



## Projektbericht – AM 4 Industry

---

Qualitätsoptimierung und Kostenanalysen zur  
Vorbereitung der Implementation additiver  
Fertigungsverfahren

Das Projekt wurde finanziert durch



FLANDERS INNOVATION &  
ENTREPRENEURSHIP



**Flanders**  
State of the Art



Wallonie



Service public  
de Wallonie



FFG



ALLIANZ  
INDUSTRIE  
FORSCHUNG

## Forschungspartner



## Firmenpartner



# Document Information

<b>Acronym</b>	AM4Industry
<b>Full title</b>	AM 4 Industry - Quality assurance and cost models supporting the wide spread use of additive manufacturing
<b>Web</b>	<a href="http://www.am4industry.com">www.am4industry.com</a>

<b>Work package 5</b>	Cost-benefit-model and impact on the market
<b>Deliverable</b>	D5.2/1 Generally valid assessment system for the benefit analysis of additive manufacturing
<b>Lead beneficiary</b>	Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e. V. an der RWTH Aachen  Campus-Boulevard 55 52074 Aachen Germany phone.: +49 241 47705-142 e-mail: info@fir.rwth-aachen.de

<b>Date:</b>	September 2019		
<b>Nature:</b>	Report	<b><u>Dissemination level</u></b>	PU (Public)

<b>Project Coordinator</b>	DI Benjamin Losert	<b>E-Mail:</b>	<a href="mailto:b.losert@ecoplus.at">b.losert@ecoplus.at</a> <a href="mailto:cluster@ecoplus.at">cluster@ecoplus.at</a>
<b>Partner</b>	ecoplus. The Business Agency of Lower Austria	<b>Phone:</b>	+43 2742 9000 19669

<b>Authors</b>	Tobias Schröer (FIR), Sören Münker (FIR)
<b>Key words</b>	additive manufacturing, cost-benefit-model, AM 4 Industry,
<b>DOI</b>	10.5281/zenodo.3540709

## Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Forschungsprojekts .....	6
2	Identifikation der Anforderungen und Analyse von bestehenden Modellen....	7
2.1	Identifikation der Anforderungen an ein Bewertungssystem für die Additive Fertigung .....	7
2.2	Überblick über bestehende Modelle .....	9
2.2.1	Grundlagen der Lebenszykluskostenbetrachtung .....	9
2.2.2	Bestehende Kostenmodelle für die Additive Fertigung .....	10
3	Entwicklung des Bewertungssystems für die Additive Fertigung.....	17
3.1	Ein praxistaugliches Kostenmodell für die Additive Fertigung.....	17
3.1.1	Erläuterung der Berechnungsgrundlage des Kostenmodells .....	18
3.1.2	Aggregation der Berechnungsgrundlagen zu einem Kostenmodell.....	24
3.2	Ein praxistaugliches Nutzenmodell für die Additive Fertigung .....	24
3.2.1	Wesentliche Vorteile der Additiven Fertigung.....	29
3.2.2	Anwendung des Benefit-Modells .....	37
3.3	Ein webbasiertes, integriertes Cost-Benefit-Tool .....	40
4	Literaturverzeichnis .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Umfrageergebnisse zur Nutzung Additiver Fertigung .....	7
Abbildung 2.2:	Umfrageergebnisse zu den ökonomischen Aspekten von AM ...	8
Abbildung 2.3:	Identifikation der Kernprobleme mittels LCC .....	9
Abbildung 2.4:	LCC — Produkt- vs. Maschinensicht (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2005; LINDEMANN ET AL. 2013).....	10
Abbildung 2.5:	Überblick über bestehende Kostenbetrachtungen.....	11
Abbildung 2.6:	Relevante Phasen des Lebenszyklusmodells .....	13
Abbildung 2.7:	Vergleich der Kostenmodelle von Ruffo et. al. sowie Hopkinson und Dickens (i. A. a.RUFFO ET AL. 2006, S. 1424).....	14
Abbildung 2.8:	Überblick über die relevanten AM-Kostenmodelle (RUFFO ET AL. 2006; LINDEMANN ET AL. 2012; 2013).....	15
Abbildung 2.9:	Zielidentifikation durch Abgleich von Problemen und Anforderungen.....	16
Abbildung 3.1:	Lösung zur Behebung der identifizierten Probleme .....	18
Abbildung 3.2:	Datenstruktur .....	19
Abbildung 3.3:	Hauptübersicht Kostenmodell.....	20
Abbildung 3.4:	Design & Development.....	21
Abbildung 3.5:	SLM-Manufacturing .....	22
Abbildung 3.6:	Entsorgungskosten.....	23
Abbildung 3.7:	Kostenmodell Excel .....	24
Abbildung 3.8:	Ergebnisse Nutzenmodell.....	26
Abbildung 3.9:	Ausschnitt der Literaturmatrix bezüglich der Benefits.....	27
Abbildung 3.10:	Graphenmodell .....	28
Abbildung 3.11:	Vertikale Differenzierung des Benefit-Modells .....	38
Abbildung 3.12:	Benefit-Modell — Ursachen und direkte Konsequenzen .....	38

