (2006), "Product cost estimation: Technique classification and methodology review", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128 No. 2, pp. 563-575.
- Rehman, S. and Guenov, M.D. (1998), "A methodology for modeling manufacturing costs at Conceptual design", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 35 No.3, pp. 623-626.
- Rickenbacher, L., Spierings, A. and Wegener, K. (2013), "An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 19 No. 3, pp. 208-214.
- Ruffo, M., Tuck, C. and Hague, R. (2006a), "Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220 No. 9, pp. 1417-1427.
- Ruffo, M., Tuck, C. and Hague, R. (2006b), "Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA", *International Journal of Production Research*, Vol. 44 No. 23, pp. 5131-5146.
- Ruffo, M., Tuck, C. and Hague, R. (2007), "Make or buy analysis for rapid manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13 No. 1, pp. 23-29.
- Ruffo, M. and Hague, R. (2007), "Cost estimation for rapid manufacturing—simultaneous production of mixed components using laser sintering", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221 No. 11, pp. 1585-1591.
- Schönsleben, P. (2012). *Integral logistics management: operations and supply chain management within and across companies*, CRC Press, Boca Raton, FL
- Sheldon, D. F., Perks, R., Jackson, M., Miles, B.L. and Holland, J. (1990), "Designing for whole life costs at the concept stage", *Journal of Engineering Design*, Vol. 1 No. 2, pp. 131-145.
- Tuck, C., Hague, R. and Burns, N. (2007), "Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice", *International Journal of Services and Operations Management*, Vol. 3 No. 1, pp. 1-22.

Wohlers, T.T. (2013), *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Fort Collins, CO

Zhang, Y. and Bernard, A. (2013), "Generic build time estimation model for parts produced by SLS", in da Silva Bartolo, P.J. et al. (Eds.), *High Value Manufacturing: Advance Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. pp. 43-48.

## Additive manufacturing cost estimation for buy scenarios

Technique	Make	Buy
Qualitative		<b>Gap addressed in this study</b>
Quantitative	Baumers <i>et al.</i> , 2012, 2013 Gebhardt, 2007 Gibson <i>et al.</i> , 2009 Ruffo <i>et al.</i> , 2006a, 2006b Hopkinson and Dicknes, 2003 Hopkinson, 2006 Atzeni ,2010, 2012 Zhang <i>et al.</i> , 2013 Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013 Levy and Schmid, 2012 Khajavi <i>et al.</i> , 2014	Baldinger and Duchi, 2013 Ruffo <i>et al.</i> , 2007

**Table 1** Classification of studies on AM cost, and the gap addressed in this study

Criteria	Description
Total volume ( $V_{tot}$ )	$V_{tot} = \sum_{i=1}^n V_i * Q_i$ <p>Whereby, <math>V_i</math> is volume of part i and <math>Q_i</math> quantity of part i for n different parts.</p>
Average packing ratio ( $PR_{avr}$ )	$PR_{avr} = \frac{V_{tot}}{BB_{tot}}, \text{ whereby } BB_{tot} = \sum_{i=1}^n BB_i * Q_i$ <p>Whereby, <math>BB_i</math> is the bounding box of part i. Average packing ratio across all individual parts is under control of the company in a buy scenario (packing ratio of the actual build is under control of the service provider).</p>
Total number of parts ( $Q_{tot}$ )	$Q_{tot} = \sum_{i=1}^n Q_i$
Max. Height ( $H_{max}$ )	$H_{max} = MAX(H_i)$ <p>Whereby, <math>H_i</math> is the height of part i. Maximum height of the build is relevant at low machine utilization. Therefore, height of the tallest part might be relevant.</p>

**Table 2** Similarity variables, with decreasing importance from top to bottom

EUR per cm <sup>3</sup>	Packing ratio group			
	a. <0.05	b. 0.05 - 0.1	c. 0.1 - 0.5	e. 0.5 - 1
Total volume group				
a. 5 - 25	4.71	8.38	5.42	4.95
b. 25 - 50	15.96	4.18	3.69	
c. 50 - 100	3.48	2.17	1.91	1.33
d. 100 - 250	2.74	2.29	1.70	1.23
e. 250 - 500	1.65	1.52	1.11	1.71
f. 500 - 1000		0.79	0.79	0.77
g. 1000 - 10000	1.61	0.98	0.71	0.40
h. >10000			0.48	

**Table 3** Cost matrix for laser sintering in PA12

EUR per cm <sup>3</sup>	Packing ratio group		
Total volume group	a. <0.05	b. 0.05 - 0.1	c. 0.1 - 0.5
a. 5 - 25		79.99	<b>75.05</b>
c. 50 - 100			<b>41.42</b>
d. 100 - 250			11.73
e. 250 - 500		12.40	6.87
f. 500 - 1000		19.28	7.99
g. 1000 - 10000		15.77	<b>10.84</b>
h. >10000	10.26		

**Table 4** Cost matrix for laser melting in stainless steel

EUR per cm <sup>3</sup>	Packing ratio group		
Total volume group	a. <0.05	b. 0.05 - 0.1	c. 0.1 - 0.5
a. 5 - 25		46.87	
c. 50 - 100		<b>16.51</b>	
d. 100 - 250	10.49		
e. 250 - 500		<b>7.30</b>	
f. 500 - 1000	7.57	<b>9.51</b>	
g. 1000 - 10000		6.38	5.80

**Table 5** Cost matrix for laser melting in aluminum

<i>Regression statistics</i>	
Multiple R	0.95027
R Square	0.903013
Adjusted R Square	0.90102
Standard Error	1334.517
Observations	150

	<i>Standard</i>			
	<i>Coefficients</i>	<i>Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	459.2793	120.5703	3.809223	0.000205
Total volume	0.213105	0.013257	16.07543	4.11E-34
Total bounding box	0.019741	0.00263	7.507003	5.5E-12
Number of parts	2.567172	0.192242	13.35389	4.39E-27

**Table 6** Regression results with only significant variables

Study	Make-or-buy	Parts	Total volume	Pack ratio	# of parts	Material	Cost per cm <sup>3</sup> study	Cost matrix	Diff. matrix	Regression	Diff. regression
Baldinger and Duchi (2013)	Buy	Part A (1)	27	0.50	1	PA12	4.20	<b>3.69</b>	-12%		
		Part A (100)	2'700	0.50	100	PA12	0.87	<b>0.71</b>	-19%	<b>0.53</b>	-40%
		Part B (1)	54	0.50	1	PA12	2.48	<b>1.91</b>	-23%		
		Part B (100)	5'400	0.50	100	PA12	0.74	<b>0.71</b>	-4%	<b>0.39</b>	-47%

		Part C (1)	27	0.10	1	PA12	4.70	<b>4.18</b>	-11%		
		Part C (100)	2'700	0.10	100	PA12	0.90	<b>0.98</b>	9%	<b>0.68</b>	-24%
Ruffo <i>et al.</i> (2007)	Buy	Rotary knob	881	0.38	100	PA12	2.13	<b>0.79</b>	-63%	<b>1.10</b>	-48%
		Belt cover	2'228	0.04	10	PA12	2.77	<b>1.61</b>	-42%	<b>0.95</b>	-66%
Ruffo <i>et al.</i> (2006a)	Make	Lever	7'110	0.12	1'000	PA12	0.49	<b>0.71</b>	44%	<b>0.81</b>	64%
Ruffo and Hague (2007)	Make	Baske t	470'164	0.08	20'200	PA12	0.81	<b>0.67</b>	-18%	<b>0.58</b>	-28%
Baume rs <i>et al.</i> (2012)	Make	Baske t	497	0.27	85	Stainles s steel	8.67	<b>6.87</b>	-21%		

**Table 7** Cost calculated by cost matrices and regression of parts in previous studies

# Additive manufacturing cost estimation for buy scenarios

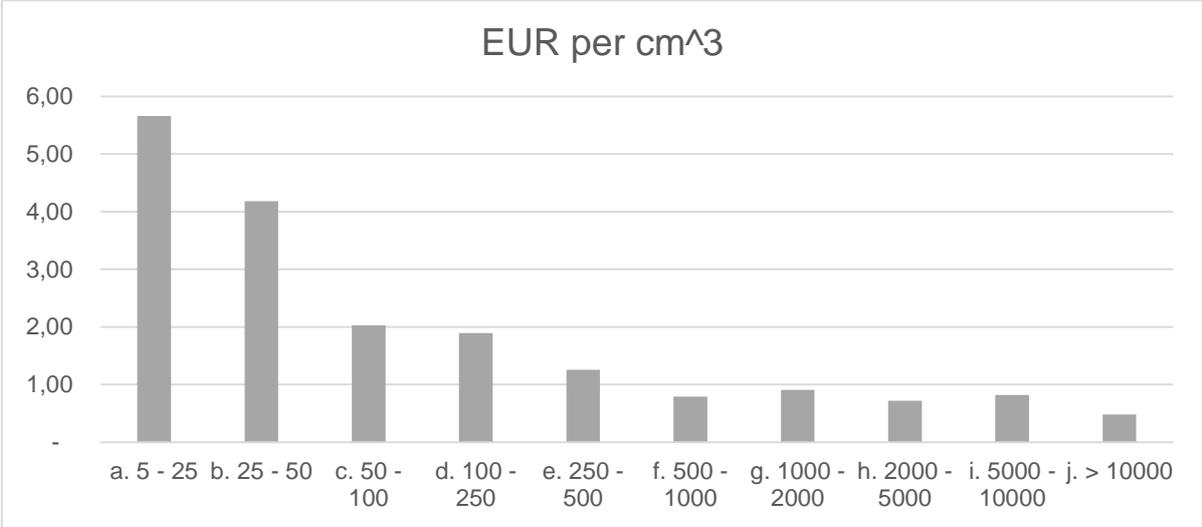


Figure 1 EUR per cm<sup>3</sup> for PA12 for different total volume brackets

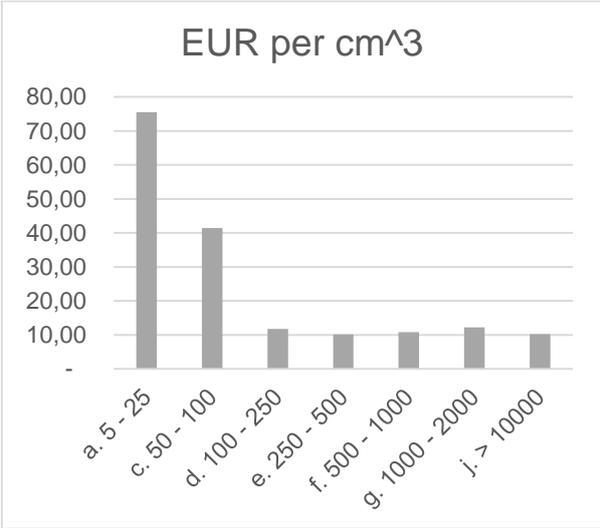


Figure 2 EUR per cm<sup>3</sup> for stainless steel

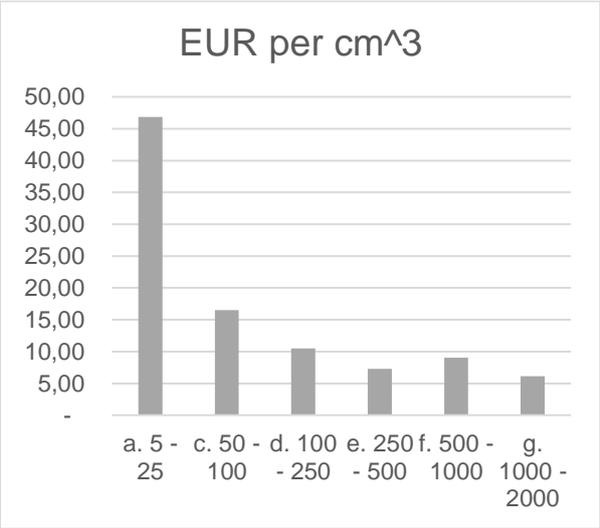


Figure 3 EUR per cm<sup>3</sup> for aluminum

# Price benchmark of laser sintering service providers

M. Baldinger & A. Duchi  
*BWI, ETH Zürich, Switzerland*

**ABSTRACT:** Additive manufacturing is not only used for rapid prototyping in product development but increasingly for rapid manufacturing – meaning for production of final parts. Besides limitations around materials, quality and standards, cost is one of the major barriers to more widespread adoption. Due to the high investment for rapid manufacturing equipment and lack of knowledge, many companies choose to buy instead of make additively manufactured parts. Despite the importance of cost, there is limited insight into the price structure of additive manufacturing service providers. This study aims to narrow this gap through a global price benchmark of laser sintering service providers.

## 1 MOTIVATION

### 1.1 *Gap in literature and industry need*

For more than a decade additive manufacturing (AM) technologies are increasingly used for production of final parts and products, which is known under the term rapid manufacturing (e.g. Levy et al. 2003). Substantial advantages of rapid manufacturing compared to traditional methods have been identified, such as the possibility to create more complex geometries, the integration of more functionality in fewer parts, new ways of customization down to one and feasibility of on-demand production. However, some limitations have prevented wider spread adoption, for instance materials available, process repeatability and quality, lack of standardization and cost (e.g. Gebhardt 2007, Verl et al. 2012, Scott et al. 2012). Despite the importance of cost, Munguia et al. (2008) state that there is limited insight into this field.

Due to high investments, potentially suboptimal utilization, short technology life-cycles and the need for qualified employees, many companies choose to buy additive manufactured parts from service providers (Gebhardt 2007). Further, for companies without existing rapid prototyping or rapid manufacturing experience, the least risk choice is to outsource additive manufactured production (Ruffo et al. 2007). Services make up around 50% of the additive manufacturing market, which has in 2011 an estimated size of 1.2 Billion USD (Wohlersassociates 2010).

Even though companies are likely to use additive manufacturing service providers when adopting the

technology, there is to our knowledge few information available in literature on the price structure within this market. As laser sintering (LS) is seen as one of the most promising additive manufacturing technologies for rapid manufacturing (Verl et al. 2012), this study aims at providing additional insight by price benchmarking LS service providers. It thereby supports companies aiming at sourcing additive manufacturing services.

### 1.2 *Key questions to be addressed*

The following key questions should be addressed:

- 1) What is the price range per  $\text{cm}^3$  across providers?
- 2) What are the drivers of price per  $\text{cm}^3$  in terms of parameters relevant to buyers (e.g. part characteristics),
- 3) What are implications for potential buyers of such services?

In order to answer these questions, this paper is structured as follows: First an overview over the laser sintering process is provided. Secondly from a review of additive manufacturing cost literature the main cost drivers relevant to buyers of such services are derived. Next the methodology of the benchmark study is introduced, which should test whether the identified cost drivers also drive prices. Afterwards, results are presented and discussed. The paper closes with an outlook what further research in the field is suggested.

## 2 LITERATURE REVIEW

### 2.1 *Laser sintering*

Laser sintering is an additive manufacturing process in which thermal energy is used to selectively fuse raw material in powder form. In preparation of the process a CAD model is “sliced” in layers of equal thickness. During the build, powder gets spread by a roller in a thin layer over the whole build platform and a CO<sub>2</sub> laser sinters the material together according to the “sliced” layer. Afterwards, a new layer of powder is spread until the build is finished. The process does not require any support structures, as the parts lie in the un-sintered powder. The entire build envelop can be filled with parts since they can be stacked on top of each other. The un-sintered powder can be recycled to a certain degree (e.g. Gebhardt 2007).

According to Verl et al. (2012) laser sintering of plastics is at the moment the most promising technology for innovative final products due to wide range of materials available, good mechanical properties, high heat resistance, low requirements of manual post-processing and low cost at high machine utilization. Polyamide powder (PA12) is hereby the currently most used material. Atzeni et al. (2010) further mention that laser sintering has the best balance between process accuracy and cost.

According to a study of Spanish rapid manufacturing service providers, laser sintering is the most used process for rapid manufacturing (Munguia et al. 2008).

### 2.2 *Cost of additive manufacturing*

Several authors have provided a general overview over cost elements for additive manufacturing, which can be applied to different processes (e.g. Gebhardt 2007, Gibson et al. 2009). Based on the cost elements Gebhardt (2007) mentions the following cost drivers: Lead time, build envelop utilization per build, machine utilization, material usage, process reliability, process speed.

More specifically, Hopkinson & Dicknes (2003) analyzed cost of additive manufacturing technologies when used for rapid manufacturing of two sample parts compared to traditional methods. Stereolithography, fused deposition modeling and laser sintering were compared to injection moulding. For laser sintering at full capacity, volume of part and packing of the parts in the build envelop are the key drivers of cost. Since cost is linear with volume, it does not impact cost per cm<sup>3</sup>. A cost of 0.31 EUR per cm<sup>3</sup> was calculated for one of the sample parts in PA12. However, how part characteristics and process parameters influence build time was not evaluated and therefore their impact on cost remains unclear.

Building on this work, Ruffo et al. (2006a,b) proposed a model that accounts for influences on build time and not fully utilized capacity. Hereby, the cost curve is dependent on the quantity of parts produced, with jumps in it whenever a) a new row of parts need to be added in y-direction, b) a new layer of parts needs to be added, c) an additional build envelop of parts needs to be added. It starts at high cost per part which overall decreases with quantity until reaching a stable level. Part characteristics driving cost are volume, height (in z-direction) and packing ratio (defined as volume of parts divided by bounding box). Furthermore, they showed that the process parameters layer thickness (through build time) and recycling rate of un-sintered powder are influencing cost substantially. In the proposed setting, they estimate a cost of 0.46 EUR per cm<sup>3</sup> built in PA12.

Further, Ruffo & Hague (2007) showed that through production of mixed parts in the same build, cost cannot only be reduced through increased build envelop utilization, but also through improved packing ratio when mixing parts.

Verl et al (2012) mention variable cost per part for manual handling which are independent of part size (e.g. cleaning from powder, inspection). This would lead to decreasing cost per cm<sup>3</sup> with increasing part volume.

Levy & Schmid (2012) developed a quality management system for laser sintering and estimated its cost. They found that quality cost accounts for about 10% - 20% of total cost per part.

Several authors (e.g. Lipson 2011) have pointed out as one of the key advantages of additive manufacturing that complexity of a part is for free – compared to injection moulding where part complexity is influencing the cost for a mould.

Ruffo et al. (2007) looked at make vs. buy decisions for rapid manufacturing and compared the cost (price charged) of two service providers to estimated in-house cost for two sample parts. They found that the three cost structures had the same shape with high cost at low quantities which will then decrease and stabilize around a fix cost per part at certain quantity (in the example between 20 and 50 parts). They find stable cost of around 0.8 EUR per cm<sup>3</sup> in the make scenario and 2.3 EUR per cm<sup>3</sup> in the buy scenario. The authors concluded “that the RM concept has not infiltrated these organizations [service providers] yet” as the cost structure is the same as in the make scenario.

### 2.3 *Cost drivers from buyers perspective*

Only part of the mentioned cost drivers are under control and therefore relevant to buyers of additive manufacturing services. For instance build envelop utilization is not under control of the buyer, however might be influenced by order quantity. Order quanti-

ty is therefore a relevant cost driver, but build envelop utilization is not.

Table 1 summarizes the suggested drivers of cost per cm<sup>3</sup> relevant to buyers of additive manufacturing services. Part characteristics are the actual properties of the part. Cost per cm<sup>3</sup> is assumed to decrease with increasing volume due to fix handling cost per part, to increase with decreasing packing ratio as fewer parts fit into the build, and to increase with height in case of not fully utilized build envelop. Quality relevant process parameters are process settings influencing the final quality of the part. Cost is increasing with decreasing layer thickness due to increased build time and to increase with lower tolerances as more restrictive recycling rates and quality management measures need to be applied. Finally cost might depend on the order. In case of not fully utilized build envelop, cost is assumed to decrease with ordered quantity as it follows the cost curve proposed by Ruffo et al. (2006a). However, if parts of several orders are mixed in order to achieve high build envelop utilization, cost should not depend on quantity. Further reduced lead time might increase cost as spare capacity needs to be held.

Table 1. Cost drivers of bought laser sintering parts.

Part characteristic	Quality relevant	Order
Volume	Layer thickness	Quantity
Packing ratio*	Tolerance	Lead time
Height (z-direction)		

\* Packing ratio of overall build is relevant for total cost. Since it depends on the mix of parts the service provider has, the driver relevant for the buyer is the packing ratio of the part.

In the benchmark, it is evaluated which of these suggested cost drivers are relevant price drivers of additive manufacturing services.

### 3 BENCHMARK METHODOLOGY

#### 3.1 Service providers

40 Laser Sinter service providers were selected based on Wohlersassociates (2013) and a Google search, with geographical spread according to table 2.

Table 3. Reference parts

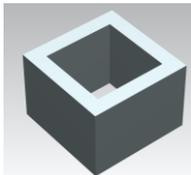
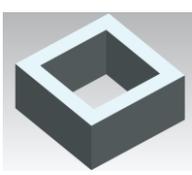
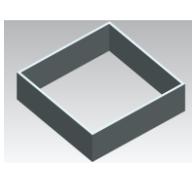
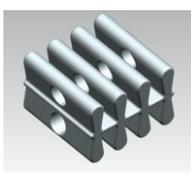
Setting	Part A	Part B	Part C	Part D	Part E
Geometry					
Volume (cm <sup>3</sup> )	27	54	27	27	27
Packing Ratio	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1
Height (z in cm)	3	3	3	3.78	3
Complexity	Low	Low	Low	Low	High

Table 2. Geographical spread and responses of service providers

Geography	Approached	Quotes received
Asia	7	2
Europe	16	11
Northern America	17	8
Total	40	21

Of the 40, 8 providers offered an instant online quoting mechanism, where parts could be uploaded, specifications entered and a price was immediately provided. The other 32 providers, the parts with a short description of the benchmark project were sent either through a specific request form on the website or via email.

#### 3.2 Quotation requested and analyzed

In order to test for the different price drivers, the study has been set up as follows. Five reference parts have been constructed as in table 3. Comparison of Part A to Part B tests whether volume has an impact on price per cm<sup>3</sup>. Comparison of Part A to Part C tests whether packing ratio has an impact on price per cm<sup>3</sup>. Comparison of Part A to Part D tests whether height has an impact on price per cm<sup>3</sup>. Comparison of Part A to Part E tests whether complexity has an impact on price per cm<sup>3</sup>. Impact of quantity is assessed through obtaining a quote for 1 of each part and 100 of each part.

Investigating the impact of layer thickness, tolerance and lead time is more difficult, as many providers only offer fix settings. The impact of these drivers as well as the overall importance of all drivers is tested through regression analysis.

There are limitations to this study set-up. The most important one is the lack of control of achieved quality. Especially since some providers claim that tolerances are only indicative. However, as the study mainly aims at providing insight in overall price levels and importance of different price drivers, this limitation is less of an issue. Further, insights are mainly valid for parts with similar characteristics than the reference parts.

## 4 RESULTS

### 4.1 Price per cm<sup>3</sup>

21 quotations have been collected as shown in Table 2. Figure 1 shows a boxplot for quoted prices per cm<sup>3</sup> for the reference parts when ordered at quantity 1. There are large differences in prices offered. For instance for part A, they range from 0.46 up to 12.79 EUR per cm<sup>3</sup>, which is a spread of factor 28. Lowest prices are achieved for part B which has most volume. Median price over all parts at quantity 1 is 2.68 EUR per cm<sup>3</sup>.