Abbildung 3.13: Benefit-Modell — Ursachen und mögliche indirekte Konsequenzen 1. Grades .....	39
Abbildung 3.14: Benefit-Modell — Ursachen und mögliche indirekte Konsequenzen 2. Grades .....	40
Abbildung 3.15: Cost-Benefit-Modell .....	40
Abbildung 3.16: Cost-Benefit-Modell — Overview.....	41
Abbildung 3.17: Cost-Benefit-Modell – Product.....	42
Abbildung 3.18: Cost-Benefit-Modell — Machine .....	43
Abbildung 3.19: Cost-Benefit-Modell — Material.....	44
Abbildung 3.20: Cost-Benefit-Modell – Job .....	44
Abbildung 3.21: Cost-Benefit-Modell — Business Values Input Data.....	45
Abbildung 3.22: Cost-Benefit-Modell — Postprocessing Data .....	45
Abbildung 3.23: Benefit-Modell.....	46

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung .....	29
Tabelle 2: Methoden des Benefit-Modells .....	30
Tabelle 3: Zwecke der Additiven Fertigung .....	33
Tabelle 4: Ziele der Additiven Fertigung.....	35
Tabelle 5: Werte der Additiven Fertigung .....	36

# 1 Ziel des Forschungsprojekts

Das primäre Ziel des Projekts AM 4 Industry bestand darin, ein Modell zu entwickeln, das die Vorteile der Integration von Additiver Fertigung in die Produktionstechnologien eines Unternehmens aufzeigt. Hierzu wurden sowohl die resultierenden Kosten als auch der durch die Produktion mit Additiver Fertigung generierte Benefit identifiziert.

Das Kosten-Nutzen-Modell soll ein für die Industrie praktikables Modell bieten, das den Vergleich verschiedener Produktionsmethoden für bestimmte Teile ermöglicht. Dadurch sollen Unternehmen befähigt werden, fundierte Entscheidungen über die potenzielle Einbeziehung der Additiven Fertigung in ihre Produktion zu treffen. Heutzutage basieren diese Entscheidungen oft auf unvollständigen Informationen, Teilkosten und unsachgemäßem Urteilsvermögen.

Der Einsatz der Additiven Fertigung zur Herstellung von Teilen verändert oft mehr als lediglich einen Einzelaspekt in der Lieferkette. Aus diesem Grund ist es schwierig, einen klaren Überblick über den möglichen Nutzen sowie eventuelle Kosten zu erhalten. Für einen Vergleich, der alle Aspekte berücksichtigt, ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Hierzu müssen alle einflussnehmenden Faktoren betrachtet werden. Dazu zählt insbesondere die fundierte Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus: Produktdesign / Engineering, Produktion / Qualität, Service / After Sales. Die Vorteile der Produktion mit Additiver Fertigung sind zum Beispiel die Funktionsintegration in einzelne Bauteile oder neue Möglichkeiten in der Ersatzteulfertigung. Demgegenüber stehen jedoch u. a. teilweise längere Produktionszeiten und hohe Implementierungskosten der Technologie.

Da es nicht möglich ist, den Nutzen der Additiven Fertigung allein mit einem klassischen Kostenvergleich zu bewerten, musste ein neues generisches Modell entwickelt werden, das die über den gesamten Lebenszyklus entstehenden Kosten mit den technologischen Vorteilen vergleicht. Mit diesem Wissen erhalten Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil, denn anstelle von zeitaufwändigen Trial-and-Error-Tests kann das Modell den Entscheidungsprozess beschleunigen und die Erfolgsrate der Entscheidungen erhöhen.

Darüber hinaus wird ein wirtschaftlicherer Einsatz der Technologie ermöglicht, indem bei der Anwendung des entwickelten Modells neue Vorteile Additiver Fertigung identifiziert und schließlich nutzbar gemacht werden können. Die Anwendbarkeit des Modells in einem frühen Stadium — auch ohne genaue Daten — ermöglicht es Anwendern, sich bei ihren Bemühungen auf erfolgversprechende Anwendungsfälle zu konzentrieren und damit Ressourcen effizienter einzusetzen.

## 2 Identifikation der Anforderungen und Analyse von bestehenden Modellen

Zur Erstellung eines Bewertungssystems für die Additive Fertigung wurden zunächst die Anforderungen an das System durch eine Umfrage sowie Expertenbefragungen identifiziert. Darüber hinaus wurden bereits bestehende Modelle analysiert.

### 2.1 Identifikation der Anforderungen an ein Bewertungssystem für die Additive Fertigung

Die Auswertung einer **Umfrage** zur Evaluierung des potenziellen Nutzens der Additiven Fertigung mit insgesamt 107 teilnehmenden Unternehmen zeigte, dass sich hauptsächlich kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aus den Industriezweigen Anlagen- und Gerätebau, Automobilindustrie und Elektrotechnik/Elektronik den Fragen stellten. Die meisten gaben an, zwischen 50-250 Mitarbeiter zu beschäftigen. Drei Viertel der Befragten verorten sich in der Wertschöpfungskette als (Komponenten-)Produzenten.