Figure 1. Price per cm<sup>3</sup> quoted at quantity 1 in EUR

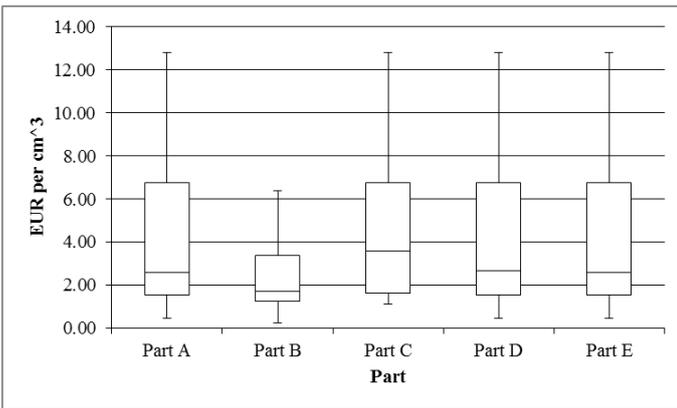
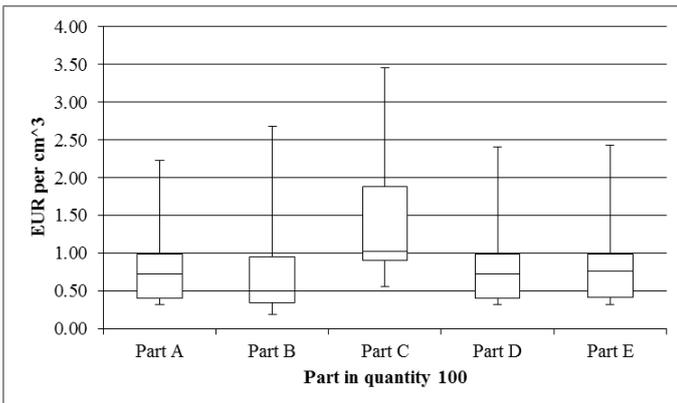


Figure 2 shows a boxplot for quoted prices per cm<sup>3</sup> for the reference parts when ordered at quantity 100. Differences in price are lower than at quantity 1. For instance for part A, they range from 0.32 up to 2.22 EUR per cm<sup>3</sup>, which is a spread of factor 7. Median price over all parts at quantity 100 is 0.79 EUR per cm<sup>3</sup>, which is a reduction of 71% compared to quantity 1. The part with highest prices is Part C which the lowest packing ratio.

Figure 2. Price per cm<sup>3</sup> quoted at quantity 100 in EUR



### 4.2 Price drivers

In order to test whether part characteristics and quantity ordered drive price, prices of parts are compared as described in section 3.2. Table 4 shows for how many percent of the providers a driver is relevant when calculating price, both at quantity 1 and

100. As an example, packing ratio is relevant for price for 76% of the providers at quantity 100. For 90% of the providers order size has an impact on price per cm<sup>3</sup>.

Table 4. Percentage of providers where driver is relevant for calculating price at quantity 1 and 100

Driver	% relevant at quantity 1	% relevant at quantity 100
Volume	82 %	76 %
Packing ratio	50 %	76 %
Height (z-direction)	27 %	14 %
Complexity	9 %	19 %
Quantity	-	90%

Further, the impact of potential price drivers was analyzed through a regression. Hereby, volume, packing ratio, height, complexity (coded as 1 for high and 0 for low), layer thickness, tolerance, quantity and lead time were regressed on price per cm<sup>3</sup>. The results are shown in table 5. Direction of the influence is as expected apart from lead time. Against expectations, longer lead times lead to higher prices. However, height, complexity and lead time are strongly insignificant (P-value above 0.5). When continuously eliminating the most insignificant variables, volume, layer thickness and quantity are the only drivers significant for price at the 95% confidence level.

Table 5. Regression of potential price drivers on price per cm<sup>3</sup>

Variable	Coefficient	Stand. Error	P-Value
Intercept	10.82	4.79	0.044
Volume (cm <sup>3</sup> )	-0.03	0.02	0.17
Packing ratio	-1.31	1.53	0.39
Height (cm)	0.10	0.79	0.90
Complexity (0,1)	0.01	0.61	0.98
Layer thickness (mm)	-24.6	9.80	0.01
Tolerance (mm)	-2.43	3.01	0.42
Quantity (#)	-0.03	0.01	<0.01
Lead time (Days)	0.02	0.05	0.52

## 5 DISCUSSION

### 5.1 Price per cm<sup>3</sup>

As expected, mean price at quantity 1 of 2.68 EUR is well above stable cost-level reported in literature between 0.3 – 0.8 EUR per cm<sup>3</sup>. However the most competitive providers get into this range, which is an indication that they might work with a different cost curve. At quantity 100, the mean price of 0.79 gets into the range of the reported cost.

The price of 2.3 EUR per cm<sup>3</sup> for service providers found by Ruffo et al in 2007 is uncompetitive today, probably due to better machines and processes as well as increased competition in and size of the additive manufacturing services market.

In general the result provides an indicative price range of 0.5 – 1 EUR per cm<sup>3</sup> achievable when buying additive manufacturing services and should therefore support companies at such considerations. The benchmark also shows that there are large differences between providers.

### 5.2 Price drivers

Volume, quantity and layer thickness seem to be the most important price drivers, which are significant at 95% confidence level in the regression. Further, packing ratio is applied by most providers when calculating price (by 50% of providers at quantity 1 and by 76% of providers at quantity 100).

Height, complexity and lead time seem to be least important price drivers, however height and complexity are applied by some providers to calculate price (e.g. complexity is applied by 19% of providers at quantity 100).

Even though tolerance has no significant impact on price in the regression, no conclusion can be drawn from this result due to the already stated limitation around this variable.

It can be concluded that providers consider different variables when calculating prices and therefore no final list of price drivers can be derived. This might be some evidence of different underlying operating models and/or pricing strategies.

Mean price reduction of 71% when ordering 100 instead of 1 part indicates that quantity seems to be a major price driver. As stated, impact of quantity on cost depends on the build envelop utilization. The impact of quantity on price should therefore be investigated in more detail in the next section.

### 5.3 Order Fulfillers and Consolidators

To better understand the impact of quantity, the price per cm<sup>3</sup> at quantity 1 is plotted against the price per cm<sup>3</sup> in quantity 100 in figure 3. The dashed line indicates where price for quantity 1 is equal to price for quantity 100. Two different groups of providers seem to exist. Providers in group A close to the dashed line charge similar prices per cm<sup>3</sup> at quantity 1 and 100. On the other hand providers in group B charge higher prices at low quantities (between 5 – 10 EUR per cm<sup>3</sup>) than at high quantities (between 0.5 – 1 EUR per cm<sup>3</sup>). These prices follow the cost curve in Ruffo et al. (2007) with high price at low quantities which then decrease. Therefore, prices seem to be calculated according to the cost occurring when producing the order by itself. We therefore refer to this group of providers as “Order Fulfillers”, which seem to apply a cost plus pricing strategy to each single order. On the other hand, group A charges similar prices when ordering 1 and 100 parts. The price reduction can probably be seen as a quantity discount only. The price curve therefore is more or less independent of quantity and flat – in contrast to the curve observed

by Ruffo et al. (2007). These providers seem to consolidate orders and then charge a price corresponding to the cost of producing at full build envelop utilization. Therefore the price stays approximately constant with quantity. We therefore refer to these providers as “Consolidators”.

In between these two groups there are several providers that probably apply a mixture of these two strategies.

Figure 3. Plot of price per cm<sup>3</sup> at quantity 1 against price per cm<sup>3</sup> at quantity 100 in EUR

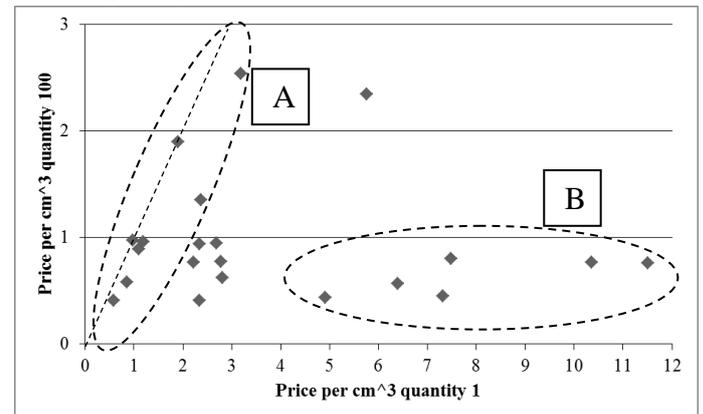


Table 7. Average of price per cm<sup>3</sup> at quantity 1 and 100, layer thickness and lead time for groups A and B

Type of provider	EUR per cm <sup>3</sup> (1)	EUR per cm <sup>3</sup> (100)	Layer (mm)	Lead time (Days)
Group A	1.52	1.20	0.13	6.88
Group B	8.00	0.63	0.11	4.00

Table 7 summarizes average prices, layer thickness and lead time for the two groups of providers. As discussed, average price at quantity 1 is higher for Order Fulfillers (group B) than for Consolidators (group A). However, at quantity 100 it is the other way round. As Consolidators take the risk to fill the build envelop, they might compensate it through a higher margin. At quantity 100 fill is high at both groups leading to similar cost and, due to potentially increased margins, to higher prices at group A. Average lead time is higher for Consolidators, as they might need more flexibility in order to achieve good build envelop fill. Order Fulfillers work on average with thinner layers than Consolidators.

In 2007 Ruffo et al. observed that AM service providers seem not to have switched to the concept of rapid manufacturing, as their price structure is similar to a make scenario (and therefore to the decreasing cost curve). This is still applicable to Order Fulfillers. However, we now have another group of providers. They consolidate different orders and produce various parts in parallel as the concept of rapid manufacturing suggests. This enables low prices also at low quantities.

#### 5.4 Implications for buyers of AM services

Concluding from the price benchmark, buyers of additive manufacturing services can expect to achieve a price level of approximately 0.5 – 1 EUR per cm<sup>3</sup> in PA12 for parts with similar characteristics than the benchmark parts. Depending on the quantity of parts to be ordered, a buyer should either turn to Consolidators or Order Fulfillers. In general, if an order can utilize a build envelop fairly well, Order Fulfillers should be approached. However, at low quantities good prices can be achieved at Consolidators.

As providers are applying different price drivers, for each part a different provider might be the most price competitive. Since prices are widely spread, it is always advisable for buyers to get quotations from several providers.

## 6 OUTLOOK

This study provides insight into the price structure of laser sinter service providers. In general it can be concluded that there are not only strong differences between prices, but also in price drivers applied.

These differences in price structures could be based on different underlying operating models and/or pricing strategies. Two types of providers based on pricing structure have already been proposed in this study – Consolidators and Order Fulfillers. Further research is required to better understand operating models and pricing strategies of additive manufacturing service providers. This could be achieved through case study research at such providers. Interesting insights could be gained how strategies and concepts of supply chain and operations management can be used within rapid manufacturing.

One of the main limitations of this study is that achieved tolerance and quality was not measured. Also in this field further research is required in order to understand how achieved quality impacts costs and prices.

## 7 REFERENCES

Atzeni, E. et al., 2010. Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), pp.308–317.

Gebhardt, A., 2007. *Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping-rapid tooling-rapid manufacturing*, Hanser Verlag.

Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B., 2009. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer.

Hopkinson, N. & Dicknes, P., 2003. Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), pp.31–39.

Levy, G.N., Schindel, R. & Kruth, J.-P., 2003. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), pp.589–609.

Levy, G. & Schmid, M., 2012. *Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS*. Direct Digital Manufacturing Conference.

Lipson, H., 2011. The Shape of Things to Come: *Frontiers in Additive Manufacturing*. *Frontiers of Engineering*, pp.33–44.

Munguia, J., de Ciurana, J. & Riba, C., 2008. Pursuing successful rapid manufacturing: a users' best-practices approach. *Rapid Prototyping Journal*, 14(3), pp.173–179.

Ruffo, M., Tuck, C. & Hague, R., 2006a. Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(9), pp.1417–1427.

Ruffo, M., Tuck, C. & Hague, R., 2006b. Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA. *International journal of production research*, 44(23), pp.5131–5146.

Ruffo, M., Tuck, C. & Hague, R., 2007. Make or buy analysis for rapid manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 13(1), pp.23–29.

Ruffo, M. & Hague, R., 2007. Cost estimation for rapid manufacturing—simultaneous production of mixed components using laser sintering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(11), pp.1585–1591.

Scott, J. et al., 2012. *Additive Manufacturing: Status and Opportunities*. Science and Technology Policy Institute, pp.1–29.

Verl, A. et al., 2012. *Generative Fertigung Mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion Durch Selektives Lasersintern*, Springer.

Wohlersassociates, 2010. *Annual Revenues from Additive Manufacturing Products and Services Worldwide*. [online] Available at: <http://wohlersassociates.com/growth2010.thm> [Accessed 8 May 2013]

Wohlersassociates, 2013, *Rapid Product Development Service Providers*. [online] Available at: <http://wohlersassociates.com/service-providers.html> [Accessed 8 May 2013]

# Ansätze zum Management der Additive Manufacturing Supply Chain

## Motivation

Additive Manufacturing (AM) kennt keine Skaleneffekte und ermöglicht daher ein anderes Supply Chain Setup als die meisten traditionellen Produktionsverfahren: Es werden nicht Bauteile in grosser Stückzahl vorab hergestellt, sondern unterschiedliche Bauteile in kleinen Stückzahlen auf Abruf produziert. Dies verspricht eine schnellere, flexiblere und kostengünstigere Supply Chain.

Viele Firmen kaufen Bauteile auf dem AM-Lieferantenmarkt. Um die Vorteile der AM Supply Chain zusammen mit Lieferanten zu realisieren, sind AM-spezifische Einkaufsprozesse nötig. Dieses Paper stellt die Anforderungen an solche Prozesse zusammen und präsentiert eine E-Procurement Lösung zur Erfüllung dieser Anforderungen.

## Unterschied zwischen Additive Manufacturing und traditioneller Fertigung

AM unterscheidet sich grundlegend in zweierlei Hinsicht zur traditionellen Fertigung (z.B. Spritzguss). Einerseits bedeutet die Komplexität von Bauteilen keine Zusatzkosten und ist generell weniger limitiert („Complexity for free“). Andererseits kennt die additive Fertigung keine Skaleneffekte, d.h. es werden keine grossen Stückzahlen zur Realisierung tiefer Stückkosten benötigt („No Economies of Scale“) (Baldinger 2013a). Auf Grund der Unterschiede stehen AM und traditionelle Fertigung nicht in Konkurrenz, sondern ergänzen sich gegenseitig. Die traditionelle Supply Chain eignet sich für grosse Stückzahlen gleicher Bauteile mit geringer Komplexität, die AM Supply Chain für kleine Stückzahlen unterschiedlicher Bauteile mit hoher Komplexität.

## Aufhebung von Limitationen im Supply Chain Setup

Die traditionellen Fertigungsmethoden haben dem Produktdesign viele Restriktionen auferlegt, welche für AM nicht mehr gelten. Diese neuen Möglichkeiten werden z.B. von Gibson et al. (2010) unter „Design for Additive Manufacturing“ beschrieben.

In gleicher Weise hat die traditionelle Fertigung durch ihre Skaleneffekte zu vielen Restriktionen im Supply Chain Setup geführt. Diese gelten nicht für die AM Supply Chain, wodurch folgende Verbesserungen ermöglicht werden:

- Reduktion von Losgrössen: Aufgrund von bauteilspezifischen Rüstkosten müssen bei traditioneller Fertigung grosse Losgrössen produziert werden. Dies führt zu hohen Lagerbeständen und Obsoleszenz. Da bei AM keine bauteilspezifischen Rüstkosten existieren, kann in kleinen Losgrössen produziert werden.
- Reduktion von Lieferzeiten: Da keine Werkzeuge gebaut werden müssen und in kleineren Stückzahlen produziert wird, können die Lieferzeiten verkürzt werden.
- Bedarfsgerechte Produktion auf Abruf: Reduzierte Losgrössen und Lieferzeiten ermöglichen eine bedarfsgerechte Produktion auf Abruf nach Kundenauftrag.
- Dezentrale Produktion: Grosse Losgrössen und Werkzeuge führen traditionell zu einer Zentralisierung der Produktion. Dies ist theoretisch für AM nicht nötig.

Da additive oft mit traditionellen Bauteilen kombiniert werden, sind die Möglichkeiten zur dezentralen Produktion beschränkt.

- Customization auf Ebene Bauteil: Da oft bauteilspezifische Werkzeuge oder Maschinencodes benötigt werden, werden einzelne Bauteile traditionell nicht kundenspezifisch gestaltet. Die Customization findet daher über den modularen Aufbau aus verschiedenen „Standardteilen“ statt. AM ermöglicht die kundenspezifische Anpassung auf Ebene Bauteil.
- Kontinuierliche Weiterentwicklung von Bauteilen: Sobald in ein Werkzeug oder einen Maschinencode investiert wird, findet ein Design Freeze statt und das Bauteil kann auch bei Mängeln nicht mehr weiterentwickelt werden. Da diese Vorabinvestitionen bei AM nicht bestehen, können Bauteile kontinuierlich weiterentwickelt werden.

### **Make-or-buy und der AM Lieferantenmarkt**

Die meisten Firmen investieren nicht selbst in AM, sondern kaufen Bauteile bei Lieferanten (Baldinger 2013b). Der AM Lieferantenmarkt stellt folgende Herausforderungen an Firmen:

- Portfolio von Lieferanten: AM steht für eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, welche eine grosse Materialvielfalt verarbeiten. Lieferanten haben typischerweise nur eine begrenzte Anzahl im Haus. Daneben unterscheiden sich die Geschäftsmodelle der Lieferanten, wodurch grosse Preisunterschiede auftreten (Baldinger und Duchi 2013). Firmen sollten daher mit einem Portfolio von Lieferanten arbeiten, um für jede Anwendung die beste Lösung zu finden.
- Häufige Wechsel: Aufgrund technologischer Weiterentwicklungen und einem sehr dynamischen Lieferantenmarkt, werden sich diese Portfolios in den kommenden Jahren häufig verändern.

### **Anforderungen an Einkaufsprozesse**

Um die Benefits der AM Supply Chain zu realisieren und den Herausforderungen des AM Lieferantenmarktes gerecht zu werden, ergeben sich spezifische Anforderungen an AM Einkaufsprozesse.

- Aufwand pro Bestellung muss reduziert werden: Aufgrund kleinerer Losgrößen und Produktion auf Abruf, ergeben sich bei AM viele Bestellungen über kleine Beträge anstelle weniger Bestellungen über grosse Beträge. Daher muss der Aufwand pro Bestellung reduziert werden.
- AM Nutzer benötigen direkten Zugang zu Lieferanten: Bei der traditionellen Fertigung werden Teile entwickelt und nach einem Design Freeze dem Einkauf „übergeben“. Hierbei verwaltet der Einkauf die begrenzte Anzahl eingefrorener Bauteile und ist der einzige Kontaktpunkt zu den Lieferanten. Additiv gefertigte Bauteile werden aber kontinuierlich weiterentwickelt und/oder an individuelle Kundenbedürfnisse angepasst. Dies führt zu einer grossen Anzahl verschiedener Bauteile, welche nicht sinnvoll vom Einkauf verwaltet werden können. Zudem führt der Weg über den Einkauf zu einer künstlichen Verlängerung der Lieferzeit. Daher sollten AM Bauteile direkt von den Mitarbeitern, die diese anpassen oder weiterentwickeln, bei Lieferanten angefragt werden. Aus diesem Grund brauchen alle AM Nutzer einen direkten

Zugang zu den Lieferanten. Die Aufgabe des Einkaufs konzentriert sich darauf, geeignete Lieferanten für die Firma auszuwählen und mit diesen sinnvolle Konditionen zu verhandeln.

- Aufwand für Lieferantenauswahl muss reduziert werden: Der Lieferantenmarkt ist aufgrund des schnellen Wachstums und der technologischen Entwicklung unübersichtlich. Die Auswahl von Lieferanten ist daher aufwendig.
- Lieferantenwechsel muss einfach möglich sein: Firmen benötigen ein Standardinterface zu allen Lieferanten um auch bei einer grossen Anzahl AM Nutzern problemlos zu wechseln

### **E-Procurement Lösungen**

E-Procurement steht für elektronische Einkaufsprozesse, insbesondere für Internet-basierte Lösungen. Hierbei gibt es verschiedene Kategorien, wobei elektronische Marktplätze grosse Zahlen von Lieferanten und Kunden verbinden (Schönsleben 2010).

Ein neutraler und öffentlicher Marktplatz verspricht hierbei die folgenden Benefits:

- Reduzierte Transaktionskosten: Durch die Digitalisierung und teilweise Automatisierung des Einkaufsprozesses kann Arbeitsaufwand stark reduziert werden (Muffatto and Payaro 2004)
- Reduzierte Suchkosten: Durch die Verbindung vieler Lieferanten und die Aggregation von Informationen zu diesen werden die Suchkosten für Käufer reduziert (Standing *et al.* 2010)
- Reduzierte Wechselkosten: Durch die offene Architektur des Internets und niedrigen Setup Kosten sind Wechselkosten zwischen Lieferanten innerhalb elektronischen Marktplätzen tief (Roche 1995)

Werden die spezifischen Anforderungen aus dem letzten Abschnitt unter diesem Kontext betrachtet, stellen die ersten zwei Punkte eine Reduktion der Transaktionskosten, der dritte eine Reduktion der Suchkosten und der vierte eine Reduktion der Wechselkosten dar. Daher scheint eine AM-spezifische E-Procurement Lösung ein geeignetes Mittel zu sein, um die Anforderungen zu adressieren.

### **Case Study Additively**

Additively AG betreibt unter [www.additively.com](http://www.additively.com) eine AM-spezifisches E-Procurement System, welche die obengenannten Punkte adressiert.

#### *Reduzierte Transaktionskosten*

Die Additively Applikation automatisiert den Workflow um Angebote einzuholen und Bauteile zu bestellen. Anfragen können im online Template in wenigen Minuten hochgeladen werden. Das Template stellt sicher, dass die wichtigsten Informationen vorhanden sind. Die Anfrage wird automatisch an Lieferanten verschickt – entweder an Lieferanten aus dem Portfolio der Firma oder geeignete Lieferanten aus dem Additively Netzwerk mit über 300 Anbietern. Eine Identifikation von Lieferanten durch die Firma entfällt. Die integrierte Workflowsoftware stellt sicher, dass die Lieferanten innert kürzester Zeit Angebote in einem standardisierten Template erstellen. Dieses ist für den Käufer einfach verständlich und vergleichbar.

Die Additively Applikation wird direkt durch den AM Nutzer bedient und durch den Einkauf gemonitort. So kann der Einkaufsprozess bedeutend effizienter gestaltet

werden und sowohl Arbeitszeit als auch Durchlaufzeit reduziert werden (siehe Abbildung 1).

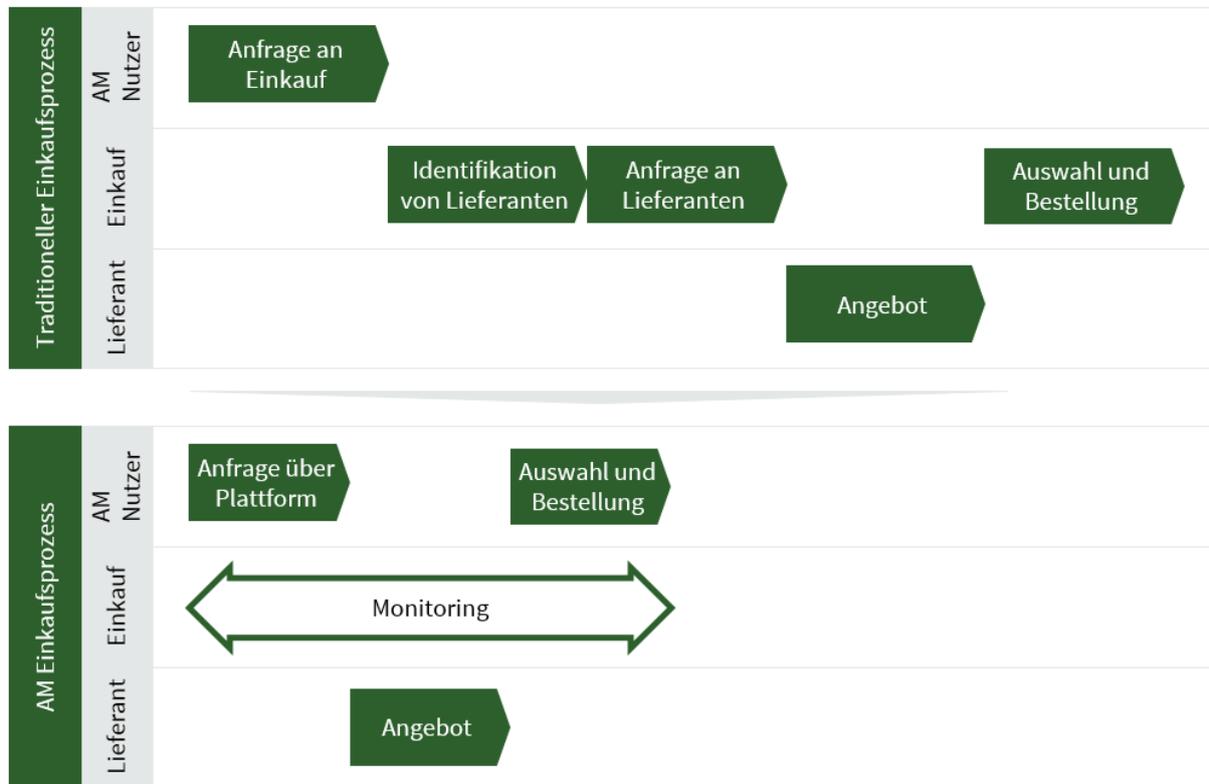


Abbildung 1: Traditioneller und AM Einkaufsprozess

### *Reduzierte Suchkosten*

Im Additively Netzwerk befinden sich momentan über 300 AM Lieferanten. Diese besitzen alle ein detailliertes Lieferantenprofil mit Angaben zu Technologien, Materialien, weiteren Services und Industriespezialisierungen. Um die Qualität sicher zu stellen, können Käufer Lieferanten, basierend auf verschiedenen Kriterien, bewerten. Additively identifiziert für Firmen geeignete Lieferanten im Netzwerk und reduziert so die Suchkosten beinahe auf null.

### *Reduzierte Wechselkosten*

Additively bietet allen Mitarbeitern der Firma ein Standardinterface zu allen Lieferanten. Dies ermöglicht auch bei einer Vielzahl von Nutzern einen problemlosen Wechsel zwischen Lieferanten.

### **Zusammenfassung**

Wie beim Produktdesign, löst AM auch beim Supply Chain Setup traditionelle Restriktionen auf. Um die neuen Möglichkeiten mit Lieferanten zu realisieren, entstehen spezifische Anforderungen an AM Einkaufsprozesse. Dieses Paper schlägt ein AM-spezifisches E-Procurement System als mögliche Lösung zur Erfüllung dieser Anforderungen vor.

## Referenzen

- Baldinger, M. (2013a), „3D-Drucker revolutionieren die Supply Chain“, *GS1 Network*, Vol. 2, pp. 21-24
- Baldinger, M. (2013b), „Best Practice beim Kauf von Bauteilen aus dem 3D-Drucker“, *Maschinenmarkt*, Vol. 14, pp. 62-63.
- Baldinger, M und Duchi, A. (2013), „Price benchmark of laser sintering service providers“, in da Silva Bartolo, P.J. et al. (Eds.), *High Value Manufacturing: Advance Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 1-5 Oktober, 2013, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 37-42.
- Gibson, I., Rosen, D.W. und Stucker, B. (2010), „Design for additive manufacturing“. In Gibson, I. et al (Eds.), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, Berlin, Deutschland, pp. 283-316.
- Muffatto, M. und Payaro, A. (2004), „Integration of web-based procurement and fulfillment: A comparison of case studies“, *International Journal of Information Management*, Vol. 24 No.4, pp. 295–311.
- Roche, E. (1995). „Business value of electronic commerce over interoperable networks“. Discussion Paper, *National Science Foundation*, Rosslyn, VA, July 6–7.
- Schönsleben, P. (2012). *Integral logistics management: operations and supply chain management within and across companies*, CRC Press, Boca Raton, FL
- Standing, S., Standing, C. and Love, P. E. (2010) „A review of research on e-marketplaces 1997-2008“ *Decision Support Systems*, Vol. 49 No. 1, pp. 41–51.

## Zusammenfassung

Da sich Additive Manufacturing (AM) von traditionellen Produktionsverfahren unterscheidet, entstehen neue Möglichkeiten im Produktdesign und im Supply Chain Setup. Die Auswirkungen der Aufhebung traditionellen Restriktionen im Produktdesign werden unter dem Begriff „Design for Additive Manufacturing“ intensiv diskutiert.

In gleicher Weise werden durch AM Restriktionen im traditionellen Supply Chain Setup aufgehoben. Insbesondere sind die folgenden Verbesserungen möglich: Reduktion von Losgrößen und Lieferzeiten, bedarfsgerechte Produktion auf Abruf, dezentrale Produktion, Customization auf Ebene Bauteil und kontinuierliche Weiterentwicklung von Bauteilen.

Viele Firmen investieren nicht selbst in die AM Technologien, sondern kaufen Bauteile bei Lieferanten. Um das Potential der AM Supply Chain mit Lieferanten umzusetzen, entstehen die folgenden Anforderungen an AM Einkaufsprozesse. Erstens muss der Aufwand pro Bestellung reduziert werden. Zweitens brauchen AM Nutzer einen direkten Zugang zu den Lieferanten ohne Umweg über die Einkaufsabteilung. Drittens müssen geeignete AM Lieferanten einfach identifiziert werden können. Viertens muss der Wechsel von Lieferanten mit möglichst geringem Aufwand möglich sein.

Ein mögliche Lösung sind AM spezifische E-Procurement System um diese Anforderungen zu erfüllen.

## Summary

As Additive Manufacturing (AM) differs from traditional production methods, it creates new possibilities in product design and supply chain setup. The effects of the relaxation of traditional restrictions in product design are discussed intensively under the term “Design for Additive Manufacturing”.

In the same way, AM is relaxing some restriction in traditional supply chain setup. Especially the following improvements are possible: reduction of lot sizes and lead times, on-demand production, decentralized production, customization on the level of parts and continuous development of parts.

Many companies do not invest in AM technologies themselves, but buy parts at suppliers. In order to realize the improvements of the AM supply chain with suppliers, the following requirements towards AM sourcing and procurement processes arise. First, the effort per order needs to be reduced. Second, AM users need direct access to suppliers without the detour over the procurement department. Third, suitable AM suppliers need to be identified easily. Fourth, switching between providers needs to be possible with low effort.

A possible solution are AM specific e-procurement system to meet these requirements.

## Schlagworte

Additive Manufacturing Supply Chain, Beschaffung, Einkaufsprozesse, E-Procurement

## Keywords

Additive Manufacturing Supply Chain, Procurement, E-Procurement

## Autor

M.Sc. Matthias Baldinger

ETH Zürich

Weinbergstr. 56/58

8092 Zürich

E-Mail: [mbaldinger@ethz.ch](mailto:mbaldinger@ethz.ch)

Web: [www.lim.ethz.ch](http://www.lim.ethz.ch)

# Digitales Ersatzteilmanagement mittels 3D-Druck

## Ein Einstieg in die Thematik

**Matthias Baldinger**

*3D-Druck macht momentan den Sprung vom Prototyping zur Produktionstechnologie. Als solche verspricht er das Ersatzteilmanagement grundlegend zu verändern: In Zukunft müssen Ersatzteile nicht mehr vorab produziert und gelagert werden, sondern können digital gespeichert und bei Bedarf nahe des Einsatzortes mittels 3D-Druckern produziert werden. Dies verspricht einige der Hauptschwächen der heutigen Ersatzteilprozesse, wie lange Lieferzeiten, hohe Transport- und Lagerhaltungskosten und Obsoleszenz, zu adressieren. Allerdings ist die Umsetzung von digitalem Ersatzteilmanagement nicht einfach. Trotzdem sollten produzierende Unternehmen heute den Grundstein legen, um diese Prozesse in Zukunft zu meistern, denn sollten sie diese Lösung ihren Kunden nicht selbst anbieten, werden es zunehmend andere Dienstleister tun. In diesem Beitrag wird das Konzept des digitalen Ersatzteilmanagement eingeführt, auf bestehende Hürden eingegangen und ein möglicher Einstieg in die Thematik 3D-Druck vorgestellt.*

### 1 Einleitung

Das Ersatzteilmanagement ist durch die verwendeten Produktionstechnologien geprägt. Da diese meist starke Skaleneffekte aufweisen – das heisst die Kosten pro Stück werden umso tiefer, je mehr produziert wird – werden Ersatzteile meist in grossen Stückzahlen vorab produziert und gelagert. Mittels komplizierter Logistikprozesse werden definierte Lieferzeiten realisiert. 3D-Druck kennt im Gegensatz zu den traditionellen Produktionstechnologien keine Skaleneffekte, das heisst ob ein, hundert oder tausend Stück produziert werden hat keinen Einfluss auf die Kosten pro Stück (solange die Maschine gut ausgelastet ist). Für das Ersatzteilmanagement bedeutet dies, dass Teile auf Abruf in einem dezentralen Netzwerk möglichst nahe am Verwendungsort in kleinen Stückzahlen produziert werden können. Dies ermöglicht eine neue Art des Ersatzteilmanagements, welches hier digitales Ersatzteilmanagement genannt wird. Dieser Beitrag führt zuerst in 3D-Druck ein, erläutert die neuen Möglichkeiten im Ersatzteilmanagement, geht auf die Hürden bei der Umsetzung ein und stellt eine Möglichkeit vor, wie Firmen sich heute mit der Thematik 3D-Druck beschäftigen können.

### 2 3D-Druck entwickelt sich zur Produktionstechnologie

Unter 3D-Druck, welcher im Fachbegriff als additive Fertigung bezeichnet wird, versteht man verschiedene Technologien, die Bauteile und Produkte additiv direkt ab digitalen Dateien herstellen. Ausgangspunkt der additiven Produktion ist ein digitales 3D-Modell eines Bauteils. Dieses wird von einer Software in Schichten gleicher Dicke geschnitten. Eine additive Fertigungsmaschine druckt jede einzelne dieser Schichten, vergleichbar wie ein normaler 2D-Drucker. So wird das Produkt Schicht um Schicht aufgebaut [1]. Abbildung 1 illustriert diesen Prozess.

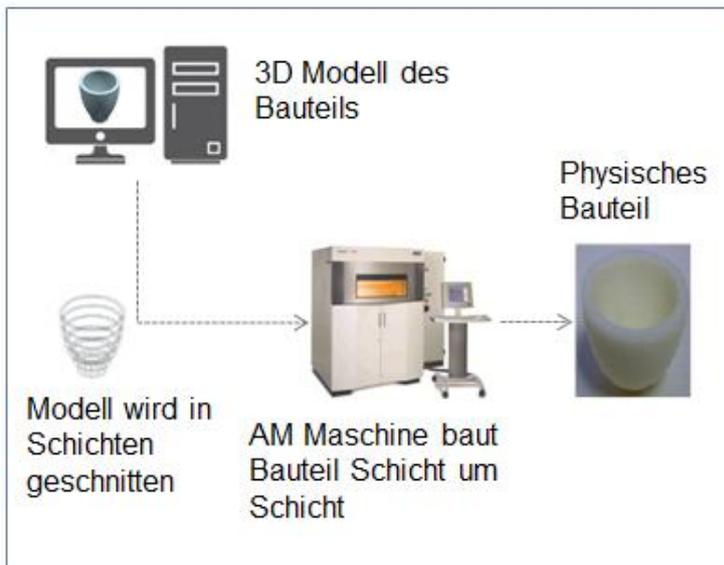


Abbildung 1: 3D-Druck-Prozess

Es existieren verschiedene additive Fertigungstechnologien, welche eine breite Palette an Materialien verarbeiten können (z.B. Kunststoffe, Metalle, Keramiken). Eine Übersicht über die gängigsten Technologien und deren Charakteristiken gibt Abbildung 2. Detailliertere Informationen können bei [2] oder [3] gefunden werden.

Material	Technologien			
	Aufbau durch Polymerisation	Aufbau durch Verkleben	Aufbau durch Verschmelzen	
Keramik		BJ	LM	
Metall				EBM
Sand				
Kunststoff	SL	PJ	FDM	LS
Wachs				MJ *

Tiefer	Beständigkeit	Höher
Glatter	Oberfläche	Rauer
Höher	Detailgenauigkeit	Tiefer
Prototypen   Indirekte Prozesse	Anwendungsbereich	Funktionale Teile

\*MJ erzielt glatte Oberfläche und genaue Details

© additively.com

Abbildung 2: Überblick über die 3D-Druck-Technologien Stereolithography (SL), Photopolymer Jetting (PJ), Binder Jetting (BJ), Laser Melting (LM), Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modeling (FDM), Laser Sintering (LS) und Material Jetting (MJ) [2]

3D-Druck wurde mehrheitlich für das kostengünstige und schnelle Erstellen von Prototypen verwendet. Dies wird unter Rapid Prototyping verstanden und stellt in erster Linie eine Prozessverbesserung in der Produktentwicklung dar. Seit einigen Jahren machen die Technologien nun allerdings den Sprung zur Produktion von Serienteilen, was als Rapid Manufacturing bezeichnet wird. Dies hat das Potential die Produktion fundamental zu verändern.

## 2.1 Ein Beispiel von Rapid Manufacturing: Einspritzdüse von GE Aviation

Ein eindrückliches Beispiel für Rapid Manufacturing liefert die Einspritzdüse für die neue LEAP Triebwerkgeneration von GE Aviation auf Abbildung 3. Ab 2015 werden diese Einspritzdüsen mittels der 3D-Druck Technologie Laser Melting aus einer Kobalt-Chrom-Legierung serienmässig produziert. Die Produktion mittels Laser Melting bringt die folgenden Vorteile:

- Die neue Düse wird als ein einziges Bauteil direkt mittels 3D-Druck gefertigt. Das Vorgängermodell bestand aus 20 Komponenten, welche einzeln gefertigt und montiert werden mussten.
- Die neue Düse ist durch den einteiligen Aufbau 5-mal verschleissfester als ihr Vorgänger.
- Die neue Düse ist leichter und reduziert den Verbrauch durch eine optimierte Geometrie

GE hat zur Produktion eine 3D-Druck-Fabrik in Auburn, USA, gebaut [5].



Abbildung 3: 3D gedruckte Einspritzdüse der neuen LEAP Turbine von GE [5]

## 2.2 Der Unterschied zwischen 3D-Druck und traditionellen Massenproduktionsverfahren

Um die ganze Aufregung um 3D-Druck zu verstehen, muss ein Blick auf die Unterschiede zu traditionellen Produktionsverfahren (wie z.B. Spritzguss) geworfen werden. Hierbei sind zwei Punkte zentral. Das sind einerseits die geometrischen Freiheiten, welche durch den schichtweisen Aufbau der Teile ermöglicht werden. Der Komplexität der einzelnen Schichten ist kaum Grenzen gesetzt – vergleichbar mit einem 2D Drucker. Diese geometrischen Freiheiten ermöglichen Bauteile mit komplexer Struktur, wie sie im Leichtbau oder bei strömungsoptimierten Bauteilen benötigt werden. Der zweite grosse Unterschied liegt in der Kostenstruktur, welche in Abbildung 4 dargestellt ist. Die meisten traditionellen Produktionsverfahren benötigen für jedes zu produzierende Bauteil ein spezifisches Werkzeug, dessen Herstellungskosten auf die gesamte Produktionsmenge verrechnet werden müssen. Aus diesem Grund sinken die Kosten pro Teil mit zunehmender Stückzahl, was als Skaleneffekte bezeichnet wird. Die traditionellen Verfahren werden daher oft als Massenproduktionsverfahren bezeichnet, da sie sich für die Produktion grosser Stückzahlen des gleichen Produkts eignen. Anders ist der 3D-Druck, der eigentlich keine Skaleneffekte kennt. Ob 10, 100 oder 1'000 Teile produziert werden, hat keinen Einfluss auf den Preis pro Stück. Diese Kostenstruktur hat das Potential die heutigen Supply Chains grundlegend zu verändern und eine bedarfsgerechte, lokale Produktion zu ermöglichen. [4]

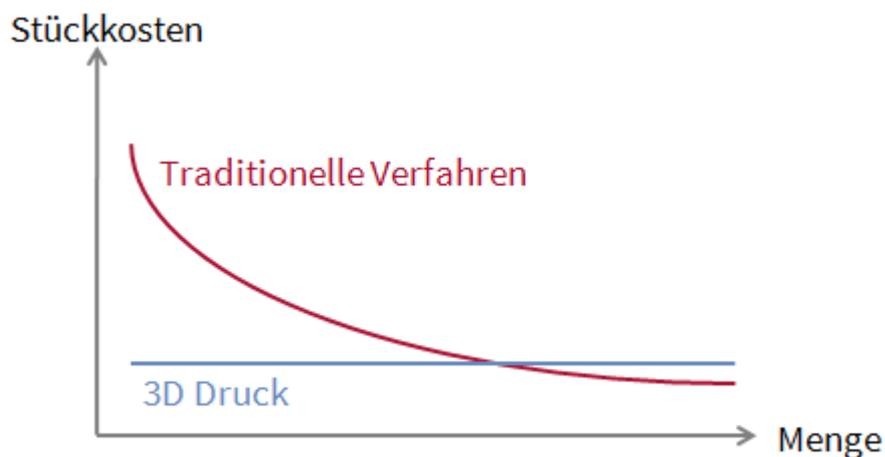


Abbildung 4: Kostenstruktur von 3D-Druck und traditionelle Massenproduktionsverfahren

### 3 Digitales Ersatzteilmanagement

Das heutige Ersatzteil-Geschäft ist stark durch die Skaleneffekte der Massenproduktionsverfahren geprägt. So werden Ersatzteile in grossen Stückzahlen meist vorab produziert um tiefe Stückkosten zu realisieren. Diese werden dann mehrfach transportiert und an verschiedenen Orten gelagert. Trotzdem erreichen sie den Verwendungsort häufig erst nach längeren Lieferfristen. Zudem veralten Teile oder werden nicht gebraucht. Ein typischer Ersatzteilprozess, sowie dessen Schwächen, sind in Abbildung 5 zu finden.

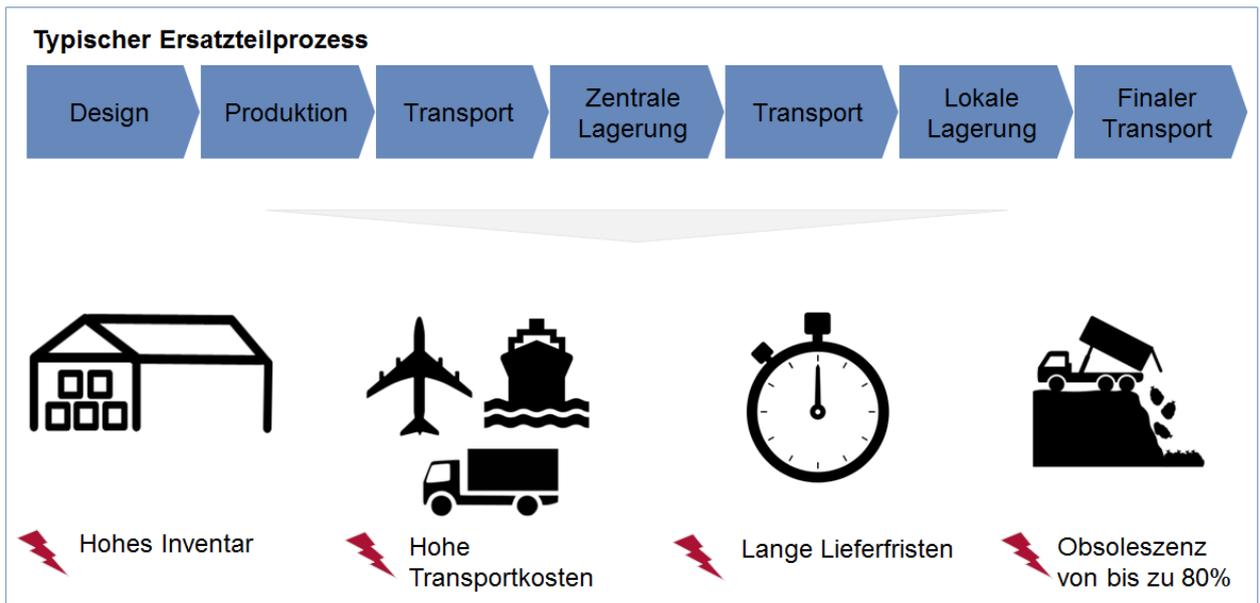


Abbildung 5: Typischer Ersatzteilprozess und dessen Schwächen

3D-Druck ermöglicht nun eine bedarfsgerechte und lokale Produktion. Dadurch wird ein neuer Ersatzteilprozess, das digitale Ersatzteilmanagement, möglich. Hierbei werden Teile digital gespeichert und erst bei Bedarf möglichst lokal produziert. Dies löst die typischen Schwächen des heutigen Prozesses, wie in Abbildung 6 ersichtlich ist.



Abbildung 6: Digitaler Ersatzteilprozess mit 3D-Druck

Die Machbarkeit dieses Prozesses wurde anhand mehrerer Case Studies im EU Projekt Direct Spares gezeigt [6]. Abbildung 7 zeigt einige der 3D gedruckten Ersatzteile.

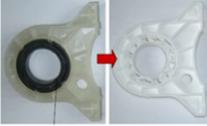
Produkt	3D gedrucktes Ersatzteil	Bemerkung
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besseres Bauteil durch Neukonstruktion</li> <li>• Kein Montageaufwand, da zwei Bauteile in einem integriert wurden</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weder Ersatzteil noch Werkzeug vorhanden</li> <li>• Produktion nur durch 3D-Druck möglich</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil wird bereits in Serie mittels 3D-Druck hergestellt (tiefe Stückzahl)</li> <li>• Keine Lagerhaltung, Transport, Inventarkosten oder Obsoleszenz</li> </ul>

Abbildung 7: Ersatzteile, die mittels 3D Druck produziert wurden im EU Projekt Direct Spares

### 3.1 Schwierigkeiten bei der Realisierung

Obwohl einzelne erfolgreiche Fälle von Ersatzteilen mittels 3D-Druck umgesetzt wurden, hat sich digitales Ersatzteilmanagement momentan noch nicht durchgesetzt. Hierfür gibt es drei Hauptgründe:

- Limitationen der 3D-Druck Verfahren
- Design für 3D-Druck
- Änderung des Ersatzteil-Geschäftsmodells

### 3.2 Limitationen der 3D-Druck-Verfahren

Die 3D-Druck-Technologien haben momentan Grenzen im Vergleich zu traditionellen Verfahren – z.B. bei der erzielbaren Oberflächengüte und Genauigkeit der Bauteile oder der Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit. Zudem fehlen derzeit noch allgemein gültige Standards und Qualitätssicherungsprozesse [6]. Diese Restriktionen werden immer weiter überwunden. Zudem stellen diese häufig gar kein Problem dar, denn vielen Bauteilen werden heute Standardanforderungen der gängigen Fertigungstechnologien „verordnet“ (z.B. Oberflächengüte Ra 3.2), obschon diese gar nicht benötigt werden. Wichtig ist es, geeignete Bauteile aus dem Ersatzteilportfolio auszuwählen. Dies setzt allerdings ein hohes Level an 3D-Druck Wissen im Unternehmen voraus.