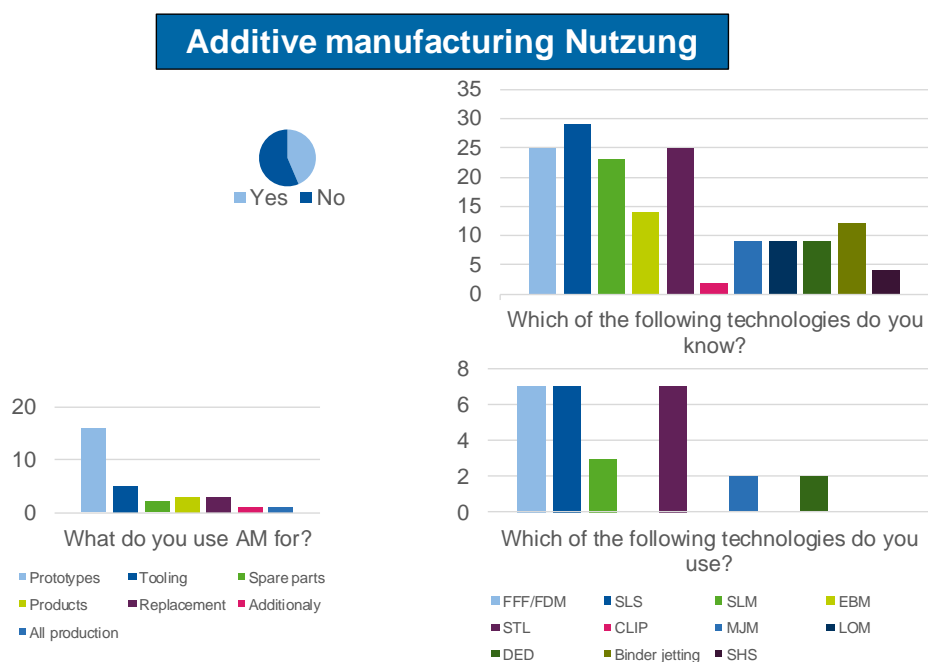
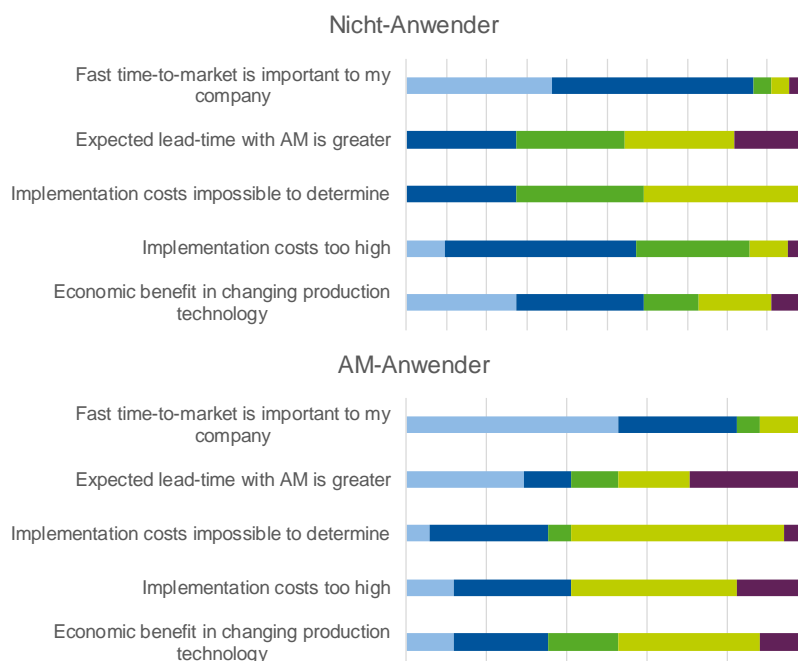


Abbildung 2.1: Umfrageergebnisse zur Nutzung Additiver Fertigung

Etwas weniger als die Hälfte der Befragten nutzt bereits die Additive Fertigung. Dabei werden die Additiven Fertigungsverfahren primär zur Herstellung von Prototypen eingesetzt. Eine Etablierung der direkten Fertigung von Endprodukten ist demnach noch nicht verbreitet. Unternehmen, die bisher noch keine Additiven Fertigungsverfahren

anwenden, weisen Unsicherheiten in Bezug auf die Einschätzung der Kosten und der Potenziale der noch wenig verbreiteten Fertigungstechnologie auf.



**Abbildung 2.2: Umfrageergebnisse zu den ökonomischen Aspekten von AM**

Die Befragten zeigten ein generelles Interesse an der Anwendung der Technologie. Hauptgründe für die Nutzung der Additiven Fertigung sind neben technischen Vorteilen die Reduktion der Durchlaufzeiten und des Faktors „Time-to-Market“. Großes Interesse besteht insbesondere an der Integration neuer Funktionen oder zusätzlicher Komponenten in das aktuelle Design. Die Implementierungskosten stellen jedoch für Viele eine Barriere dar. Auch Unternehmen, die bereits Erfahrungen mit der Additiven Fertigungstechnologie aufweisen, sehen einen nur geringen ökonomischen Nutzen durch den erforderlichen Wechsel der Produktionstechnologie. Die Umfrageergebnisse bestätigen die These, dass den Unternehmen die Vorteile der Additiven Fertigung nicht umfassend klar sind und eine gesamtheitliche Kostenbetrachtung fehlt.