### 3.3 Design für 3D-Druck

Wenn ein Bauteil konstruiert wird, geschieht dies auf dem Hintergrund einer Fertigungstechnologie, mit der dieses produziert werden soll. Somit sind auch alle Ersatzteile auf eine bestimmte Fertigungstechnologie ausgelegt. Wenn nun 3D-Druck eingesetzt werden soll,

müssen Bauteile, welche für eine andere Technologie konstruiert wurden, mit diesen Verfahren produziert werden.

Die dabei entstehende Problematik soll an einem Beispiel illustriert werden. Auf der linken Seite von Abbildung 8 kann ein typischer Ventilblock gefunden werden, welcher für subtraktive Fertigungsverfahren (Fräsen und Bohren) konstruiert wurde. Diese Verfahren gehen von einem soliden Block aus und tragen dort, wo nötig, Material ab. Je weniger Material entfernt werden muss, desto günstiger lässt sich der Ventilblock herstellen. Daher hat dieser ein so massives Design.

3D-Druck funktioniert additiv und baut nur dort Material auf, wo es gebraucht wird. Je weniger Material aufgebaut werden muss, umso günstiger wird das Bauteil. Auf der rechten Seite von Abbildung 8 sehen wir denselben Ventilblock konstruiert für 3D-Druck (welcher verschiedene Vorteile hat: Gewichtsreduktion von 80%, Druckverlustreduktion von 50%, Integration von Sensorik und Kühlrippen) [8].

Heutzutage sind fast keine Serienteile für 3D-Druck konstruiert. Bei digitalem Ersatzteilmanagement stehen wir somit vor dem Problem, dass für konventionelle Fertigungsverfahren konstruierte Teile im Ersatzteilwesen mittels 3D-Druck gefertigt werden müssen. Der Ventilblock auf der linken Seite von Abbildung 8 wird aber in der additiven Fertigung extrem teuer, da sehr viel Material aufgebaut werden muss. Aus diesem Grund rechnet sich der 3D-Druck für die meisten Ersatzteile nicht. Der Block müsste umkonstruiert werden zu dem 3D-Druck tauglichen Design auf der rechten Seite. Diese Neukonstruktion ist aber aufgrund des Entwicklungsaufwands, von Zulassungen und Zertifizierungen und/oder der Erwartung des Kunden häufig nicht im Interesse des Herstellers. Aus diesem Grund ist der Wechsel auf digitales Ersatzteilmanagement schwierig.

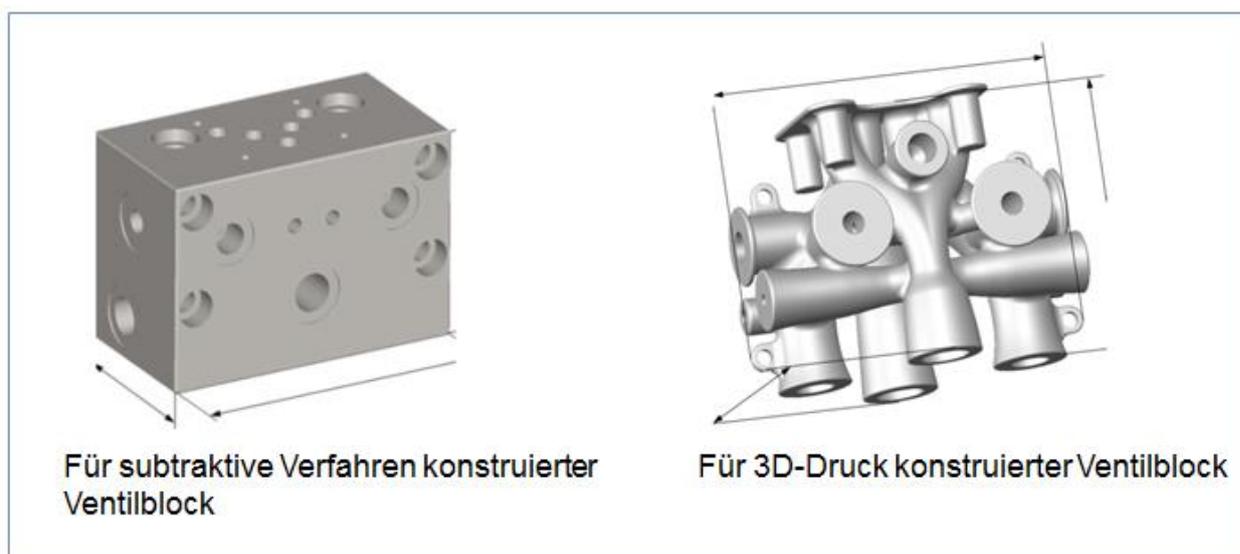


Abbildung 8: Ventilblock für konventionelle subtraktive Fertigung und für 3D-Druck [8]

### 3.4 Änderungen des Ersatzteil-Geschäftsmodells

Viele produzierende Unternehmen haben heute in ihrem Ersatzteilgeschäft eine gewisse Monopolsituation, da für andere Dienstleister die kostengünstige Produktion der Teile in kleiner Stückzahl meist nicht möglich ist. 3D-Druck ändert nun diese Situation und ermöglicht Dienstleistern den Einstieg ins Ersatzteilgeschäft. Durch 3D-Scanning und Reverse

Engineering können die benötigten 3D-Modelle einfach konstruiert werden. Dies wird zu einem erhöhten Wettbewerb und somit Preisdruck im Ersatzteilgeschäft führen. Produzierende Unternehmen sollten sich daher über Ihre Geschäftsmodelle im Ersatzteilwesen Gedanken machen.

### **3.5 Implikationen**

Digitales Ersatzteilmanagement ist schwierig umzusetzen. Einerseits ist fundiertes 3D-Druck Wissen im Unternehmen nötig, um geeignete Ersatzteile für den Prozess auszuwählen. Auf der anderen Seite müssen Teile umkonstruiert oder bereits bei der Entwicklung in einer zweiten Variante für 3D-Druck vorbereitet werden.

Da 3D-Druck die kostengünstige Produktion von Teilen in kleiner Stückzahl ermöglicht, wird eine neue Konkurrenzsituation im Ersatzteilmanagement auftreten. Neue Dienstleister werden digitales Ersatzteilmanagement in Zukunft als Service anbieten. Produzierende Unternehmen sollten sich daher schon heute mit 3D-Druck zu beschäftigen beginnen, damit sie dieses Feld nicht diesen Dienstleistern überlassen müssen.

Im kommenden Kapitel wird darauf eingegangen, wie sich eine Firma am besten mit der Einführung von 3D-Druck auseinandersetzt.

## **4 Wie sollte an das Thema 3D-Druck herangegangen werden**

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, besitzt der 3D-Druck zwei fundamentale Vorteile gegenüber den traditionellen Produktionsverfahren. Daher besitzt er grosses Innovations- und Differenzierungspotential für die produzierende Industrie.

### **4.1 Anwendungen von 3D-Druck in der Wertschöpfungskette**

3D-Druck kann in den verschiedenen Bereichen der Wertschöpfungskette eines Unternehmens einen Mehrwert generieren:

- Prototypen: Beschleunigung der Produktentwicklung durch das Erstellen von visuellen und funktionalen Prototypen
- Support-Teile: Erhöhung der Effizienz in der Produktion durch Support-Teile
- Bridge Manufacturing: Schnelle Produktion kleiner Stückzahlen neuer Produkte, um diese vor der Investition in Werkzeuge am Markt einzuführen
- Performance-Steigerung: Entwicklung und Produktion von leichteren, besseren und integrierteren Produkten
- Customization: Anbieten von kundenindividuellen Produkten und Produkterweiterungen
- Digitales Ersatzteilmanagement: Produktion auf Abruf vor Ort

Die verschiedenen Anwendungen des 3D-Drucks haben unterschiedliches Potential, aber auch verschiedene Schwierigkeitsgrade bei der Umsetzung, wie in Abbildung 9 dargestellt ist. Die drei Anwendungen in der linken unteren Ecke stellen in erster Linie Prozessverbesserungen dar. Sie benötigen zur Umsetzung einzig den Einsatz einer neuen Fertigungstechnologie. Die drei Anwendungen in der rechten oberen Ecke haben hohes Differenzierungs-

potential. Um sie zu realisieren, müssen allerdings neben der neuen Fertigungstechnologie auch noch das Design der Bauteile und / oder das Geschäftsmodell geändert werden.

Ziel von Unternehmen sollten die Applikationen mit hohem Differenzierungspotential sein, worunter digitales Ersatzteilmanagement fällt. Diese eignen sich allerdings häufig nicht als Einstieg in die Technologien.



Abbildung9: Potential und Schwierigkeitsgrad der Umsetzung verschiedener 3D-Druck Anwendungen

## 4.2 Der Einstieg in 3D-Druck

Um in 3D-Druck einzusteigen, schlagen wir folgende Vorgehensweise vor:

1. Aufbau von möglichst viel 3D-Druck Wissen innerhalb der Firma. Dies ist über die einfacheren Einstiegsanwendungen im grünen Kreis in Abbildung 9 gut zu bewerkstelligen. Stellen Sie sicher, dass möglichst viele Personen in Ihrem Unternehmen 3D-Druck einsetzen.
2. Identifizieren Sie ein Pilotprojekt für eine der drei Anwendungen mit hohem Differenzierungspotential. Wählen Sie hierzu ein Bauteil aus, welches möglichst viel von 3D-Druck profitieren kann (z.B. Bauteil, wo Gewicht eine entscheidende Rolle spielt, wo Kunden hohe Individualisierung erwarten, Ersatzteil, für das keine Werkzeuge mehr existieren)
3. Realisieren Sie die identifizierte 3D-Druck Anwendung als Piloten
4. Der Pilot dient als Proof of Concept. Weitere innovative Anwendungen werden, basierend auf den gemachten Erfahrungen, entstehen.

## 5 Zusammenfassung

Digitales Ersatzteilmanagement mittels 3D-Druck kann viele der Schwächen heutiger Ersatzteilprozesse adressieren, wie beispielsweise lange Lieferzeiten, hohe Transport- und Lagerhaltungskosten und Obsoleszenz. Die Umsetzung gestaltet sich allerdings schwierig, da einerseits 3D-Druck Wissen in der Firma benötigt wird und andererseits Teiledesigns für 3D-Druck angepasst werden müssen.

Die 3D-Druck-Technologien ermöglichen die kostengünstige Produktion von Teilen in kleiner Stückzahl. Mittels 3D-Scanning und Reverse Engineering können die hierzu benötigten digitalen 3D-Modelle immer leichter erstellt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird es daher in Zukunft Dienstleister geben, die digitales Ersatzteilmanagement anbieten werden. Dies wird den Kostendruck im Ersatzteilgeschäft erhöhen und Firmen dazu zwingen, ihre Geschäftsmodelle zu überdenken. Produzierende Unternehmen sollten sich daher bereits heute mit der Thematik 3D-Druck zu beschäftigen beginnen. Häufig ist digitales Ersatzteilmanagement hierzu nicht der einfachste Einstiegspunkt, sondern einfachere Anwendungen sollten zuerst angegangen werden.

## 6 Literatur

- [1] Baldinger, M.; Leutenecker, B.; Rippel, M.: Strategic Relevance of Additive Manufacturing. In: *Industriemanagement* 2. 2013. p. 11-14
- [2] Additively: Übersicht über 3D-Druck-Technologien, URL: <https://www.additively.com/de/lernen/3d-printing-technologies>, Zugriffsdatum 14.08.2014
- [3] Verl, A.; Grzesiak, A.; Wolf, A.; Becker, R.; Breuninger, J.: *Generative Fertigung Mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern*, Berlin Heidelberg 2013
- [4] Baldinger, M.: 3D-Drucker revolutionieren die Supply Chain. In: *GS1 Network* 2/2014. p. 21-24
- [5] GE reports: World's first plant to print jet engine nozzles in mass production, URL: <http://www.gereports.com/post/91763815095/worlds-first-plant-to-print-jet-engine-nozzles-in-mass>, Zugriffsdatum 14.08.2014
- [6] Gausemeier, J: *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing*, Paderborn 2011
- [7] Direct Spare: Project video; URL: [https://www.youtube.com/watch?v=n4iivjVOv\\_Y](https://www.youtube.com/watch?v=n4iivjVOv_Y), Zugriffsdatum 14.08.2014
- [8] Emmelmann, C.; *Neue Konstruktionsansätze in der additiven Fertigung*, In: *OptoNet-Workshop*, URL: [http://spectronet.de/portals/visqua/story\\_docs/vortraege\\_2013/131106\\_optonet\\_workshop/131106\\_01\\_emmelmann\\_tu\\_hamburg.pdf](http://spectronet.de/portals/visqua/story_docs/vortraege_2013/131106_optonet_workshop/131106_01_emmelmann_tu_hamburg.pdf), Zugriffsdatum 14.08.2014

## **Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren**

Matthias Baldinger, Bastian Leutenecker und Manuel Rippel, ETH Zürich

### **Autoren**

Matthias Baldinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Betriebswissenschaftlichen Zentrum (BWI) der ETH Zürich und beschäftigt sich mit Geschäftsmodell-Innovationen basierend auf generativen Fertigungsverfahren.

Bastian Leutenecker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Product Development Group Zurich (pd|z) der ETH Zürich. Fokus seiner Arbeit liegt darin, die neuen Technologien für Unternehmen nutzbar zu machen und bei der Entwicklung des ersten eigenen generativen Produkts zu unterstützen.

Manuel Rippel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Betriebswissenschaftlichen Zentrum (BWI) der ETH Zürich.

### **Kontakt**

ETH Zürich  
BWI Betriebswissenschaftliches Zentrum  
Weinbergstr. 56 / 58  
CH-8092 Zürich  
Tel: +41 44 / 6320521  
E-Mail: mbaldinger@ethz.ch  
URL: <http://www.lim.ethz.ch>

**Generative Fertigungsverfahren werden heute nicht mehr nur für den Prototypenbau in der Produktentwicklung sondern zunehmend zur direkten Herstellung von Endprodukten eingesetzt. Wie bei vielen Technologien vor dem Durchbruch findet generative Fertigung von Endprodukten vor allem in Nischenmärkten Anwendung. Wenn die momentanen Grenzen überwunden werden können, haben die Verfahren das Potential, Industrien so grundlegend zu verändern wie MP3 und iPod die Musikbranche. Die Wirtschaftszeitung Economist spricht sogar von der nächsten industriellen Revolution [1]. Dieser Artikel soll Unternehmen bei der Beantwortung der Frage unterstützen, inwiefern generative Fertigungsverfahren mittel- bis langfristig eine strategische Bedeutung haben.**

Dabei gilt es für die jeweilige Industrie zu beurteilen, welche neuen Geschäftsmodelle durch die Technologie ermöglicht werden. Im erwähnten Beispiel konnte durch MP3 und iPod das

Geschäftsmodell von iTunes realisiert werden. Als Lösungsvorgehen wird ein Prozess wie in Bild 1 vorgeschlagen: Basierend auf den Eigenschaften der Technologie werden Hebel vorgestellt, durch die sich neue Nutzenversprechen (Value Proposition) generieren lassen. Diese Nutzenversprechen bilden die Grundlage für Geschäftsmodell-Innovationen, welche den neuen Nutzen für Kunden zugänglich machen und dabei Umsatz und Profit generieren (in Anlehnung an [2]).



### Eigenschaften der Technologie

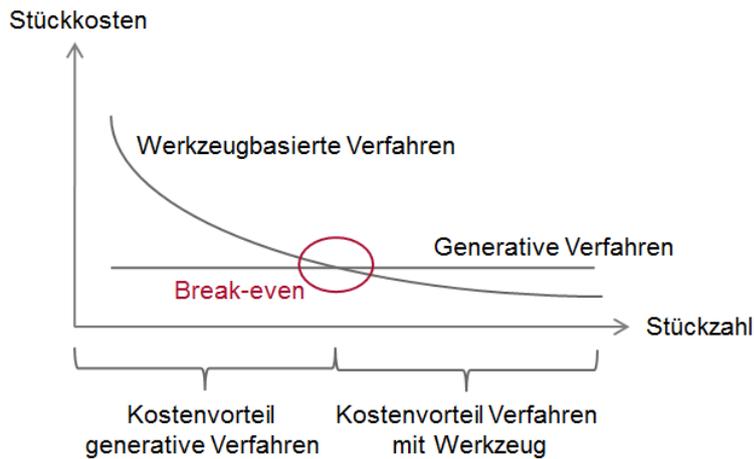
Ausgangspunkt der generativen Produktion ist ein digitales 3D Modell eines Produkts oder Bauteils. Dieses wird von einer Software in Schichten gleicher Dicke „geschnitten“. Eine generative Fertigungsmaschine „druckt“ jede einzelne dieser Schichten, vergleichbar wie ein normaler 2D Drucker. So wird das Produkt Schicht um Schicht aufgebaut. Es existieren verschiedene generative Prozesse, welche mittlerweile eine breite Palette an Materialien verarbeiten können (z.B. Kunststoffe, Metalle, Keramiken) – eine Übersicht über diese sowie den Stand der Technik kann in der Fachliteratur gewonnen werden (siehe dazu z.B. [3])

Die generativen Verfahren haben momentan Grenzen im Vergleich zu traditionellen Verfahren – z.B. bei der erzielbaren Oberflächengüte und Genauigkeit der Bauteile oder der Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Verfahren. Zudem fehlen derzeit noch allgemein gültige Standards und Qualitätssicherungsprozesse [4]. Unter der Annahme, dass diese Grenzen durch den technischen Fortschritt überwunden werden können, werden hier die grundlegenden Eigenschaften der Verfahren zur Abschätzung ihrer strategischen Bedeutung analysiert. Die Verfahren zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus: *additiv*, *digital*, *generisch* und *direkt*.

*Additiv*: Mittels generativer Verfahren werden Produkte Schicht um Schicht additiv aufgebaut. Daher werden weder der Zugang eines abtragenden Werkzeugs, noch Formen benötigt. Somit unterliegen diese Verfahren nicht den gängigen „Design for Manufacture“-Restriktionen (z.B. keine Hinterschnitte bei spanender Bearbeitung, keine Hohlräume bei Spritzguss) [5]. Durch den schichtweisen Aufbau, ist der Komplexität der einzelnen Schicht kaum Grenzen gesetzt – vergleichbar wie bei 2D Druckern, bei denen es irrelevant ist, ob eine komplexe Zeichnung oder ein einfaches Quadrat gedruckt wird. Das heisst, das finale Produkt ist kaum begrenzt in seiner Komplexität und kommt somit dem optimalen Design nahe.

*Digital*: Generative Fertigungsverfahren arbeiten mit einer digitalen 3D Datei als Daten-Input. Anders als bei traditionellen Verfahren ist kein manuelles, verfahren-spezifisches Übersetzen nötig, wie beispielsweise das Erstellen einer Spritzgussform.

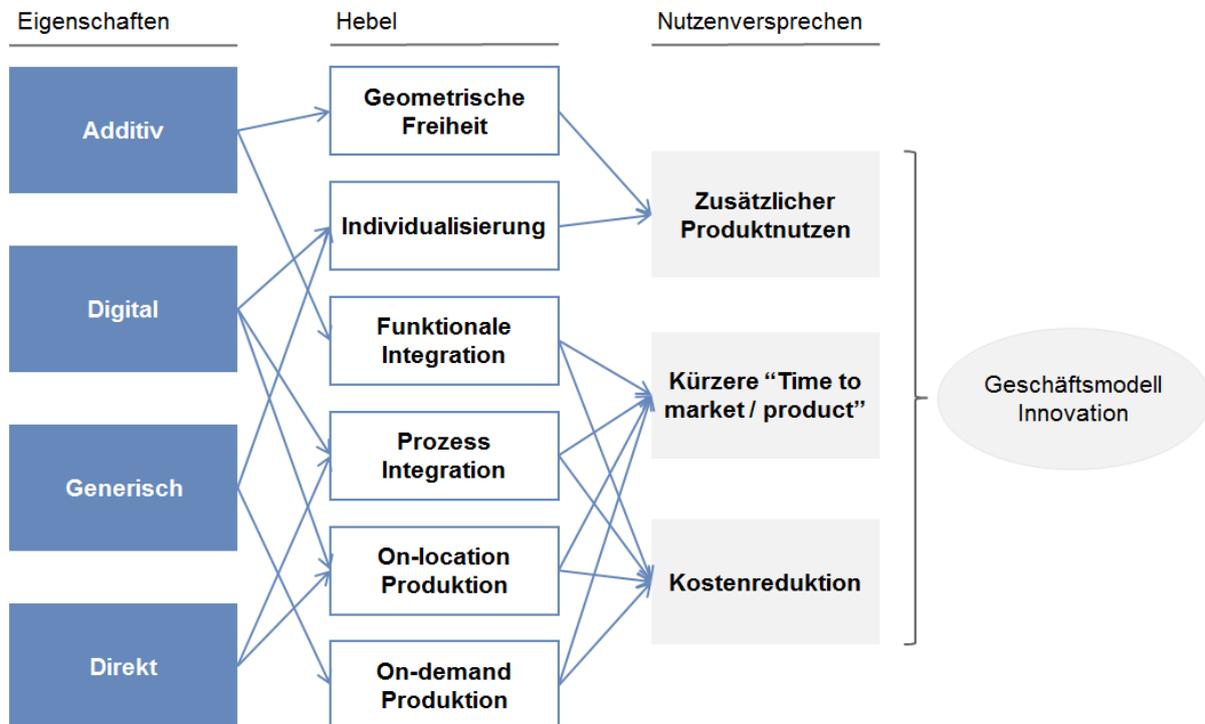
*Generisch*: Die Technologie kennt keine produktspezifischen Werkzeuge oder Vorbereitungen, sondern kann alle 3D Modelle generisch produzieren. Dies führt zu einer anderen Kostenstruktur als werkzeuggesteuerte Verfahren der Massenproduktion (z.B. Spritzguss). Die Herstellung des Werkzeugs stellt produktbezogene Fixkosten dar, welche auf die gesamte Produktionsmenge verrechnet werden müssen. Aus diesem Grund fallen die Kosten pro Produkt mit zunehmender Stückzahl. Die Stückkosten bei generativen Verfahren bleiben hingegen konstant (Bild 2). Ob 1'000 gleiche, 1'000 jeweils modifizierte oder 1'000 verschiedene Produkte gefertigt werden hat keinen Kosteneffekt [6].



*Direkt*: Endprodukte werden direkt auf *einer* generativen Maschine gefertigt (abgesehen von allfälliger Nachbearbeitung). Dahingegen werden bei vielen anderen Verfahren Produkte nacheinander von verschiedenen Maschinen bearbeitet. Somit sind bei generativen Verfahren kein grosser Maschinenpark und keine Fertigungslinie notwendig.

### Hebel zur Nutzengenerierung

Aufgrund der Eigenschaften lassen sich sechs Hebel identifizieren, durch welche die generativen Verfahren Nutzen für Unternehmen und ihre Kunden generieren können (Bild 3). Im Folgenden werden diese anhand von kommerziell erfolgreichen Beispielen erklärt.