In **Expertenbefragungen** wurden neben den Anforderungen der Schaffung einer klaren Kostenstruktur und der Aufdeckung wirtschaftlicher Vorteile mit den Projektpartnern weitere Erfordernisse identifiziert. Einerseits müssen die Kosten eines additiv gefertigten Bauteils im Hinblick auf seinen gesamten Lebenszyklus bestimmt werden, um den wirtschaftlichen Vorteil der Additiven Fertigung bemessen zu können. Weiter muss ein Kostenvergleich zwischen verschiedenen Technologiealternativen möglich sein, um die Wirtschaftlichkeit der Anlagen bewerten zu können. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Additive Fertigung neue Potenziale aufdeckt, die mit konventionellen Verfahren nicht realisierbar sind. So ermöglicht z.B. ein höherer



geometrischer Gestaltungsfreiraum die Zusammenführung mehrerer Produktkomponenten zu einem Bauteil, wodurch Montagekosten eingespart werden. Insbesondere für Anwendungsfälle, bei denen keine direkte Vergleichbarkeit verschiedener Technologievarianten gegeben ist, muss ein geeignetes Bewertungsmodell entwickelt werden.

Basierend auf den Umfrageergebnissen und den Expertenbefragungen wurden die Anforderungen zusammengefasst. Das Kosten-Nutzen-Modell soll vorwiegend für technisches Personal, Ingenieure oder Manager von produzierenden Unternehmen mit oder ohne Vorkenntnisse der Additiven Fertigung erstellt werden. Es soll umfassend, in sich konsistent, relevant und zuverlässig sein. Primär soll es in der Produktentwicklungsphase zum Einsatz kommen und als valide Entscheidungsbasis dienen. Eine weitere wichtige Anforderung an das Kostenmodell besteht darin, den Analyseaufwand möglichst gering zu halten und anwenderfreundlich zu gestalten.

## 2.2 Überblick über bestehende Modelle

Zur Umsetzung der Anforderungen wurden mithilfe einer umfassenden Literaturrecherche verschiedene Ansätze zur Modellentwicklung verglichen sowie bereits bestehende Kostenmodelle für die Additive Fertigung aus der Literatur identifiziert und analysiert.

### 2.2.1 Grundlagen der Lebenszykluskostenbetrachtung

Als Methode der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde das Life-Cycle-Costing (LCC engl. für „Lebenszykluskostenrechnung“) gewählt. LCC ist ein Modell des strategischen Kostenmanagements. Mithilfe von LCC können Einsparpotenziale entlang des gesamten Produktlebenszyklus kalkuliert werden. Entlang des Produktlebenszyklus sind entstehende Kosten und Benefits zu berücksichtigen. Die Erkenntnisse: Es wurden Kernprobleme identifiziert.

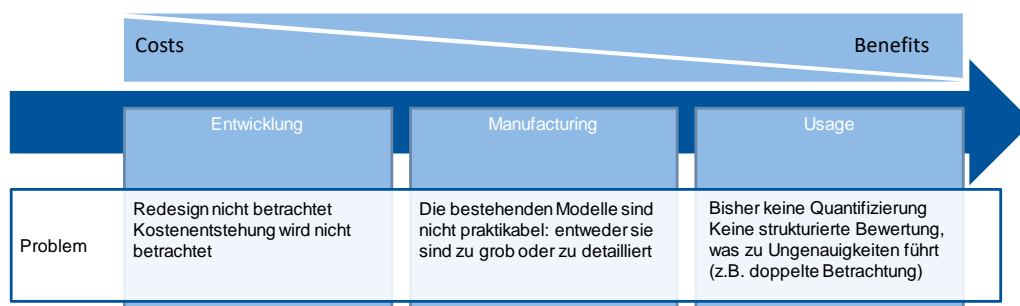


Abbildung 2.3: Identifikation der Kernprobleme mittels LCC

Die Norm DIN 60300-3-3 bietet einen Anwendungsleitfaden zur Analyse der Lebenszykluskosten, der hier für die Entwicklung des Kostenmodells zugrunde gelegt wurde (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2014). Es werden sechs Hauptphasen des Produktlebenszyklus definiert: *Konzept & Definition, Entwurf & Entwicklung, Herstellung, Installation, Betrieb & Instandhaltung und Entsorgung*.

Eine Kostenbetrachtung kann grundsätzlich aus Produkt- oder Maschinensicht erfolgen. In einem ersten Schritt wurden deshalb die beiden Sichtweisen in Bezug zur vorliegenden Problemstellung verglichen.