*Geometrische Freiheit*: Generative Fertigungsverfahren befreien Produktentwickler von den heute gängigen „Design for Manufacture“-Regeln und ermöglichen Teile mit bis dato unrealisierbarer geometrischer Komplexität. Die Form eines Produkts kann sich so in erster Linie an seiner Funktion orientieren – was als „Manufacture for Design“ bezeichnet wird [5]. Die Festo AG zusammen mit dem

Fraunhofer Institut IPA haben sich bei der Entwicklung eines neuartigen Roboterarms von der Funktionalität leiten lassen und inspiriert von einem Elefantenrüssel, den „bionischen Handling-Assistenten“ gestaltet. Diesem Produkt, das nur mittels generativer Verfahren gefertigt werden kann, wurde der Deutsche Zukunftspreis 2010 verliehen [3].

*Individualisierung:* Die Kostenstruktur der generativen Verfahren ermöglicht die kosteneffektive Individualisierung von Produkten bis hin zum Unikat. Die Plattform UCODO (ein Startup-Unternehmen, welches seine Kunden zu Mit-Designern ihrer Produkte macht) basiert auf diesem Hebel. Hierbei kann der Konsument beispielsweise Manschettenknöpfe intuitiv innerhalb eines 3D Modells nach seinen Wünschen gestalten. Sobald er mit dem Ergebnis zufrieden ist, wird das fertige 3D Modell direkt mittels einer generativen Fertigungsmaschine als Unikat hergestellt [7]. An diesem als Co-Design bekannten Konzept lässt sich ein weiterer Vorteil von generativen Verfahren zur Individualisierung von Produkten ablesen: Eine Übersetzung des Kundenwunsches in eine Fertigungsanweisung entfällt, da das Unikat direkt ab dem vom Kunden erstellten 3D Modell produziert wird.

*Funktionale Integration:* Durch die Erhöhung der Komplexität kann gleichbleibende Funktionalität in weniger Bauteile integriert werden. Dies reduziert den Montageaufwand. Die Neugestaltung einer Blutzentrifuge ohne „Design for Manufacture“-Restriktionen ermöglichte der Andreas Hettich GmbH, die Anzahl Teile einer Baugruppe von 32 auf 3 zu reduzieren. Zwei der drei Teile können nur generativ gefertigt werden [8].

*Prozess-Integration:* Generative Fertigung ermöglicht die Kürzung von Produktionsprozessen. Einerseits können nacheinander auf verschiedenen Maschinen ausgeführte Arbeitsschritte durch einen einzelnen in der generativen Maschine ersetzt werden. Andererseits wird eine digitale Prozesskette ermöglicht. Veranschaulichen lässt sich dies am Beispiel der Zahnrestauration. Historisch werden Brücken und Kronen in einem manuellen und arbeitsintensiven Prozess hergestellt: Ein physischer Abdruck des Gebisses bildete die Grundlage für ein von Hand gefertigtes Modell des benötigten Zahnersatzes, welcher als Urmodell für den Guss dient. Heutzutage kann ein Zahnersatz basierend auf einem 3D Mund-Scan digital in einem spezialisierten CAD-Programm gestaltet werden. Die generative Fertigung kann direkt in die digitale Prozesskette integriert werden. Dies erhöht die Effizienz: Mit traditionellen Methoden kann ein Zahntechniker pro Tag 20 Stück herstellen, wohingegen auf einer einzigen generativen Anlage bis zu 450 Stück in 24 Stunden produziert werden können [4].

*On-location Produktion:* Aufgrund der Kostenstruktur sowie dem Fehlen eines grossen Maschinenparks gibt es weniger Gründe, die generative Herstellung eines Produkts zu zentralisieren. Die Produktspezifikationen können digital um die ganze Welt verschickt und lokal produziert werden. So können Transportwege vermieden oder zumindest verkürzt werden. Staples Inc., ein amerikanisches Unternehmen für Bürobedarf mit 1'500 Niederlassungen, beginnt dieses Jahr in ausgewählten Ländern den normalen Kopierservice um 3D Drucken zu erweitern. Dieser neue Service ermöglicht es Kunden, ausgehend von 3D Dateien, welche entweder selbst erstellt oder von irgendwo auf der Welt heruntergeladen wurden, die Produkte in einer Filiale „um die Ecke“ herstellen zu lassen [9].

*On-demand Produktion:* Aufgrund des Wegfalls von mengen-unabhängigen Produktionskosten, wie z.B. Werkzeugkosten, kann bis hinunter zu einer Losgrösse „1“ kosteneffektiv produziert werden. Dies ermöglicht die Produktion on-demand, d.h. erst nachdem der Kundenauftrag eingegangen ist. Auf diesem Hebel basiert die Firma Shapeways. Designer können ihre Produkte als 3D Modelle entwickeln

und am Markt anbieten. Sobald ein Kunde das Produkt bestellt, produziert die Firma dieses mittels generativer Maschinen.

### **Neue Geschäftsmodelle**

Wie in Bild 3 illustriert, kann mittels generativer Verfahren über die vorgestellten Hebel zusätzlicher Produktnutzen, Kostenreduktion oder schnellere „Time to Market / Product“ erzielt werden. Zur Kommerzialisierung dieser Nutzenversprechen entstehen neue Geschäftsmodelle, was am Beispiel der Firma Shapeways illustriert werden soll.

Das Unternehmen basiert auf einer Geschäftsmodell-Innovation, welche mit „Manufacturing as a Service“ umschrieben werden kann. Es ermöglicht Designern und Entwicklern, Produkte (beispielsweise zur Heimeinrichtung wie Geschirr, Lampen oder Kunstwerke) auf einem online Marktplatz zu verkaufen, welche dann mit generativen Maschinen für die Käufer produziert werden. An ihrem im Jahr 2012 eröffneten, dritten Standort in New York plant das Unternehmen dieses Jahr drei bis fünf Millionen individualisierte Produkte herzustellen [10].

Der Erfolg der Firma basiert auf der Kommerzialisierung neuer Nutzenversprechen. Für die Konsumenten der Produkte basieren diese auf Individualisierung: Aus einer Vielzahl von Produkten von Designern auf der ganzen Welt lässt sich der individuelle Favorit auswählen. Manche Designer bieten zusätzlich die Möglichkeit zum Co-Design, ähnlich wie bei UCODO, an. In Zukunft kann weiterer Nutzen durch die Lokalisierung der Produktion erzielt werden, durch welche die Kosten für den internationalen Versand entfallen.

Für die Designer und Produktentwickler werden über den on-demand Hebel Nutzen erzeugt. Sie können ohne finanzielles Kapital ihr eigenes Geschäft basierend auf dem Produkt als 3D Modell aufbauen – anders als bis dato muss keine vorab Investition in die Produktion einer ersten Serie getätigt werden. Dies macht die Kommerzialisierung von Produktinnovationen für eine viel grössere Anzahl an Personen zugänglich. Zudem verkürzt sich die „Time to Market“, da eine erste Produktversion am Markt eingeführt werden kann, welche danach stetig weiterverbessert und einem breiteren Publikum zugänglich gemacht wird. Letztlich entfällt die Lagerhaltung von Produkten, wobei neben den Kosten des gebundenen Kapitals und der nötigen Infrastruktur auch das Risiko vermieden wird, dass Produkte veralten oder verderben, und damit nur mittels Preisnachlässen abgesetzt werden können.

Shapeways generiert mit diesen Nutzenversprechen Umsatz, indem es für jedes hergestellte Produkt einen Preis basierend auf Volumen, Geometrie und Material verrechnet – zu welchem Marktpreis das Produkt angeboten wird, entscheidet allerdings der Entwickler.

### **Fazit**

Generative Fertigungsverfahren haben momentan Grenzen und finden in erster Linie in Nischenmärkten Anwendung. Mit der zunehmenden Überwindung dieser Grenzen werden aufgrund der Eigenschaften der Verfahren über die vorgestellten Hebel neue Nutzenversprechen ermöglicht. Entscheidungsträger sollten heute das Potential dieser Hebel für ihre Industrie und ihre Unternehmen

auf einer strategischen Ebene beurteilen. So können sie verhindern von tiefgreifenden – teilweise sogar disruptiven – Umwälzungen durch neue Geschäftsmodelle, wie sie beispielsweise in der Musikbranche auftraten, überrascht zu werden.

## Literatur

- [1] The Economist: The third industrial revolution, URL: <http://www.economist.com/node/21553017>, Abrufdatum 15.02.2013
- [2] Richardson, J.: The business model: an integrative framework for strategy execution, In: Strategic Change 17 (2008) 5-6, S. 133-144.
- [3] Verl, A.; Grzesiak, A.; Wolf, A.; Becker, R.; Breuninger, J.: Generative Fertigung Mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern, Berlin Heidelberg 2013
- [4] Gausemeier, J: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing, Paderborn 2011
- [5] Hague, R.; Mansour, S.; Saleh, N.: Material and design considerations for rapid manufacturing, In: International Journal of Production Research 42 (2004) 22, S. 4691-4708
- [6] Gebhardt, A.; Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping-rapid tooling-rapid manufacturing, München 2007
- [7] UCODO: Customize our 3D Products, URL: <http://www.codocloud.com/Cart/>, Abrufdatum: 15.02.2013
- [8] Wohlers, T: Wohlers Report 2006: Rapid Prototyping & Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report, Colorado 2006
- [9] Wired: Staples Announces In-Store 3-D Printing Service, URL: <http://www.wired.com/design/2012/11/staples-goes-3-d/>, Abrufdatum 15.02.2013
- [10] Shapeways: Factory of the Future: Our Plan to 3D Print 3 to 5 Million Unique Products Per Year in NYC, URL: <http://www.shapeways.com/blog/archives/1692-Factory-of-the-Future-Our-Plan-to-3D-Print-3-to-5-Million-Unique-Products-Per-Year-in-NYC.html>, Abrufdatum 15.02.2013

## Schlüsselwörter

Generative Fertigung, 3D Druck, Geschäftsmodell-Innovation

## Strategic relevance of additive manufacturing

**Additive manufacturing is today increasingly used to produce final products and not only prototypes in product development. Like many technologies before breakthrough it is mainly applied in niche markets, where it is overcoming its current limitations. Afterwards, it has the potential to transform industries as MP3 and iPod have done with the music business. The economist even speaks of the**

**next industrial revolution [1]. This article supports companies in evaluating the strategic implications of additive manufacturing of final products in the mid- to long-term.**

**Key words**

Additive manufacturing, direct manufacturing, 3D printing, business model innovation

## Best Practice beim Kauf von 3D gedruckten Bauteilen

**3D Druck, oder additive Fertigung, wird immer häufiger in der Industrie eingesetzt – nicht mehr nur für die Prototypenfertigung, sondern auch zur Herstellung von Serienbauteilen. Viele Unternehmen möchten die Technologien nutzen, schrecken aber vor hohen Investitionen zurück. Diese sind oft nicht nötig, da ein lebendiger Dienstleistermarkt existiert, der Teile auf Auftrag fertigt. Beim Einkauf gilt es allerdings einige Punkte zu beachten.**

3D Druck, im Fachbegriff additive Fertigung, steht für eine Reihe von Technologien, die Bauteile direkt von digitalen 3D Dateien Schicht um Schicht aufbauen. In letzter Zeit mehren sich die Berichte über erfolgreiche Anwendungen. Dabei geht es nicht mehr nur um Prototypen, sondern auch um die Herstellung von Kleinserien oder Bauteilen mit komplexer Geometrie. Viele Firmen möchten die Technologien nutzen. Einige Gründe sprechen dafür Teile von Dienstleistern zu kaufen anstelle selbst in die Technologien zu investieren.

### Make or Buy Entscheidung bei 3D Druck

Zum ersten ist es wichtig zu verstehen, dass 3D Druck oder additive Fertigung nicht eine Technologie ist, sondern für eine ganze Reihe zum Teil sehr unterschiedlicher Technologien steht. Gemeinsam ist ihnen, dass sie Teile direkt ab digitalen 3D Dateien Schicht um Schicht aufbauen. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die zehn gängigsten Technologien. Mit diesen können Teile in verschiedenen Materialien (z.B. Metall, Kunststoff, Keramik) mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. Je nach Anwendung ist eine andere Technologie zu wählen. Die Zusammenarbeit mit Dienstleistern erlaubt hier maximale Flexibilität, so dass immer die optimale Technologie für eine Anwendung genutzt werden kann. Will eine Firma selbst investieren, muss sie sich für eine oder einige wenige Technologien entscheiden.

Additive Fertigungsverfahren sind parallele Produktionsprozesse. Das heisst mehrere unterschiedliche Teile werden zusammen in einem Los (das man „Build“ nennt) gefertigt. Je besser der jeweilige Build ausgelastet ist, desto tiefer sind die Kosten pro Bauteil. Kombiniert werden können aber nur Teile im gleichen Material. Dienstleister fällt es meist leichter eine hohe Auslastung durch die Kombination von Aufträgen verschiedener Kunden zu erzielen. Deshalb können bei ihnen häufig tiefere Preise erzielt werden, als wenn die Teile selbst im Haus gefertigt werden.

Professionelle 3D Drucker sind teuer (100'000 - > 1'000'000 EUR) und die Technologielebenszyklen kurz. Da die Maschinen schnell veralten, werden sie meist über wenige Jahre abgeschrieben. Auch aus diesem Grund ist eine hohe Auslastung zentral.

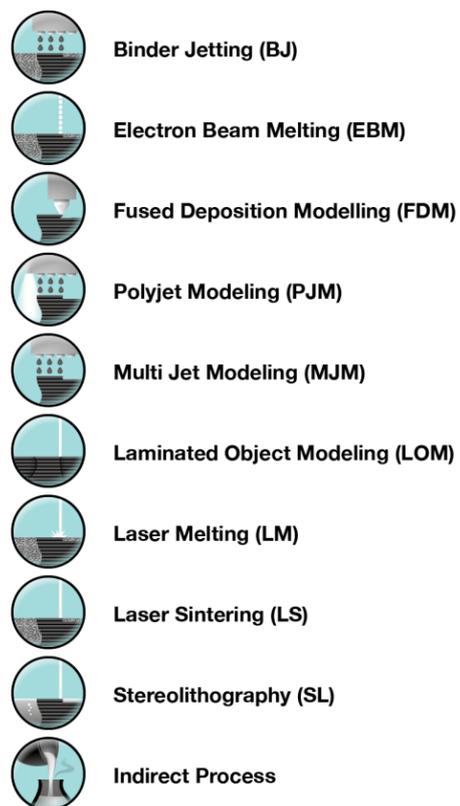


Abbildung 1: Verschiedene 3D Druck Technologien

Zuletzt wird viel spezifisches Knowhow benötigt. Anders als in den Medien suggeriert, ist 3D Printing bei weitem keine „Plug&Play“ Anwendung. Ein optimales Resultat kann nur dank der Erfahrung des Maschinenoperators erzielt werden. Auch hier sind Dienstleister häufig im Vorteil.

Eine Investition in die additive Fertigung lohnt sich vor allem dann, wenn die Fertigungstechnologie einen kompetitiven Vorteil darstellt oder in Zukunft darstellen soll. Ansonsten sprechen die obenstehenden Punkte für die Zusammenarbeit mit Dienstleistern.

### Was gilt es beim Einkauf von 3D gedruckten Teilen zu beachten?

In Europa hat sich ein lebhafter Dienstleistermarkt mit mehreren hundert Anbietern entwickelt, die 3D gedruckte Teile auf Auftrag fertigen. Beispielsweise wurde die Schlauchverbindung in Abbildung 2 von der BSF Bünter AG in der Schweiz mittels Laser Melting in Edelstahl gefertigt. Beim Kauf von additiv gefertigten Teilen sind zwei Punkte zu beachten: Die Auswahl der richtigen Technologie und des richtigen Dienstleisters.



Abbildung 2: Schlauchverbindung gefertigt von BSF Bünter AG

Ein Bauteil kann mit verschiedenen 3D Printing Technologien gefertigt werden. Dienstleister haben meist nur eine oder einige wenige Technologien im Haus. Häufig versuchen sie das vorliegende Problem mittels ihrer Technologie zu lösen. Das muss aber für den Käufer nicht immer die beste Option sein. Es ist daher empfehlenswert, sich zuerst vor Augen zu führen, welche Technologien überhaupt in Frage kommen. Hierbei können Übersichten wie z.B. unter <https://www.additively.com/learn-about/3d-printing-technologies> hilfreich sein.

Sind die möglichen Technologien eingegrenzt worden, geht es um die Auswahl des richtigen Dienstleisters. Dies ist zentral um ein gutes Resultat zu einem vernünftigen Preis zu erzielen. Momentan gibt es Dienstleister mit sehr unterschiedlichen Geschäftsmodellen, die an unterschiedlichen Aufträgen interessiert sind. Das widerspiegelt sich in grossen Preisunterschieden für ein und dasselbe Teil. In einem Benchmark wurden Angebote für das Referenzteil in Abbildung 3 von 22 Dienstleister im gleichen Material (PA12) und im gleichen Verfahren (Laser Sintering) eingeholt. Das preiswerteste Angebot war 12.5 Euro, das teuerste 340 Euro.

### Preis pro Teil in LS PA12

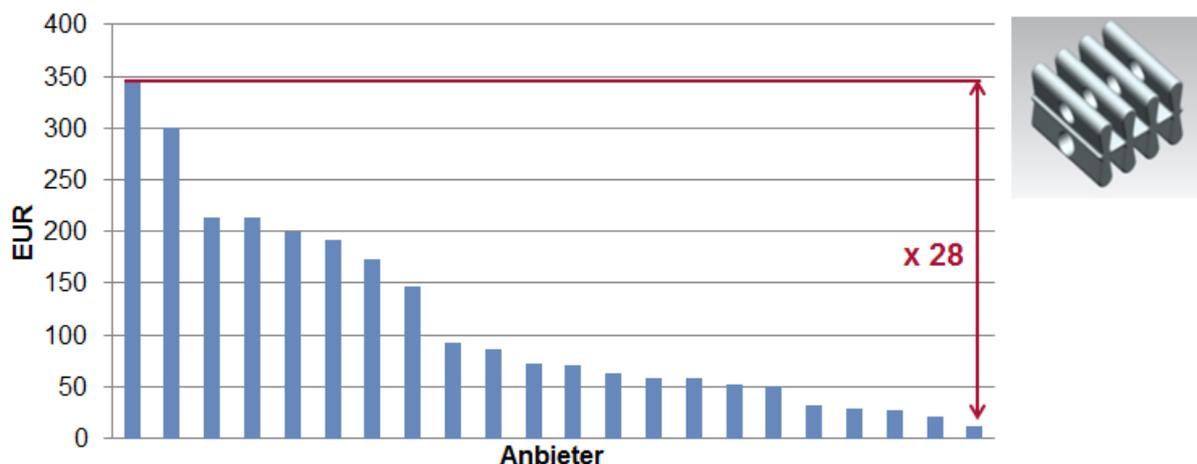


Abbildung 3: Preisvergleich für ein Referenzteil in Laser Sintering

Dies bedeutet nicht, dass die Dienstleister auf der linken Seite der Abbildung grundsätzlich teuer sind, sondern, dass sie an genau diesem Auftrag (kleines Bauteil in Stückzahl eins) nicht interessiert sind. Bei anderen Aufträgen können sie sehr wohl preiskompetitiv sein. Daher sollten immer mehrere Angebote eingeholt werden wenn Teile benötigt werden.

Zusammenfassend ist die Wahl der richtigen Technologie und des richtigen Dienstleisters über den Erfolg beim Einkauf von additiv gefertigten Teilen entscheidend. Diese Auswahl ist aber nicht einfach zu treffen. Einerseits fehlt häufig das benötigte Know-how über die verschiedenen 3D Druck Technologien um eine sinnvolle Eingrenzung zu machen. Andererseits ist die benötigte Zeit oft nicht vorhanden um mögliche Dienstleister zu identifizieren, Angebote ein zu holen und eine fundierte Entscheidung zu treffen. Es gibt daher Bestrebungen, diesen Prozess zu verbessern. An der ETH Zürich wird eine online Plattform für additive Fertigung und professionellen 3D Druck entwickelt die bei diesen Entscheidungen helfen soll: [www.additively.com](http://www.additively.com). Ingenieuren können die Teile, die sie benötigen, innert weniger Minuten auf der Plattform spezifizieren. Diese hilft die richtige Technologie auszuwählen und holt Angebote von geeigneten Dienstleistern ein. Der Ingenieur vergleicht dann die Angebote und bestellt die Teile. Dies reduziert den benötigten Zeitaufwand stark, führt zu tieferen Preisen und kürzeren Leadtimes und ermöglicht den Zugriff auf alle Technologien an einem Punkt.

Durch solche Werkzeuge werden die Hürden additiv gefertigte Bauteile von Dienstleistern zu bestellen weiter gesenkt. Für viele Firmen ermöglicht dies einen optimalen Einstieg in die Welt der additiven Fertigung.

**Autor:**

Matthias Baldinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Betriebswissenschaftlichen Zentrum (BWI) der ETH Zürich und beschäftigt sich mit betriebswirtschaftlichen Aspekten der additiven Fertigung.

## Was steckt schon heute hinter dem Schlagwort 3D Druck?

### Überblick über 3D Druck Technologien und deren Möglichkeiten

#### Vorspann

3D Printing, im Fachbegriff als additive Fertigung bezeichnet, ist momentan stark in den Medien vertreten und scheint für sehr viele Anwendungen innovative Lösungen zu bieten. Dies liegt weniger an der Tatsache, dass 3D Printing ein Alleskönner ist, als daran, dass darunter eine Vielzahl teilweise sehr unterschiedlicher Technologien verstanden wird. Um das heutige Potential wirklich zu verstehen, muss ein differenzierterer Blick auf die Technologien hinter dem Schlagwort 3D Druck geworfen werden.

#### Text

Rund um das Thema 3D Printing existiert momentan ein regelrechter Medienhype. Jede Woche liest man von neuen innovativen Anwendungen: Von komplexen Leichtbauteilen, zuhause gedruckten Ersatzteilen bis hin zu 3D gedruckten Organen. Fast jedes Problem scheint mittels dreidimensionalen Druckens gelöst zu werden. Die Wirtschaftszeitung Economist spricht bereits von der nächsten industriellen Revolution [1]. Dies liegt weniger an der Tatsache, dass 3D Druck ein Alleskönner ist, als daran, dass darunter eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien mit verschiedenem Reifegrad verstanden wird. Um beurteilen zu können, für welche Bauteile und Produkte 3D Druck bereits heute eine vielversprechende Lösung bedeutet, müssen die folgenden Fragen beantwortet werden: Welche Technologien sind bereits ausgereift? Wie funktionieren diese? Welche Implikationen sind für die Umsetzung von Bauteilen mittels 3D Druck Technologien relevant?

#### 1. Professioneller vs. Heim vs. Bio 3D Druck

Allen 3D Printing Technologien ist gemeinsam, dass sie Bauteile direkt ab digitalen 3D Files additiv aufbauen. Hierzu wird das 3D Modell mittels einer speziellen Software in Schichten „geschnitten“. Ein 3D Printer „druckt“ dann jede Schicht und baut das Teil so Schicht um Schicht auf. Um zu verstehen, was dabei heute schon Realität ist und wo die Erwartungen, die in den Medien geschürt werden, noch nicht

erfüllt werden können, lohnt sich ein Blick auf den Gartner Hype Cycle [2] in Abbildung 1. Dieser unterscheidet zwischen den drei Bereichen „Enterprise 3D Printing“, „Consumer 3D Printing“ und „3D Bioprinting“. Der grosse Medienhype geht vom „Consumer 3D Printing“ aus, also den 3D Druckern für einige hundert oder tausend Euro für Zuhause. Diese sind auf dem Gipfel der Erwartungen, welche wohl kaum vollständig realisiert werden können. Zudem dauert es noch 5 – 10 Jahre bis Heim 3D Druck sich breiter durchsetzt. Das „3D Bioprinting“ befindet sich grösstenteils noch im Forschungsstadium und benötigt einen ähnlich langen Zeitraum bis zu ersten relevanten Anwendungen. Anders sieht es beim „Enterprise 3D Printing“ aus. Beim professionellen 3D Druck handelt es sich nicht um Geräte, die etwas mit unseren Tintenstrahl Druckern zuhause zu tun haben, sondern um Werkzeugmaschinen, die bis über eine Million CHF kosten. Laut Gartner werden hier die Erwartungen jetzt Realität. Hier steckt das grosse Potential für Firmen in den kommenden Jahren.