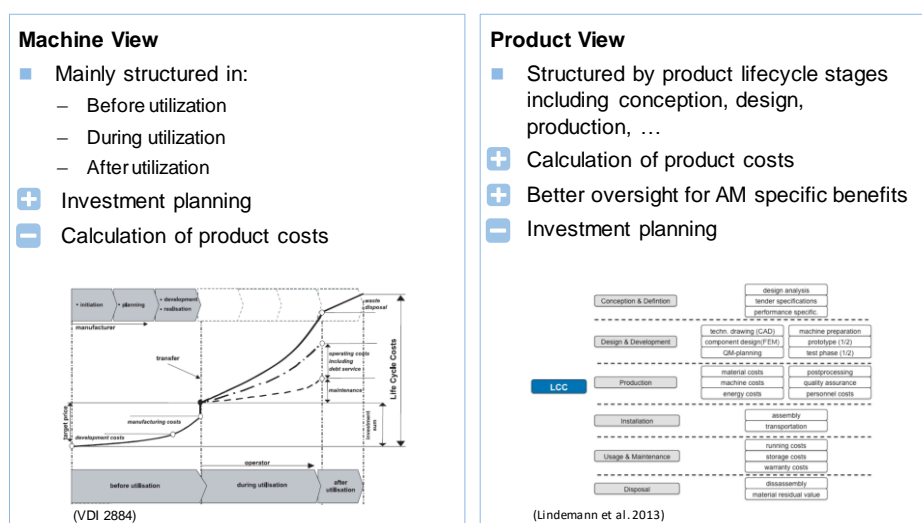


Abbildung 2.4: LCC — Produkt- vs. Maschinensicht (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2005; LINDEMANN ET AL. 2013)

Im Rahmen dieses Projekts wurde im weiteren Verlauf unter Lebenszykluskostenbetrachtung die produktbezogene Sicht zugrunde gelegt. Nur mit dieser lassen sich insbesondere Vorteile in der Nutzung des Produkts darstellen. Die dabei grundsätzlich zu berücksichtigenden Phasen umfassen die Konzeption und Definition des Bauteils, Design und Entwicklung, die eigentliche Produktion sowie die Installation, Nutzung, Wartung und schließlich Verwertung. Dies bildet den Rahmen für weitere Betrachtungen und kann insbesondere der Einordnung von Benefits dienen.

## 2.2.2 Bestehende Kostenmodelle für die Additive Fertigung

In der folgenden Darstellung wird ein Überblick über bereits bestehende Kostenbetrachtungen für die Additive Fertigung gegeben. In Anlehnung an DIN 60300-3-3 wurden dabei die Modelle in die verschiedenen Produktlebenszyklusphasen eingeordnet. Die Kreisdiagramme geben den qualitativen Detaillierungsgrad der Studien an. Somit konnten Forschungslücken zur vollumfassenden Kostenbetrachtung der Additiven Fertigungstechnologie aufgedeckt werden.

LCC Phase	Concept-ion & Definition	Design & Development		Production						Installation	Usage & Maintenance			Disposal	
		Design activities / Redesign	Industrial engineering	Rapid Prototyping / Test Phase	Initial setup of production network	Build preparation	Manufacturing	Postprocessing	Internal / external logistics		Quality Assurance	Running costs	Warranty costs		Maintenance / Rapid Repair
Required Considerations															
Cost type		1X	1X		1X	↔	↔	↔	↔	↔		↔	↔	↔	
Hopkinson and Dickens (2005)							●								
Ruffo et al. (2005)							●								
Ruffo et al. (2006)					●	●	●								
Lindemann et al. (2012)					●	●	●								
Schmidt (2015)		●				●						●			
Baumers et al. (2016)					●	●									
Baumers and Holweg (2016)						●	●								
Sum		●			●	●	●					●			

Abbildung 2.5: Überblick über bestehende Kostenbetrachtungen

Die relevantesten Kostenmodelle für die Additive Fertigung wurden entwickelt von HOPKINSON U. DICKENS (2005), RUFFO ET AL. (2006), LINDEMANN ET AL. (2012) und LINDEMANN ET AL. (2013). Weitere Kostenbetrachtungen, welche im Folgenden nicht genauer erläutert werden, sind die Modelle von Ruffo et al. (2005), SCHMIDT (2015), BAUMERS ET AL. (2015) und M. BAUMERS (2016).

Bisherige Kostenmodelle konzentrieren sich vor allem auf die Produktionskosten einzelner Additiver Fertigungstechnologien. In der Regel werden nur einzelne Aspekte des Lebenszyklus beleuchtet. Insbesondere die Produktion wurde bereits intensiv betrachtet.

Das Kostenmodell nach HOPKINSON U. DICKENS (2005) ist eines der ersten wirtschaftlichen Betrachtungen, um zu erörtern, ob die „Rapid Prototyping“-Technologie in der Direktfertigung eingesetzt werden kann. Innerhalb dieser Analyse wird die Kostenstruktur der Additiven Fertigung mit dem Spritzgussverfahren verglichen. Hierbei umfassen die Additiven Fertigungsverfahren die Stereolithographie, das „Fused Deposition Modeling“ und das Lasersintern. Basierend auf den Kosten pro Bauteil, aufgeteilt in Maschinen-, Lohn- und Materialkosten, wurde in unterschiedlichen Chargengrößen festgestellt, dass Additive Fertigungsverfahren der geeigneteren Ansatz zur Bauteilfertigung sein können. Als vorteilhaft gegenüber dem Spritzguss werden sowohl die werkzeuglose Fertigung als auch die Fertigung komplexer Geometrien angesehen. Bei der Betrachtung des Kostenmodells nach Hopkinson und Dickens (2005) fällt auf, dass keine Berücksichtigung des Materials stattfindet und die Ermittlung der Kosten des Spritzgusses, welche dem Vergleich zu den additiven Verfahren dienen, unklar ist. (vgl. HOPKINSON U. DICKENS 2005, S. 31–39)

Betrachtet werden:

- Direkte Maschinenkosten
- Indirekte Maschinenkosten
- Maschinenbetriebskosten
- Materialkosten
- Werkzeugkosten
- Produktionsdetails

RUFFO ET AL. (2006) evaluieren und erweitern das Kostenmodell von HOPKINSON U. DICKENS (2005). Dabei wird das Lasersintern mit dem Spritzguss verglichen. Bei dieser Kostenbetrachtung wurden einige der oben genannten Kritikpunkte aufgenommen und beseitigt. Die Kosten eines Aufbauprozesses wurden in direkte und indirekte Kosten unterteilt, wobei die direkten Kosten größtenteils aus den Materialkosten bestehen und die indirekten Kosten die Lohn-, Maschinen- und Gemeinkosten umfassen. Geändert wurde hierbei, dass die Lohnkosten in diesem Modell als indirekte Kosten angesehen werden, das Post-Processing jedoch nicht in die Betrachtung einbezogen wird. Weiterhin wird im Gegensatz zum Modell von Hopkinson und Dickens (2005) nicht von einer konstanten Kostenfunktion ausgegangen, sondern eine Kostenfunktion angenommen, die einem Sägezahnmuster ähnelt. Durch dieses Sägezahnmuster entsteht ein erheblich größerer Kostenanteil, insbesondere bei kleinen Losgrößen (vgl. COSTABILE ET AL. 2017, S. 269–270).

Es werden zusätzlich u.a. folgende Aspekte hinzugezogen:

- Realistische Maschinenauslastung
- Realistische Materialverwertungsquote
- Packungsdichte

LINDEMANN ET AL. (2012) betrachten den gesamten Produktionsprozess der Additiven Fertigung, anstatt nur die Maschinenkosten zu kalkulieren. Hierbei werden für die Kostenabschätzung vier relevante Prozesse definiert: Fertigungsvorbereitung, Fertigungsprozess, Reinigen des Bauteils, Nachbearbeitung und Verbessern der Bauteileigenschaften. Damit wird auch das Post-Processing als kostenrelevanter Prozess betrachtet, worunter die Qualitätskontrolle, die Oberflächennachbehandlung und das Entfernen der Hilfsstruktur aus dem Bauprozess fallen. (vgl. COSTABILE ET AL. 2017, S. 272)

Sie nutzen eine zeitgetriebene, aktivitätsbasierte Kostenkalkulation zur Modellierung des Produktionsprozesses.

Es werden u.a. folgende Aspekte zusätzlich betrachtet:

- Bauvorbereitungskosten
- Nachbearbeitungskosten
- Kosteneinfluss der Zeit

LINDEMANN ET AL. (2013) gehen weiter und betonen die Notwendigkeit eines Lebenszykluskostenmodells, das den gesamten Lebenszyklus von der Konzeption und Definition bis hin zur Entsorgung betrachtet. Dabei wird die Additive Fertigung auf lange Sicht als echte Produktionsalternative zur konventionellen Fertigung betrachtet, weshalb die Kosten anhand einer Lebenszykluskostenanalyse ermittelt werden. Bei dieser Vorgehensweise wird die Kostenverursachung sowohl auf der Produktions- als auch auf der Verbraucherseite gesehen. Dabei werden die Produktionskosten nach den bereits erläuterten Kostenmodellen von HOPKINSON U. DICKENS (2005) und RUFFO ET AL. (2006) ermittelt. In Abbildung 2.6 sind die relevanten Phasen für dieses Lebenszyklusmodell zu erkennen:

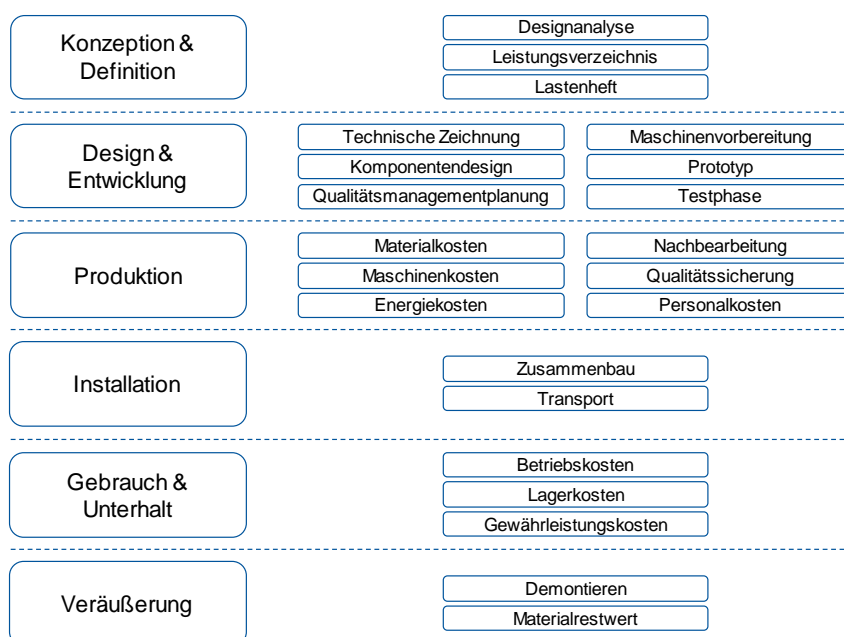
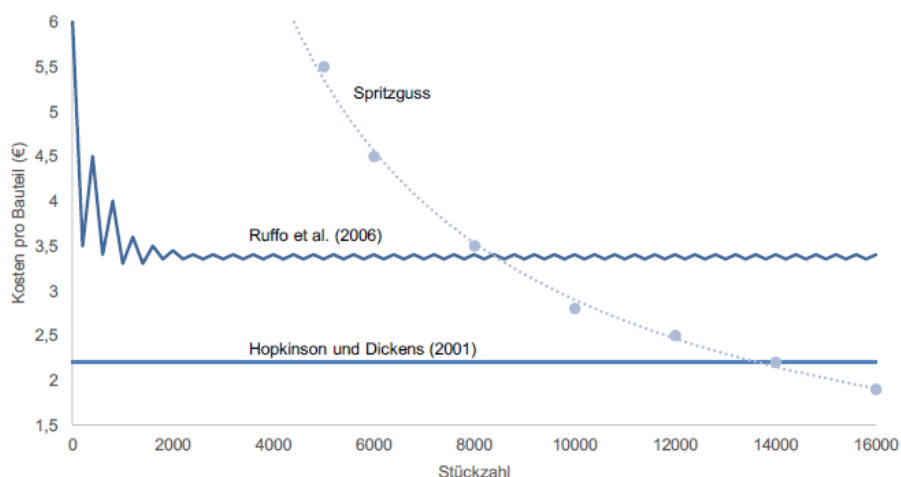


Abbildung 2.6: Relevante Phasen des Lebenszyklusmodells

Die Hauptkostentreiber sind die Designphase, der Gebrauch und Unterhalt sowie die Produktion. Somit sind dies auch die Phasen, in denen eine Kostenoptimierung den größten Effekt auf die Gesamtkosteneffizienz hat.

In Abbildung 2.7 werden die Kostenmodelle von RUFFO ET AL. (2006) und HOPKINSON U. DICKENS (2001) in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen für ein Beispielbauteil verglichen. Als Relation ist die Kurve für die Herstellung mittels Spritzguss-Verfahren angegeben.



**Abbildung 2.7: Vergleich der Kostenmodelle von Ruffo et. al. sowie Hopkinson und Dickens (i. A. a.RUFFO ET AL. 2006, S. 1424)**

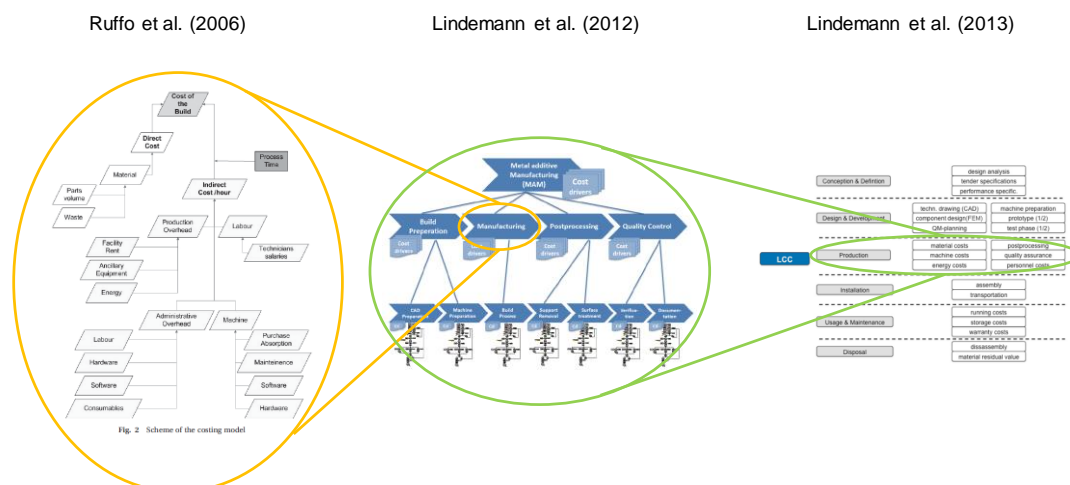
Im Kostenmodell von HOPKINSON U. DICKENS (2001) wird von einer über das Produktionsvolumen konstanten Kostenfunktion ausgegangen. Diese Annahme wird dadurch begründet, dass die indirekten Kosten gleichmäßig auf alle Bauteile verteilt werden. Im Gegensatz hierzu werden beispielsweise beim Spritzgussverfahren die anfänglich hohen Werkzeugkosten über die Produktion einer hohen Stückzahl an Bauteilen amortisiert (HOPKINSON U. DICKENS 2001, S. 198). RUFFO ET AL. (2006) argumentieren jedoch, dass für kleine Produktionsvolumina keine konstante Kostenfunktion angenommen werden kann, da auch bei der Additiven Fertigung hohe Investitionskosten amortisiert werden müssen, welche sich hauptsächlich aus den Anschaffungskosten der Maschine zusammensetzen. Weiterhin sind in diesem Kostenmodell die für hohe Produktionsvolumina nahezu konstant zulaufenden Kosten höher als bei HOPKINSON U. DICKENS (2005). Diese höheren Kosten entstehen durch die Berücksichtigung eines realistischen Maschinennutzungsgrades von 60 % und einer Material-Recycling-Rate von lediglich 50 %. Der signifikanteste Unterschied dieses Kostenmodells ist das „Sägezahnmuster“ der Kostenfunktion, welches durch eine ineffiziente Nutzung des Bauraums für gewisse Losgrößen bedingt ist (RUFFO ET AL. 2006, S. 1420–1422). Darüber hinausgehend untersuchen RUFFO ET AL. in einer weiterführenden Studie den Kosteneffekt einer „parallelen Produktion“, bei der verschiedene Bauteile in einer Maschine simultan hergestellt werden. Innerhalb dieser Studie wurde ein Kostenmodell zur Berechnung der Kostenreduktion bei effektiver Bauraumfüllung entwickelt (s. RUFFO und HAGUE 2007, S. 1590).