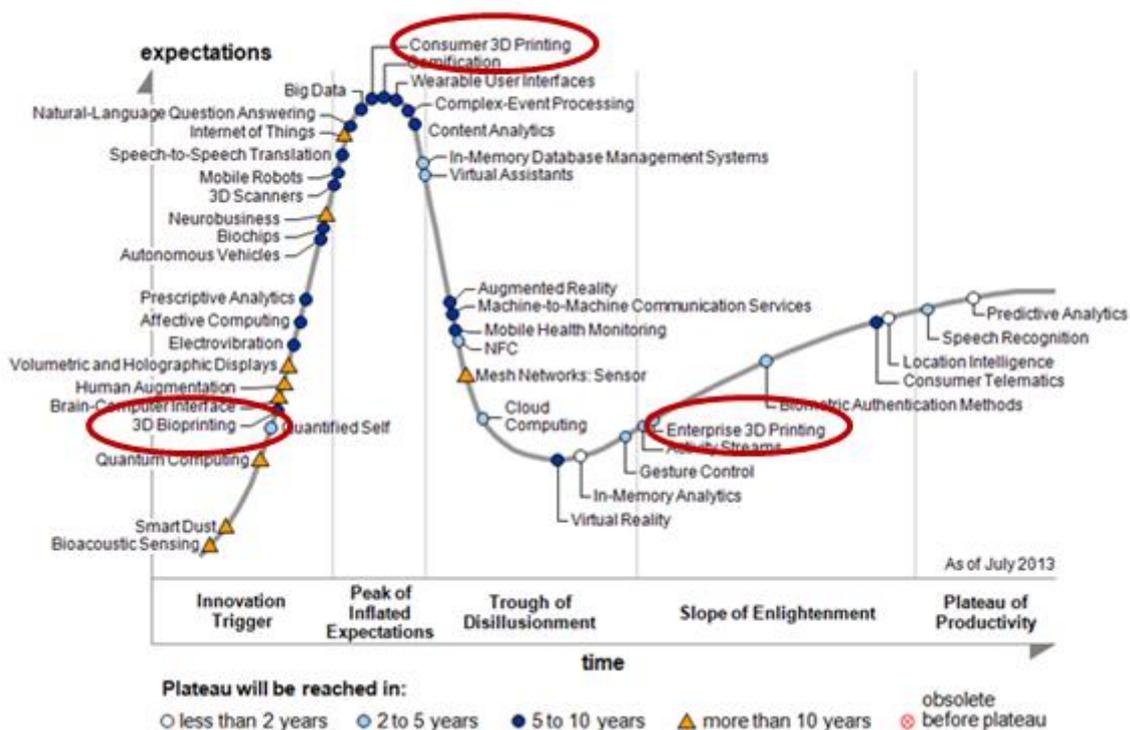


Abbildung 1: Gartner Hype Cycle mit 3D Bioprinting, Consumer 3D Printing und Enterprise 3D Printing [2]

Dieses Potential rührt von den Vorteilen, die professioneller 3D Druck bei der Herstellung von Teilen gegenüber traditionellen Verfahren (wie zum Beispiel Spritzguss) hat. 3D Druck benötigt keine Werkzeuge und kennt daher keine Skaleneffekte. Ob ein Einzelstück oder 1'000 Teile produziert werden wirkt sich nicht

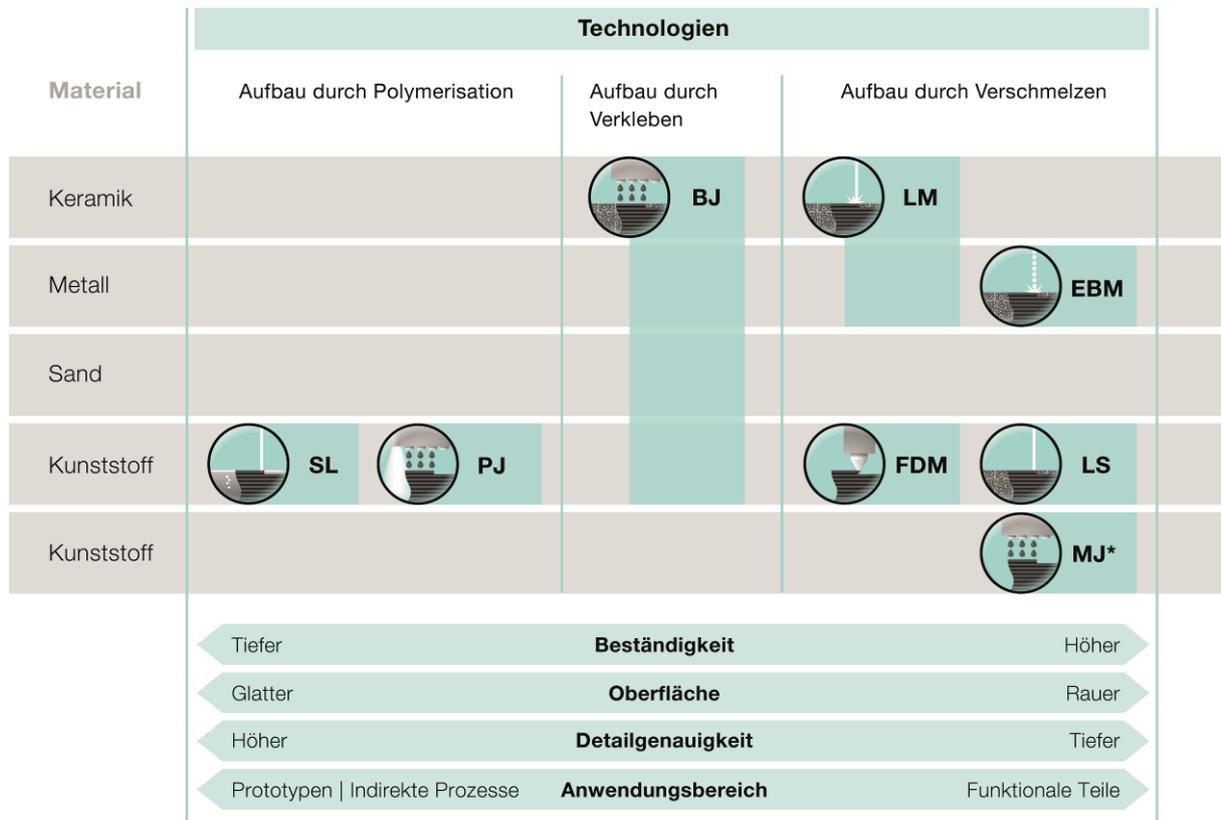
auf die pro Stück kosten aus. Dies ermöglicht eine kosteneffektive Produktion von Teilen in kleiner Stückzahl und macht 3D Druck für Prototypen, Support-Teilen (wie beispielsweise Lehren in der Produktion) Ersatzteile und Kleinserien interessant. Zudem lassen sich durch den schichtweisen Aufbau Bauteile mit komplexer Geometrie erstellen. Diese werden beispielsweise im Leichtbau oder bei strömungsoptimierten Bauteilen benötigt. Eine detaillierte Übersicht über die Vorteile kann bei verschiedenen Autoren gefunden werden [3, 4]. Viele Firmen möchten professionellen 3D Druck für unterschiedlichste Anwendungen nutzen. Hierzu muss aber die technische Funktionsweise der Prozesse verstanden werden. Nur so kann beurteilt werden, wofür sie sich einsetzen lassen.

## **2. Funktionsweise der 3D Druck Technologien**

Abbildung 2 hilft einen Überblick über die gängigsten 3D Druck Technologien zu gewinnen [5] (Benennung der Technologien in Anlehnung an VDI [6]). In der Vertikalen werden die Technologien nach den Materialien, die sie verarbeiten können, unterschieden. Die Horizontale gibt Auskunft darüber, wie die Teile aus dem Material Schicht um Schicht aufgebaut werden. Polymerisation heisst, dass ein flüssiges Photopolymer mittels UV Licht ausgehärtet wird. Hierbei handelt es sich um eine chemische Reaktion, welche das Bauteil Schicht um Schicht aufbaut. Verkleben bedeutet, dass Material in Pulverform mittels eines flüssigen Klebstoffes verbunden wird. Die Teile bestehen also aus verklebten Partikeln des Materials. Schmelzen bedeutet, dass das Ausgangsmaterial Schicht um Schicht aufgeschmolzen wird und beim Abkühlen erstarrt. Die Teile bestehen also aus dem verschmolzenen Material.

Der Aufbau der Teile ist elementar für die Eigenschaften und somit die Anwendungsmöglichkeiten. Für die Polymerisations-basierten Technologien wurden spezialisierte Photopolymere entwickelt. Sie ermöglichen die Herstellung von Teilen mit guter Oberfläche und hohen Details. Da die Teile aber aus einem Photopolymer bestehen, sind ihre Eigenschaften nicht stabil über längere Zeit. Die Teile „altern“ und verlieren ihre mechanischen Eigenschaften. Daher werden sie in erster Linie zur direkten Herstellung von Prototypen verwendet. Anders sieht es aus bei Teilen, die über Verschmelzen entstanden sind. Sie bestehen aus Standard-Materialien, die vergleichbare Beständigkeit und Eigenschaften wie traditionell hergestellte Teile besitzen. Sie werden daher eingesetzt, um direkt funktionale Bauteile zu produzieren.

Aufgrund der Limitation der Prozesse erreichen sie aber weniger gute Oberflächen und weniger feine Details als die Polymerisationsteile. Dazwischen liegt Binder Jetting als Technologie, die mittels Klebstoff Pulver verklebt. Dadurch ist auch hier die Beständigkeit und die Eigenschaften im Vergleich zu Serienteilen begrenzt.



\*MJ erzielt glatte Oberfläche und genaue Details

**Binder Jetting (BJ), Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modelling (FDM), Photopolymer Jetting (PJ), Material Jetting (MJ), Laminated Object Modeling (LOM), Laser Melting (LM), Laser Sintering (LS), Stereolithography (SL), Indirect Process**

© additively.com

Abbildung 2: Übersicht über 3D Printing Technologien [5]

Der Aufbau definiert die Eigenschaften der 3D gedruckten Teile. Diese Teile können nun entweder direkt verwendet oder mit anderen Produktionstechnologien kombiniert werden. Hierbei unterscheidet man:

- **Direkte einstufige Prozesse:** Hier wird das finale Bauteil direkt mit dem 3D Drucker hergestellt. Gegebenenfalls wird es noch selektiv nachbearbeitet (zum Beispiel durch Schleifen zur Verbesserung der Oberfläche)
- **Direkte mehrstufige Prozesse:** Hier wird mittels 3D Druck ein Grünteil hergestellt, welches dann weiter verarbeitet wird.

- Indirekte Prozesse: Hierbei wird ein Modell mittels 3D Druck erstellt, welches als Startpunkt für einen traditionellen Produktionsprozess verwendet wird. Die traditionelle Technologie produziert dann das finale Teil. Beispielsweise können Urmodelle für verschiedene Gussprozesse erstellt werden.

Die Vielzahl verschiedener 3D Druck Technologien und die Möglichkeiten zur Kombination mit anderen Prozessen führt zu einer hohen Komplexität. Für jede Anwendung muss nun aus verschiedenen Alternativen die Richtige ausgewählt werden. Diese Komplexität soll hier anhand eines Beispiels illustriert werden.

### **3. Die Komplexität der Technologiewahl - Ein Beispiel**

Eine Firma benötigt für eine neue Maschine Bauteile aus Edelstahl und zieht zur Herstellung 3D Druck in Betracht. Hierzu bieten sich allerdings fünf verschiedene Alternativen an. Die dabei eingesetzten Verfahren sind in Abbildung 3 illustriert.

1. Die Teile können mittels Laser Melting direkt einstufig aus Edelstahl aufgebaut werden. Bei diesem Prozess wird eine dünne Schicht Metallpulver aufgetragen und mittels eines Lasers verschmolzen. Danach wird die nächste Schicht darüber gelegt und die Teile Schicht um Schicht aufgebaut.
2. Mit Binder Jetting können die Teile in einem direkten mehrstufigen Prozess hergestellt werden. Hierbei wird ebenfalls eine dünne Schicht Metallpulver ausgelegt. Allerdings werden nun Inkjet Druckköpfe verwendet, um einen flüssigen Klebstoff zu applizieren. Schicht um Schicht wird so das Teil verklebt. Das so entstandene Grünteil wird in einem Ofenprozess gesintert und infiltriert.
3. Die Teile können allerdings auch durch Binder Jetting in einem indirekten Prozess hergestellt werden. Hierbei wird nicht das Teil als solches aufgebaut, sondern eine Form (also ein Negativ) aus Giessereisand. Die Teile können danach in Edelstahl im Sandgussverfahren hergestellt werden.
4. Stereolithography kann in einem anderen indirekten Prozess verwendet werden. Hierbei wird ein Urmodell (also ein Positiv) durch die UV-aktivierte Aushärtung eines flüssigen Photopolymer-Bades aufgebaut. Dieses wird abgeformt um Wachsmodelle zu erstellen, die als verlorene Formen im Feinguss verwendet werden.
5. Als letzte Variante kann Material Jetting verwendet werden, um die verlorenen Wachsmodelle direkt herzustellen.

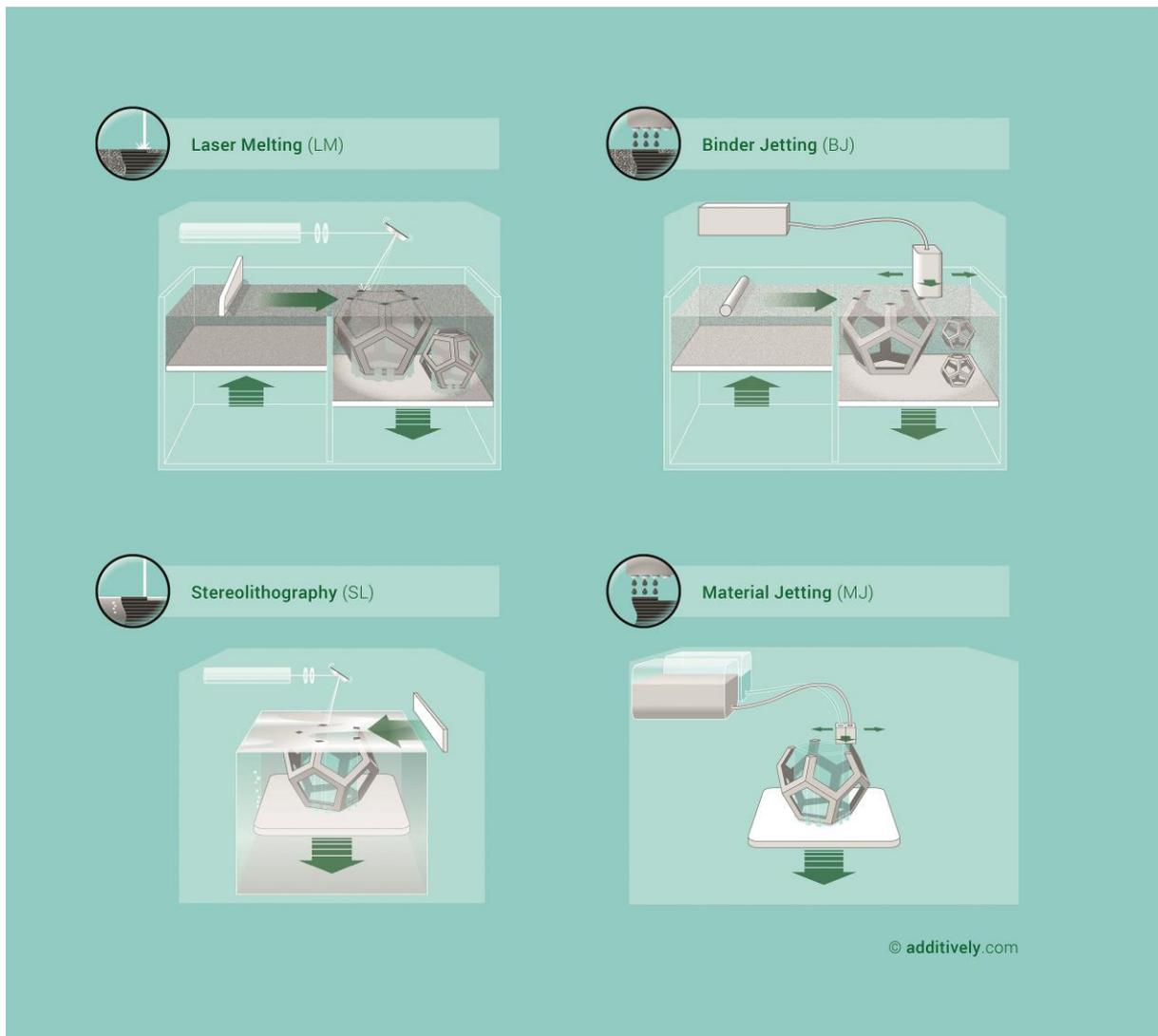


Abbildung 3: 3D Printing Technologien, die zur direkten oder indirekten Herstellung von Edelstahlteilen eingesetzt werden können [5]

Welches die richtige Technologie für die Bauteile ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum ersten hängt es vom Bauteil selbst ab, allen voran der Grösse und der Komplexität. Zudem sind die mechanischen und chemischen Anforderungen an das Bauteil entscheidend. Auch die benötigte Stückzahl hat einen Einfluss auf die Wahl. Die fünf Alternativen haben zudem unterschiedliche Vorlaufzeiten.

#### 4. Implikationen für interessierte Firmen

Das Beispiel zeigt die Komplexität auf, die es zu bewältigen gibt, um 3D Druck Technologien optimal ein zu setzen. Leider werden viele Teile, die gut mittels 3D Druck produziert werden könnten, auf Grund dieser Komplexität nicht umgesetzt. Die folgenden Implikationen ergeben sich für Firmen, die 3D Druck nutzen möchten:

1. Buy anstelle von Make: Für jede Anwendung gilt es neu abzuwägen, welche 3D Printing Technologie die besten Resultate verspricht. Die Zusammenarbeit mit Dienstleistern ermöglicht hier mehr Flexibilität. Je nach Anwendung kann mit einem anderen Dienstleister zusammengearbeitet werden. Wenn 3D Druck im Haus durchgeführt werden soll, muss meist in eine oder einige wenige Technologien investiert werden.
2. Wahl der richtigen Technologie: Wie oben aufgezeigt, ist die Wahl der richtigen Technologie zentral, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Dienstleister haben meist einige wenige Technologien im Haus. Da sie ihre eigenen Technologien am besten kennen, tendieren sie dazu, möglichst viele Probleme mit diesen zu lösen. Das heisst allerdings nicht, dass diese Technologie auch wirklich die Geeignetste ist. Es empfiehlt sich daher, zuerst zu evaluieren, welche Technologien infrage kommen und dann geeignete Dienstleister an zu sprechen.
3. Wahl des richtigen Dienstleisters: In den letzten Jahren hat sich eine grosse Dienstleisterlandschaft für 3D Druck entwickelt. In Europa gibt es mehrere hundert Anbieter. Global wurden im Jahr 2012 Teile für 750 Millionen CHF von Dienstleistern produziert [7]. Diese haben unterschiedliche technologische Ausrichtungen, Geschäftsmodelle und Industriespezialisierungen. Dies führt dazu, dass es sehr grosse Unterschiede in den Preisen für die selben Teile gibt. Ein Benchmark für die Technologie Laser Sintering im Material PA 12 hat eine Preisspanne von Faktor 28 für ein Referenzteil ergeben. Das niedrigste Angebot war 12.5 Euro, das höchste 340 EUR [8]. Je nach Auftrag sind nun unterschiedliche Dienstleister preiskompetitiv. Es ist daher wichtig, dass eine Firma mit ihren Teilen bei einem Dienstleister landet, der an der Art des Auftrags wirklich interessiert ist. Nur so können kompetitive Preise erzielt werden.
4. Unterstützung: Punkte zwei und drei erfordern Know-how und Zeit. Einerseits fehlt es vielen Firmen am Wissen, welches die geeignete 3D Druck Technologie für ihre Teile ist. Andererseits ist meist die Zeit nicht vorhanden, geeignete Dienstleister ausfindig zu machen und von diesen Angebote ein zu holen. Dies führt dazu, dass viele erfolgsversprechende 3D Druck Projekte nicht umgesetzt

werden. Unterstützung können Firmen zum Beispiel beim ETH Spin-Off Additively ([www.additively.com](http://www.additively.com)) finden. Diese ermöglichen es Ingenieuren und Einkäufern innerhalb von Minuten die Teile, die sie benötigen, zu spezifizieren. Die Plattform unterstützt bei der Auswahl der richtigen Technologie und holt Angebote aus einem Netzwerk von Dienstleistern ein.

## 5. Fazit

3D Druck hat grosses Potential. Die Versprechungen des Heim 3D Drucks und von Bio Printing liegen allerdings noch etliche Jahre in der Zukunft. Anders der professionelle 3D Druck, welcher bereits jetzt Realität wird – und von Firmen heute auf mögliche Anwendungen evaluiert werden sollte. Hierbei ist es wichtig, einen differenzierten Blick auf die verschiedenen Technologien hinter 3D Druck zu werfen und deren jeweilige Möglichkeiten zu kennen. Nur so können 3D Druck Projekte erfolgreich umgesetzt werden.

## Literatur

- [1] The Economist: The third industrial revolution, URL: <http://www.economist.com/node/21553017>, Zugriffsdatum 27.02.2014
- [2] Gartner: Gartner's 2013 Hype Cycle for Emerging Technologies Maps Out Evolving Relationship Between Humans and Machines, URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>, Zugriffsdatum 27.02.2014
- [3] Grzesiak, A. et al. (2012): Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch selektives Lasersintern. Springer.
- [4] Gebhardt, A. (2007): Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. Hanser Verlag.
- [5] Additively: Plattform for professional 3D Printing and Additive Manufacturing, URL: <https://www.additively.com>, Zugriffsdatum 27.02.2014
- [6] VDI (2009): Richtlinie 3404: Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. VDI.
- [7] Wohlers, T. (2013): Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report.

[8] Baldinger, M., & Duchi, A. (2013): Price benchmark of laser sintering service providers. In: High Value Manufacturing. CRC Press.

### Kurz & Bündig

Professioneller 3D Druck, im Fachbegriff Additive Manufacturing, ist heute schon Realität und verspricht innovative Lösungen für verschiedenste Probleme. Dies liegt aber weniger daran, dass 3D Druck ein Alleskönner ist, als dass darunter eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien verstanden wird. Um Anwendungen erfolgreich zu realisieren, müssen die Technologien hinter 3D Druck genauer verstanden werden.

### Highlight Zitate

**Beim professionellen 3D Druck handelt es sich nicht um Geräte, die etwas mit unseren Tintenstrahl Druckern zuhause zu tun haben, sondern um Werkzeugmaschinen, die bis über eine Million CHF kosten**

**Die Vielzahl verschiedener 3D Druck Technologien und die Möglichkeiten zur Kombination mit anderen Prozessen führt zu einer hohen Komplexität**

**Einerseits fehlt es vielen Firmen am Wissen, welches die geeignete 3D Druck Technologie für ihre Teile ist. Andererseits ist meist die Zeit nicht vorhanden, geeignete Dienstleister ausfindig zu machen und von diesen Angebote ein zu holen.**

### Key Words:

3D Druck, additive Fertigung, Fertigungstechnologie Wahl, Einkauf

3D printing, additive manufacturing, rapid manufacturing, rapid prototyping, manufacturing technology selection, sourcing

### Multimediale Elemente:

Interaktive Übersicht über 3D Printing Technologien:

<https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>

Online Plattform zur Realisierung von 3D gedruckten Teilen:

<https://www.additively.com/>

## Autoren

Matthias Baldinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am BWI Betriebswissenschaftlichen Zentrum der ETH Zürich und Mitgründer des ETH Spin-offs Additively.com.



- M.Sc.
- Matthias Baldinger
- BWI, Additively
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Mitgründer
- Weinbergstrasse 56/58, 8006 Zürich
- Telefon: +41 (0)44 - 632 05 21
- Email: mbaldinger@ethz.ch
- Internetadresse: [www.lim.ethz.ch](http://www.lim.ethz.ch), [www.additively.com](http://www.additively.com)

Prof. Dr. Gideon Levy ist Fellow der CIRP und wurde mit zahlreichen Awards für seinen Beitrag zur Entwicklung der additiven Fertigung ausgezeichnet (z.B. TCT: 25 most influential people in RPD&M, SME RTAM's Industry Achievement Award )



- Prof. Dr.
- Gideon Levy
- The Centre for Rapid and Sustainable Product Development (CDRsp), Polytechnic of Leiria, Portugal
- Researcher and Scientific Board
- 6644 Orselina, P.O.B: 5, Switzerland Telefon: +41 (0)44 - 632 05 21
- Email: [gideon.levy@ipleiria.pt](mailto:gideon.levy@ipleiria.pt)
- Internetadresse: <http://cdrsp.ipleiria.pt/>

Prof. Dr. Paul Schönsleben ist Professor für Betriebswissenschaften an der ETH Zürich, Departement MTEC Management, Technologie und Ökonomie. Er leitet das BWI Betriebswissenschaftliche Zentrum der ETH Zürich.



- Prof. Dr.
- Paul Schönsleben
- BWI
- Leiter und Professor
- Weinbergstrasse 56/58, 8006 Zürich
- Telefon: +41 44 632 05 10
- Email: pschoensleben@ethz.ch
- Internetadresse: [www.lim.ethz.ch](http://www.lim.ethz.ch)

### Summary

3D Printing, or additive manufacturing, receives currently strong media attention and seems to have an innovative solution to many applications. Not because 3D Printing is miracle worker, but since it stands for a whole list of different technologies. To understand the real potential of 3D printing, a differentiated view on the technologies behind the buzz-word is required.

## 3D-Drucker revolutionieren die Supply Chain

**3D-Drucker machen momentan den Sprung vom Prototyping zur Produktionstechnologie. Als solche versprechen sie, aufgrund fehlender „Economies of Scale“, die Supply Chains in Zukunft fundamental zu verändern.**

Momentan vergeht kaum ein Tag ohne Medienbericht über 3D-Druck. Die Technologie scheint für fast jede Industrie innovative Lösungen zu versprechen. Das Wirtschaftsmagazin Economist spricht sogar von der nächsten industriellen Revolution (The Economist). Doch was ist wirklich dran an diesem Hype? Wird 3D-Druck die Produktion und Supply Chains grundlegend verändern?

### **Das Ende von „Economies of Scale“**

3D-Druck, technisch als additive Fertigung bezeichnet, steht für eine Reihe von Technologien, die Teile und Produkte additiv produzieren. Ausgangspunkt ist ein digitales 3D Modell des Teils, welches von einer Software in Schichten „geschnitten“ wird. Ein 3D-Drucker „druckt“ jede einzelne Schicht, vergleichbar wie ein 2D Drucker. Schicht um Schicht wird so das Bauteil aufgebaut. Es existiert eine Reihe verschiedener 3D-Druck Technologien, welche eine ganze Palette an Materialien verarbeiten und Teile mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen können. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die gängigsten Verfahren. Ursprünglich entwickelt wurden die Technologien für die Herstellung von Prototypen, was als Rapid Prototyping bezeichnet wird. Während der letzten Jahre schaffen sie vermehrt den Sprung zur richtigen Produktionstechnologie, was unter Rapid Manufacturing verstanden wird. Während Rapid Prototyping eine Prozessverbesserung im Entwicklungsprozess darstellt, hat Rapid Manufacturing das Potential zur disruptiven Veränderung der Produktion. „Eine disruptive Technologie [...] ist eine Innovation, die eine bestehende Technologie, ein bestehendes Produkt oder eine bestehende Dienstleistung möglicherweise vollständig verdrängt“ (Wikipedia)

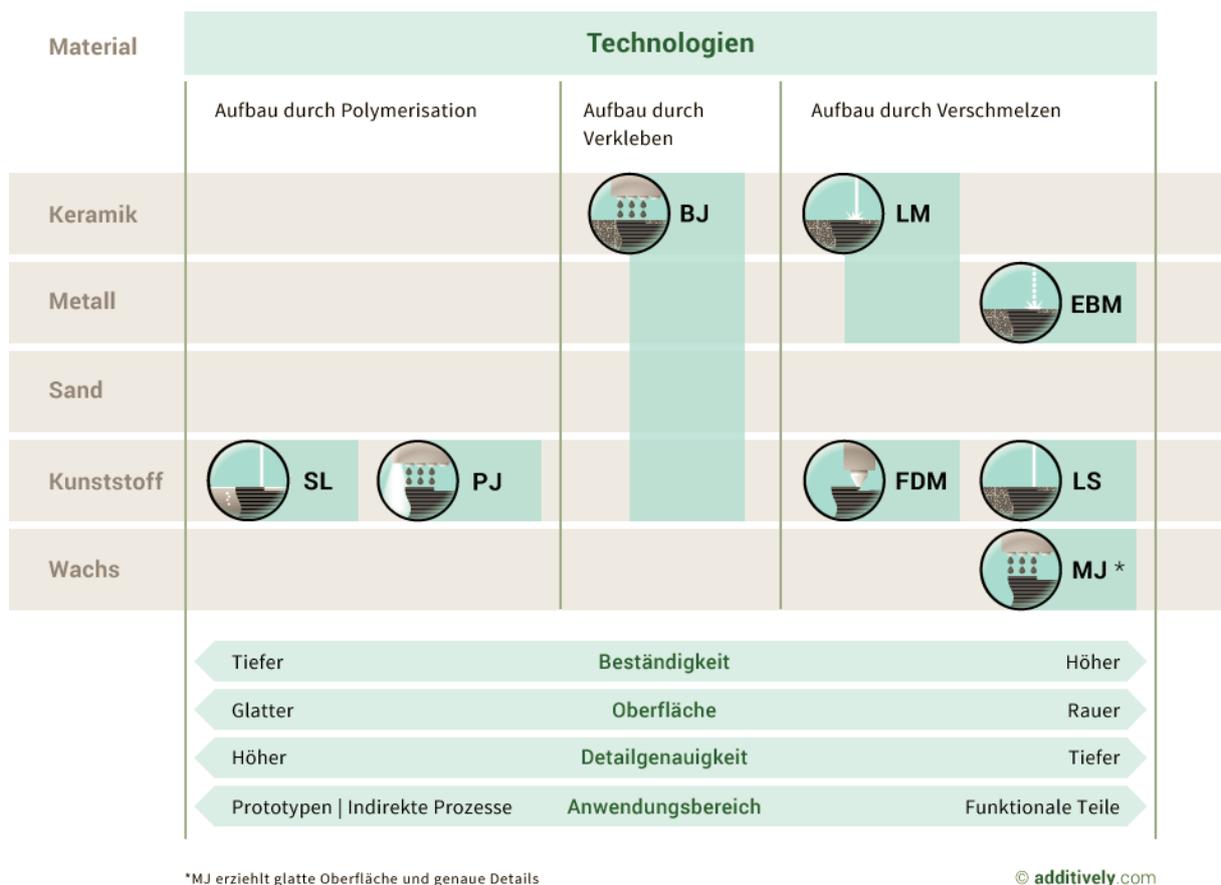


Abbildung 1: Stereolithography (SL), Photopolymer Jetting (PJ), Binder Jetting (BJ), Laser Melting (LM), Fused Deposition Modelling (FDM), Electron Beam Melting (EBM), Laser Sintering (LS), Material Jetting (MJ)

Um die ganze Aufregung um 3D-Druck zu verstehen, muss ein Blick auf die Unterschiede zwischen den traditionellen Produktionsverfahren (wie z.B. Spritzguss) und den neuen Technologien geworfen werden. Hierbei stechen zwei Punkte hervor. Das sind einerseits die geometrischen Freiheiten, welche durch den schichtweisen Aufbau der Teile ermöglicht werden. Der Komplexität der einzelnen Schichten ist kaum Grenzen gesetzt – vergleichbar mit einem 2D Drucker, bei dem es keinen Unterschied macht, ob eine komplexe Zeichnung oder ein einfaches Quadrat ausgedruckt wird. Diese geometrische Freiheit ermöglichen Bauteile mit komplexer Struktur, wie sie im Leichtbau oder bei strömungsoptimierten Bauteilen benötigt werden. Der zweite grosse Unterschied liegt in der Kostenstruktur, welche in Abbildung 2 dargestellt ist. Die meisten traditionellen Produktionsverfahren benötigen für jedes zu produzierende Bauteil ein spezifisches Werkzeug, dessen Herstellung teilbezogene Fixkosten darstellt, welche auf die gesamte Produktionsmenge verrechnet werden müssen. Aus diesem Grund sinken die Kosten pro Teil mit zunehmender Stückzahl, was als „Economies of Scale“ oder Skaleneffekte bezeichnet wird. Die traditionellen Verfahren werden daher oft als Massenproduktionsverfahren bezeichnet, da sie sich für die Produktion grosser Stückzahlen des gleichen Produkts eignen. Anders ist der 3D-Druck, der eigentlich keine „Economies of Scale“ kennt. Ob 10, 100 oder 1'000 Teile produziert werden, hat keinen Einfluss auf den Preis pro Stück.

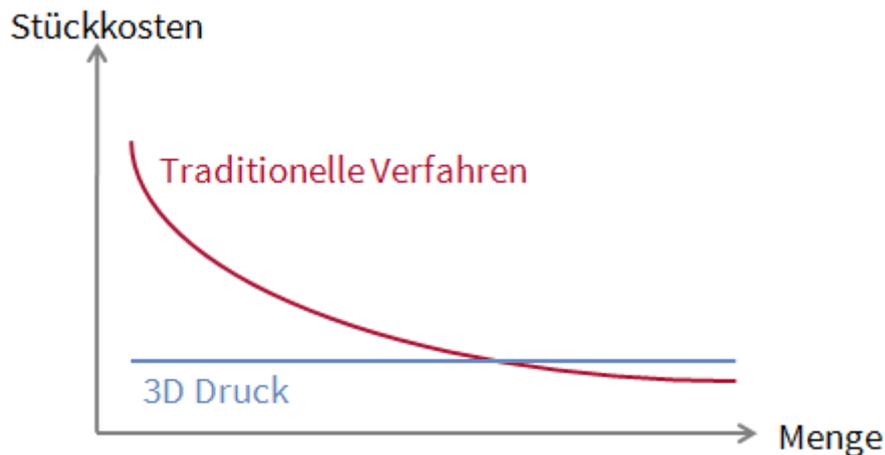


Abbildung 2: Kostenstruktur der traditionellen Produktionsverfahren (wie z.B. Spritzguss) gegenüber 3D-Druck

### **3D-Druck ermöglicht eine kundenspezifische, lokale und bedarfsgerechte Produktion**

Die geometrischen Freiheiten werden in den kommenden Jahren zahlreiche Innovationen hervorbringen. Das disruptive Potential des 3D-Drucks rührt allerdings vom zweiten Unterschied, denn Kostenstrukturen definieren Supply Chains. Die Supply Chains der produzierenden Industrien sind heute stark von „Economies of Scale“ geprägt. Grundsätzlich werden grosse Mengen eines Produkts möglichst zentral produziert, um die Kosten tief zu halten. Die veränderte Kostenstruktur des 3D-Drucks hat das Potential, diese Supply Chains fundamental zu verändern und eine kundenspezifische, lokale und bedarfsgerechte Produktion zu ermöglichen.

*Kundenspezifisch (Customization):* Heute besteht eine Diskrepanz zwischen Markt und Produktion. Kunden verlangen immer besser auf ihre Bedürfnisse abgestimmte und stärker personalisierte Produkte. Das heisst, der Markt fordert viele unterschiedliche Produkte in kleiner Stückzahl. Die heutigen Massenproduktionstechnologien verlangen aber nach grossen Stückzahlen der gleichen Produkte. Um mit dieser Diskrepanz umzugehen, wurden die Techniken der Mass Customization entwickelt. Diese stossen aber zunehmend an ihre Grenzen. 3D-Druck hat das Potential eine echte Customization in der Produktion zu ermöglichen, da keine grosse Stückzahl nötig ist, um tiefe Kosten zu erzielen. Dies kann soweit gehen, dass der Kunde selbst in den Designprozess seines Produkts eingreift und für ihn ein Unikat hergestellt wird. 3D-Druck widerspiegelt daher das Bedürfnis nach massgeschneiderten Produkten der Märkte besser als die heute verwendeten Produktionsverfahren.

*Lokal (on-location):* Traditionell muss eine möglichst grosse Nachfrage nach Produkten konsolidiert werden und in einem oder einigen wenigen Standorten produziert werden. Mit 3D-Druck ist dies nicht mehr nötig. In einem dezentralen Netzwerk kann möglichst nahe beim Kunden produziert werden. Dies reduziert Transportwege und Lieferzeiten.

*Bedarfsgerecht (on-demand):* Da für jedes produzierte Los eines Teils die Produktion umgerüstet werden muss, werden traditionell grosse Stückzahlen produziert, auf Lager gelegt und dann an Kunden verkauft. Mit den additiven Technologien können auch kleine Mengen kosteneffektiv produziert werden und die Produktion kann erst nach eingegangenem Kundenauftrag erfolgen. Im Voraus auf Lager zu produzieren ist daher nicht mehr nötig und hohe Vorabinvestitionen in eine erste Serie, Lagerhaltung und Obsoleszenzen können verhindert werden.

Diese drei Attribute werden die Produktionsnetzwerke der Zukunft prägen. Ein mögliches Szenario ist, dass Produktion vermehrt zum Service in einem dezentralen Netzwerk wird. In einem solchen stellen Dienstleister in einer Vielzahl von Standorten Produkte für verschiedene Firmen her. Die Firmen selbst konzentrieren sich auf die Produktentwicklung, welche die Kundenbedürfnisse bestmöglich abdecken. Hier wird Customization und der Trend zu Nischenprodukten immer wichtiger werden. Häufig wird der Kunde dabei sein Produkt selbst mitgestalten – z.B. über Produkt-Konfiguratoren. Dieses Konzept wird unter dem Begriff Co-Creation verstanden. Erst wenn der Kunde das Produkt wirklich bestellt, wird die Produktion an einem möglichst lokalen Standort von einem Dienstleister ausgeführt.

Die Frage ist, wer diese Produktionsdienstleister sein werden. Bereits heute besteht ein lebendiger 3D-Druck-Dienstleistungsmarkt mit einigen hundert Anbietern alleine in Europa. Dies sind grösstenteils junge und momentan noch kleine Firmen. Einige dieser Firmen werden sich weiterentwickeln und Teil des dezentralen Produktionsnetzwerks werden. Andererseits können sich die Produzenten von heute weiterentwickeln. Hierzu müssen sie sich allerdings einen anderen Fussabdruck zulegen. Anstelle von wenigen Standorten, in denen sie wenige Produkte in grosser Stückzahl fertigen, müssten sie an vielen Standorten viele Produkte in kleiner Stückzahl fertigen. Eine dritte Möglichkeit ist, dass die grossen Logistikdienstleister diese Position einnehmen. Deren Fussabdruck mit hunderten Standorten über alle Kontinente verteilt, deckt sich gut mit dem eines dezentralen Produktionsnetzwerks. Zudem beginnen die Logistiker schon heute, sich immer tiefer in die Wertschöpfungsprozesse ihrer Kunden zu integrieren. Kühne&Nagel beispielsweise bietet bereits Montagedienstleistungen an, z.B. werden Komponenten in ein K&N Lagerhaus geliefert, dort von K&N Personal zum finalen Produkt montiert und direkt an die Kunden des Kunden verschickt (Kühne&Nagel). Eine weitere vertikale Integration, welche die Produktion von Teilen mittels 3D-Druck umfasst, kann einen logischen nächsten Schritt darstellen.

### **Momentane Limitationen und Ausblick**

Momentan gibt es noch etliche Limitationen beim 3D-Druck. Die Palette der zu verarbeitenden Materialien vergrössert sich zwar ständig, ist allerdings im Vergleich mit traditionellen Verfahren limitiert. Die Wiederholbarkeit der Verfahren ist noch nicht komplett gegeben, was einerseits zu hohen Ausschussraten und andererseits zu Schwierigkeiten bei der Sicherstellung von gleichbleibenden Teileeigenschaften führt. Es fehlen zudem Standards und auch die Frage nach dem Schutz des Urheberrechts ist noch nicht beantwortet. Als letzter Punkt wird angeführt, dass 3D-Druck zu teuer ist

im Verhältnis zu den traditionellen Verfahren und sich daher ausserhalb von Nischenanwendungen nur schwer rechnet.

Aufgrund dieser Limitationen wird teilweise argumentiert, dass das Potential von 3D-Druck beschränkt ist. Ich glaube allerdings an den disruptiven Vorteil, welcher von der Absenz von „Economies of Scale“ ausgeht. Was disruptiver Vorteil bedeuten kann, soll abschliessend an einem Beispiel illustriert werden. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Segelschiffahrt innert weniger Jahre komplett durch die Dampfschiffahrt verdrängt und keine einzige der grossen Segelwerften hat den Sprung auf die neue Technologie geschafft. Interessanterweise wurde das Dampfschiff bereits 90 Jahre zuvor erfunden – es war also alles andere als über Nacht gekommen. Während dieser ganzen Zeit wurde die Technologie als untauglich für die wichtigen kommerziellen Meeresrouten erachtet, weil sie störungsanfällig, langsam, laut und teuer war. Diese Limitationen trafen auch alle zu – allerdings hatte man den disruptiven Vorteil der Technologie übersehen: sie braucht keinen Wind. Sobald die Limitationen überwunden wurden, war die Dampfschiffahrt der Segelschiffahrt in den meisten Anwendungen überlegen. Meiner Meinung nach sieht es beim 3D-Druck ähnlich aus. Wir haben zwar momentan verschiedene Limitationen – allerdings auch einen potentiell disruptiven Vorteil: Keine „Economics of Scale“! 3D-Druck stimmt somit besser mit den Bedürfnissen der Kunden und Märkte überein. Die zentrale Frage ist für mich daher nicht ob 3D-Druck eine Auswirkung auf die Supply Chains der Zukunft hat, sondern wann.

## Zur Person

Matthias Baldinger doktort am betriebswissenschaftlichen Zentrum der ETH Zürich. Er untersucht, wie Firmen bei der Anwendung von 3D-Druck unterstützt werden können. Aus dieser Forschung ist das ETH Spin-off Additively.com entstanden.

Additively.com ist die unabhängige Plattform für 3D-Druck. Laden Sie Ihre Teile in wenigen Minuten auf die Plattform. Diese unterstützt Sie bei der Auswahl der richtigen 3D-Drucktechnologie und holt Angebote von geeigneten Dienstleistern ein. Sie vergleichen die Angebote und bestellen Ihre Teile.

Weitere Informationen: [www.additively.com/de](http://www.additively.com/de)

## Zitate

The Economist: The third industrial revolution, URL: <http://www.economist.com/node/21553017>,  
Abrufdatum 15.05.2014

Kühne&Nagel: [http://www.kn-portal.com/contract\\_logistics/in\\_house\\_logistics/](http://www.kn-portal.com/contract_logistics/in_house_logistics/),  
Abrufdatum 15.05.2014

Wikipedia: Disruptive Innovation, URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Disruptive\\_Technologie](http://de.wikipedia.org/wiki/Disruptive_Technologie),  
Abrufdatum 15.05.2014

## Herausforderungen beim Einstieg in 3D-Druck

**3D-Druck hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt und verspricht grosses Potential für die produzierende Industrie. Viele Firmen fragen sich, wie die neuen Technologien eingesetzt werden können. Für einen erfolgreichen Einstieg in 3D-Druck, sollten vier Fragen beantwortet werden: Warum? Was? Mit welcher Technologie? Wie?**

3D-Druck, im Fachbegriff als Additive Manufacturing, additive oder generative Fertigung bezeichnet, steht für eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, welche Bauteile direkt ab digitalen 3D-Modellen Schicht-um-Schicht, also additiv, aufbauen. Hierbei kann heute eine breite Palette an Materialien verarbeitet werden (z.B. Kunststoffe, Metalle, Keramiken). Interessant sind die Technologien vor allem aufgrund zwei Unterschieden zu den meisten traditionellen Produktionsverfahren (wie beispielsweise Spritzguss). Einerseits führt die geometrische Komplexität nicht zu Zusatzkosten und ist generell weniger limitiert. Auf der anderen Seite kennen die Verfahren keine Skaleneffekte, das heisst, es müssen keine grossen Stückzahlen produziert werden um tiefe Kosten zu erzielen (wie dies bei Massenproduktionsverfahren typisch ist).

Das Potential der Technologien basiert auf diesen Unterschieden. Viele Firmen möchten dieses nutzen. Der Einstieg in 3D-Druck stellt sie allerdings vor verschiedenen Herausforderungen. Diese lassen sich am besten entlang der folgenden vier Fragen darstellen:

1. Warum: Welcher Mehrwert soll durch 3D-Druck realisiert werden?
2. Was: Welche Bauteile sollen 3D gedruckt werden?
3. Mit welcher Technologie: Welche Technologie und welches Material eignen sich für die Bauteile?
4. Wie: Wie können Bauteile schnell und effizient umgesetzt werden?

### **Warum: Welcher Mehrwert soll durch 3D-Druck realisiert werden?**

3D-Druck um des 3D-Drucks Willen anzuwenden ist fast nie erfolgreich. Firmen sollten sich daher als Erstes fragen, welcher Mehrwert damit erzielt werden soll. Hierbei kann die Analyse der sechs Anwendungsfelder von 3D-Druck in Abbildung 1 hilfreich sein. Die Felder unterscheiden die verschiedenen 3D-Druck-Anwendungen nach dem Mehrwert, der damit generiert werden soll.



*Abbildung 1: 3D-Druck-Anwendungen nach Mehrwert*

**Schnelleres Prototyping:** 3D-Druck wurde zur Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses durch Rapid Prototyping entwickelt. Heute sind die Möglichkeiten vielfältig: Multi-Material, vollfarbige und transparente Teile können als visuelle Prototypen produziert werden. Zudem lassen sich voll funktionsfähige Prototypen in Kunststoff und Metall herstellen.

**Effizienzsteigerung durch Support-Teile:** 3D gedruckte Hilfsteile können traditionelle (Produktions-) Prozesse effizienter gestalten. Beispielsweise werden Urmodelle oder verlorene Modelle für verschiedene Gussprozesse, Produktionsmittel, Schablonen, Montagehilfen, etc. hergestellt.

**Flexiblerer Produktlaunch durch Bridge Manufacturing:** Mittels 3D-Druck können kleine 0-Serien von neuen Produkten vor der Investition in Werkzeuge schnell und kostengünstig hergestellt werden. So ist ein schnellerer Produktlaunch möglich. Zudem können Produkte mit erstem Kundenfeedback bereits weiterentwickelt werden, bevor in Werkzeuge investiert wird.

**Bessere Produkte:** Durch die bereits angesprochenen geometrischen Freiheiten können bessere Produkte realisiert werden. Hier geht es beispielsweise um komplexe Bauteile, wie sie im Leichtbau oder bei strömungsoptimierten Anwendungen benötigt werden.

**Kundenindividuellere Produkte:** Bei 3D-Druck wird direkt ab digitalen Files produziert. Dies ergibt neue Möglichkeiten bei der Customization. Parametrisierte CAD-Modelle ermöglichen die Anpassung an Kundenbedürfnisse bis hin zur Produktion von Unikaten.

**Kostengünstigere, schnellere und flexiblere Supply Chain:** Aufgrund fehlender Skaleneffekte kann auf Abruf und vor Ort in Losgröße 1 produziert werden. Dies ist zum Beispiel im Ersatzteilwesen äusserst interessant.

Die sechs Anwendungen lassen sich in Prozessverbesserungen, bei welchen weiterhin mit einem traditionellen Verfahren produziert wird, und Serienanwendungen, wobei 3D-Druck direkt als Fertigungstechnologie eingesetzt wird, unterteilen. Firmen sollten entlang ihrer gesamten Wertschöpfungskette analysieren, mit welchen der 3D-Druck-Anwendungen sich Mehrwert

generieren lässt. Hierzu ist 3D-Druck-Anwendungs-Knowhow erforderlich, welches entweder intern aufgebaut oder extern bezogen werden muss.

### **Was: Welche Bauteile sollen 3D gedruckt werden?**

Jedes Bauteil wird spezifisch für eine Fertigungstechnologie konstruiert. Beispielsweise fallen beim Fräsen immer dann Kosten an, wenn Material entfernt wird. Dies führt dazu, dass Frästeile grundsätzlich „solide“ konstruiert werden, das heisst möglichst wenig Material vom Ausgangsblock entfernt werden muss. Beim 3D-Druck ist dies genau umgekehrt. Kosten fallen immer dann an, wenn Material hinzugefügt wird. Aus diesem Grund müssen 3D gedruckte Teile möglichst „filigran“ konstruiert werden.

Darüber hinaus stellt 3D-Druck Firmen vor zwei weitere Herausforderungen in der Konstruktion. Um bessere Bauteile zu realisieren, sollte die Komplexität erhöht werden, zum Beispiel um Leichtbau, Performancesteigerung oder Funktionsintegration zu realisieren. Um kundenspezifischere Bauteile zu produzieren müssen parametrisierte CAD-Modelle erstellt werden, damit diese an individuelle Kundenbedürfnisse angepasst werden können.

Eine weitere Schwierigkeit rührt daher, dass die Entscheidung, 3D-Druck für die Produktion eines bestimmten Bauteils zu verwenden, möglichst früh im Produktentwicklungsprozess gefällt werden muss. Nur so können Bauteile und ganze Baugruppen spezifisch für die Technologien konstruiert werden.

Aufgrund eben genannter Punkte wird für Serienanwendungen 3D-Druck spezifisches Konstruktions-Knowhow benötigt.

### **Mit welcher Technologie: Welche Technologie und welches Material eignen sich für die Bauteile?**

3D-Druck steht für eine ganze Palette unterschiedlicher Technologien und Materialien. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten davon. Darüber hinaus werden 3D-Druck-Technologien häufig mit traditionellen Verfahren kombiniert. Dies führt dazu, dass sich jedes Bauteil auf unterschiedliche Arten realisieren lässt. Für jedes Bauteil muss entschieden werden, welche Technologie und welches Material sich am besten eignet.

Daher wird 3D-Druck-Technologie-Knowhow benötigt, um diese Auswahl für jede Anwendung zu treffen. Informationen zu den einzelnen Technologien sowie damit bearbeitbaren Materialien können beispielsweise unter [www.additively.com/de/lernen/3d-printing-technologies](http://www.additively.com/de/lernen/3d-printing-technologies) gefunden werden.

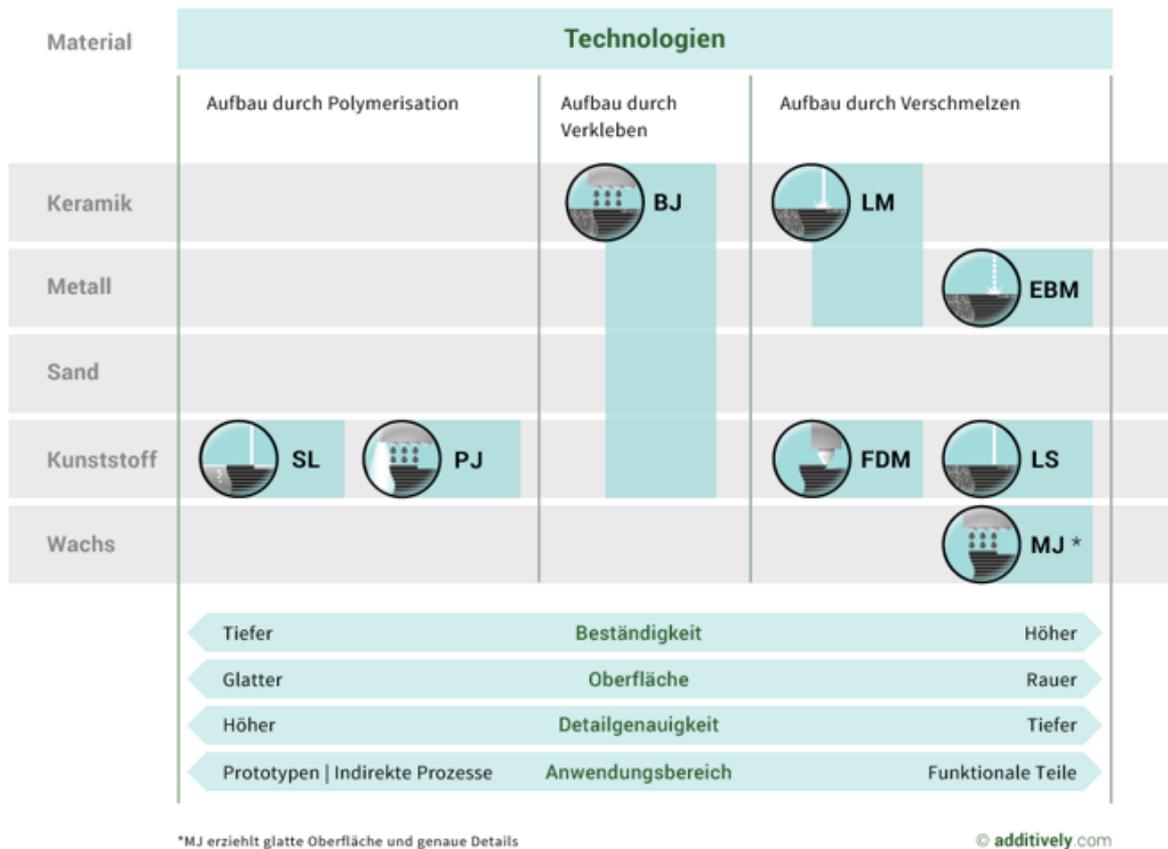


Abbildung 2: 3D-Druck-Technologien: Stereolithography (SL), Photopolymer Jetting (PJ), Binder Jetting (BJ), Laser Melting (LM) Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modeling (FDM), Laser Sintering (LS), Material Jetting (MJ)

### Wie: Wie können Bauteile schnell und effizient umgesetzt werden?

Hierbei stellt sich als erstes die Make-or-Buy Frage: Soll selbst in die 3D-Druck-Technologien investiert werden oder sollen Bauteile bei Lieferanten gekauft werden? Die folgenden Punkte sprechen für den Kauf von Bauteilen bei Lieferanten:

- Nutzung der vollen Breite von 3D-Druck: Wie bereits erwähnt, steht 3D-Druck für eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, welche mehrere Hundert verschiedene Materialien verarbeiten. Die Zusammenarbeit mit Lieferanten gibt Zugriff auf alle Technologien und Materialien, um für jede Anwendung die optimale Lösung zu finden. Sofern selbst investiert werden soll, muss sich eine Firma meist auf einige wenige Technologien und Materialien beschränken
- Keine Investition in teures 3D-Druck-Equipment (mehrere 10'000 –> 1'000'000 CHF)
- Immer neuste Technologien: Kurze Technologielebenszyklen lassen Maschinen schnell veralten. Über Lieferanten haben Firmen immer Zugriff auf neuestes 3D-Druck-Equipment.
- Höhere Auslastung ermöglicht oft tiefere Kosten bei Lieferanten
- Nutzung des spezialisierten Knowhows der Lieferanten

Mittlerweile gibt es einen sehr lebhaften 3D-Druck-Lieferantenmarkt. Die Lieferanten unterscheiden sich basierend auf den angebotenen Technologien, deren Geschäftsmodellen und

Industriespezialisierungen. Firmen sollten daher mit einem Portfolio unterschiedlicher Lieferanten zusammenarbeiten, um für jede Anwendung den richtigen Partner zu haben.

Um Bauteile schnell und effizient bei Lieferanten umzusetzen, benötigt es spezifische Einkaufsprozesse für 3D gedruckte Bauteile. Diese müssen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Ingenieure, Produktmanager und Verkaufsmitarbeiter, welche Bauteile konstruieren oder anpassen, brauchen einen direkten Zugang zu den Lieferanten. Der Umweg über die Einkaufsabteilung macht den Beschaffungsprozess langsam und komplex.
- Der Einkaufsprozess sollte einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Im Gegensatz zu den traditionellen Verfahren, wo selten grosse Bestellungen getätigt werden, werden bei 3D-Druck häufig kleine Bestellungen ausgeführt. Ohne Automatisierung führt dies schnell zu hohen administrativen Kosten.
- Lieferantenauswahl und Wechsel müssen einfach vollzogen werden können, da sich sowohl der Markt als auch die 3D-Druck-Technologien über die nächsten Jahre schnell weiterentwickeln werden.

Eine Möglichkeit diese Anforderungen zu erfüllen sind 3D-Druck spezifische E-Procurement Lösungen. Auf diese Weise können Bauteile schnell und effizient bei Lieferanten gefertigt werden.

### Wo soll heute begonnen werden?

Um 3D-Druck einzusetzen, ist Anwendungs-, Konstruktions- und Technologie-Knowhow nötig. Zudem müssen geeignete Einkaufsprozesse zur Umsetzung von Bauteilen bei Lieferanten implementiert werden. Für Firmen stellt sich die Frage, wie an das Thema herangegangen werden soll, um dieses Knowhow aufzubauen.

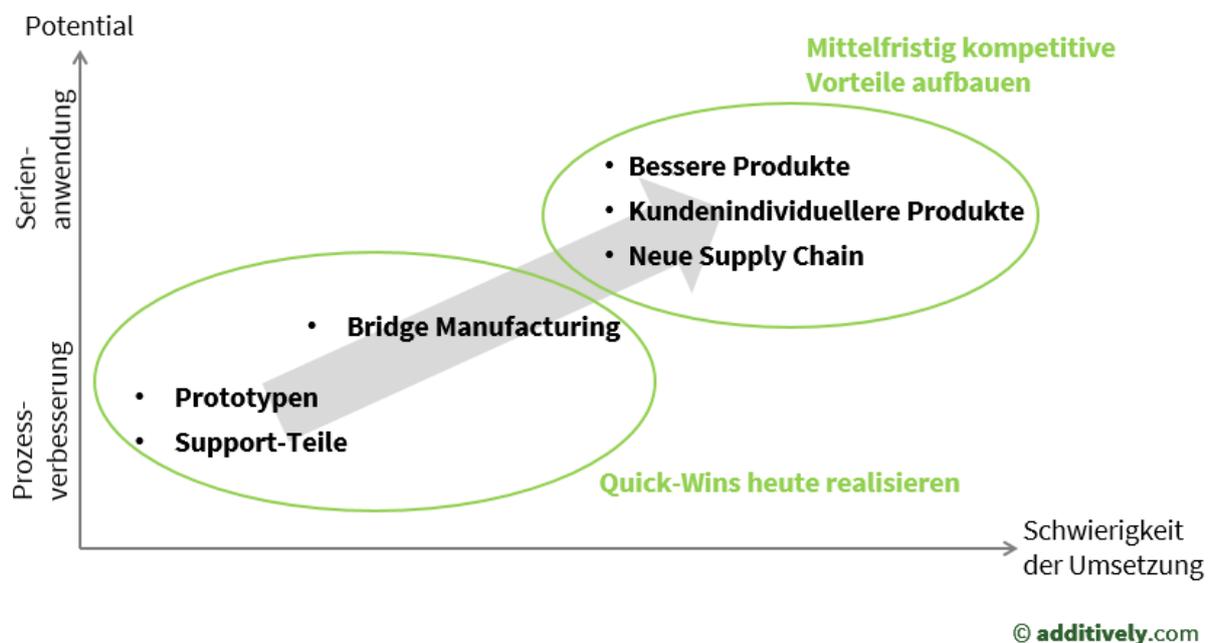


Abbildung 3: Potential und Schwierigkeit der Umsetzung der 3D-Druck-Anwendungen

Abbildung 3 zeigt, wie sich die sechs 3D-Druck-Anwendungen bezüglich ihres Potentials und ihrer Schwierigkeit bei der Umsetzung unterscheiden. Firmen sollten möglichst mit den Prozessverbesserungsanwendungen beginnen und diese als Quick-Wins heute umsetzen. Häufig

werden beispielsweise die Möglichkeiten im Prototyping nicht ausgeschöpft. Durch die Umsetzung dieser Anwendungen wird Knowhow aufgebaut. Mittels dieses Knowhows können mittelfristig Serienanwendungen umgesetzt werden und ein kompetitiver Vorteil realisiert werden.

## Zur Person

Matthias Baldinger doktriert am betriebswissenschaftlichen Zentrum der ETH Zürich, wo er Supply Chain Fragestellungen rund um 3D-Druck untersucht. Aus dieser Forschung ist das ETH Spin-off Additively entstanden.

Additively ([www.additively.com](http://www.additively.com)) ist die grösste E-Procurement-Lösung für 3D-Druck und Additive Manufacturing. Sie bietet Firmen und ihren Mitarbeitern einen „Single Point of Access“ zu 3D-Druck. Über eine einzige und sichere (SSL gesicherte) Schnittstelle kann auf mehr als 300 Lieferanten, welche alle Technologien und über 250 verschiedene Materialien anbieten, zugegriffen werden. Der automatisierte Workflow macht das Einholen von Angeboten und Bestellen von Bauteilen einfach und schnell möglich. Sofern erforderlich unterstützt Additively zudem bei der Auswahl der richtigen Technologie und der Identifikation der geeignetsten Lieferanten.

## Das volle Potential von Additive Manufacturing braucht den richtigen Beschaffungsprozess

**Additive Manufacturing (AM) / 3D-Druck ermöglicht die kosteneffektive Produktion von Bauteilen in kleiner Stückzahl und ergänzt somit die traditionellen Massenproduktionsverfahren. Doch die Beschaffung von additiv gefertigten Teilen passt nur bedingt in bestehende Einkaufsprozesse, wodurch viele Firmen in der Nutzung limitiert sind. Um das volle Potential zu realisieren, benötigt es daher einen AM spezifischen Einkaufsprozess.**

Neben neuen Designfreiheiten, sind fehlende Skaleneffekte einer der grossen Vorteile von additiven Fertigungstechnologien gegenüber traditionellen Massenproduktionsverfahren wie beispielsweise Spritzguss. Das heisst mit diesen Technologien existiert die Möglichkeit, kleine Stückzahlen von Bauteilen kostengünstig und effizient zu produzieren. Viele Firmen nutzen sie daher für Prototypen, Support-Teile, kundenindividuelle Teile oder Kleinserien. Anders als häufig in den Medien suggeriert, verdrängt die additive Fertigung die traditionelle daher mittelfristig nicht, sondern ergänzt sie. Die traditionelle Supply Chain eignet sich für die Vorabproduktion von grossen Stückzahlen und die additive Supply Chain für die on-demand Produktion von kleinen Stückzahlen.

Aufgrund hoher Technologie- und Materialvielfalt, hohen Investitionen und kurzen Technologielebenszyklen arbeiten die meisten Firmen mit externen Lieferanten anstelle selbst in die Technologien zu investieren. Häufig wird versucht, die Zusammenarbeit mit AM Lieferanten im Rahmen der bereits existierenden Beschaffungsprozesse abzubilden. Diese Prozesse wurden allerdings für die Vorabproduktion grosser Stückzahlen konzipiert und eignen sich daher nicht für die additive Fertigung.

### **Neue Anforderungen an die Beschaffung**

Heutige Beschaffungsprozesse funktionieren vereinfacht wie folgt. Ein Ingenieur konstruiert ein Bauteil für Spritzguss. Sobald er die Konstruktion beendet hat, „übergibt“ er das Bauteil an den Einkauf. Dieser kontaktiert mehrere Lieferanten und verhandelt die Kosten für den Bau eines Werkzeuges und die Produktion einer ersten Serie. Der Einkauf entscheidet sich für einen Lieferanten und einige Monate später sind die Bauteile im Haus. Dieser manuelle und zeitaufwendige Prozess funktioniert gut, sofern selten Bestellungen über grosse Beträge anfallen und lange Vorlaufzeiten existieren. Zudem müssen die Anforderungen standardisiert abbildbar sein.

Bestellungen von additiv gefertigten Teilen unterscheiden sich von traditionellen Bestellungen. Da es um kleine Stückzahlen geht, ersetzen viele kleine Bestellungen wenig grosse. Eine AM Bestellung ist typischerweise einige hundert bis einige tausend CHF. Da on-demand produziert wird, sind die Bestellungen zudem meist zeitkritisch. Im Prototyping sind kurze Leadtimes von wenigen Tagen von Idee bis Erhalt des Bauteiles normal. Da es sich zudem bei jeder Bestellung um etwas Neues handelt und viele Standards noch fehlen, gibt es häufig spezifische Anforderungen, die diskutiert werden müssen. Dies führt zu den folgenden Anforderungen an einen Beschaffungsprozess für additive Fertigung:

- Mitarbeiter und Ingenieure müssen direkt mit externen Lieferanten zusammenarbeiten. So können administrativer Aufwand und Vorlaufzeit reduziert und spezifische Fragen direkt geklärt werden.



Für viele der gängigen Materialien und Technologien können fixe Preise verhandelt werden (wie dies im B2C Umfeld bereits Realität ist).

- Keine bevorzugten Lieferanten, bei denen Volumen gebündelt und gute Konditionen realisiert werden. Da der Prozess nicht standardisiert ist, hat der Einkauf keine Kontrolle darüber und kann seiner Aufgabe nicht nachkommen, Lieferanten auszuwählen und vorteilhafte Konditionen mit diesen zu verhandeln.
- Unsicherer Datenaustausch über Email und verschiedene Lieferantenportale.

### E-Procurement-Systeme für die additive Fertigung

Um diese Nachteile zu adressieren, haben wir an der RapidTech, einer der führenden Konferenzen für Additive Manufacturing, spezifische E-Procurement-Systeme als Lösung für den Beschaffungsprozess präsentiert (siehe Abbildung 2).

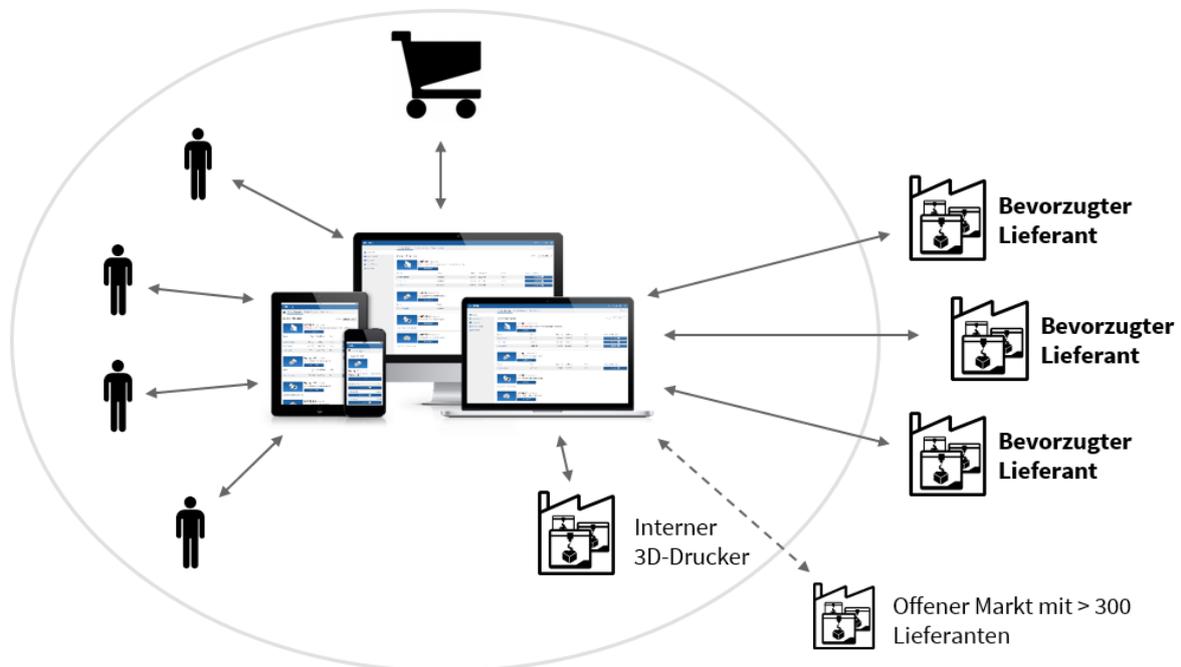


Abbildung 2: AM spezifischem E-Procurement-System ermöglicht die standardisierte und effiziente Beschaffung von additiv gefertigten Teilen

Mithilfe einer solchen Lösung kann der Einkauf die bevorzugten Lieferanten definieren und gegebenenfalls internes Equipment in das System integrieren. Konditionen, die mit diesen Lieferanten verhandelt wurden, können direkt im System hinterlegt werden.

Ingenieure haben nun einen „Single Point of Contact“ für additiv gefertigte Bauteile. Über das System sehen sie sofort, welche Technologien und Materialien zu welchen Konditionen bei welchen Lieferanten zu Verfügung stehen. CAD-Files können direkt über die gesicherte Schnittstelle an diese übermittelt und die Bauteile bestellt werden. Der Einkauf erhält zudem eine volle Datenbasis über die Nutzung additiver Fertigung im Unternehmen. Diese Datenbasis kann genutzt werden, um das AM Geschäft regelmässig auszuschreiben und gute Konditionen mit den Lieferanten zu verhandeln.

So können additiv gefertigte Bauteile mit minimalem Aufwand und minimaler Vorlaufzeit realisiert werden und somit das wirkliche Potential von on-demand Produktion in kleiner Stückzahl realisiert werden.

## Autor

Matthias Baldinger, M.Sc., Research Assistant an der ETH Zürich und Mitgründer des ETH Spin-offs Additively ([www.additively.com](http://www.additively.com)), Weinbergstr. 56/58, 8092 Zürich, [mbaldinger@ethz.ch](mailto:mbaldinger@ethz.ch), [matthias.baldinger@additively.ch](mailto:matthias.baldinger@additively.ch)