Im Gegensatz zu den beschriebenen Kostenmodellen von HOPKINSON und DICKENS sowie RUFFO ET AL., welche lediglich die Quantifizierung der Herstellkosten betrachten, wollen LINDEMANN ET AL. ein vollumfängliches Modell entwickeln, mit dem eine

Abschätzung der Lebenszykluskosten eines Produktes möglich ist. Hierfür wurde zunächst mittels des „Time-Driven Activity-Based Costings“ (TD ABC) ein Modell für den Produktionsprozess entwickelt, welches eine verursachungsgerechte Verteilung der Kosten der Produktionsprozesse auf die Bauteile erlaubt. Weiterhin können zusätzlich zu den Herstellkosten auch die Pre- und Post-Prozesse der Produktion herangezogen werden. Auch die Analyse des Effekts verschiedener Einflussfaktoren wie beispielsweise Baurate, Materialkosten oder Investitionskosten auf die Verteilung der Prozesskostensätze wird ermöglicht. (s. LINDEMANN et al. 2012, S. 188)

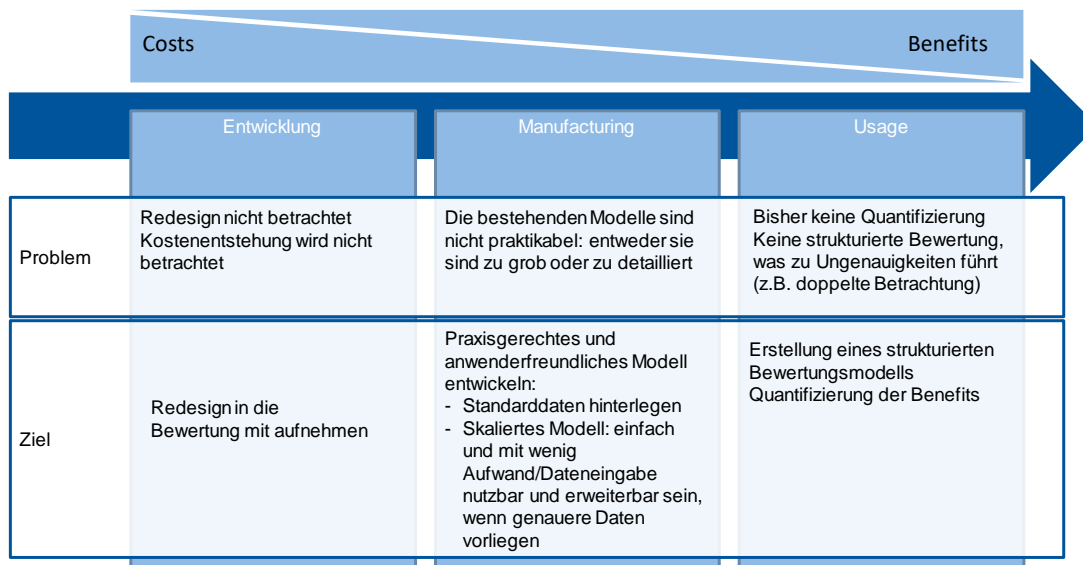
Das erläuterte Kostenmodell von LINDEMANN ET AL. ist jedoch lediglich ein alternatives Modell zur Berechnung der Produktionskosten einer generativen Fertigung, bei dem zunächst keine Einbeziehung weiterer Lebenszyklusphasen möglich ist. Es existieren bereits zahlreiche Ansätze zur Kalkulation der Herstellkosten der generativen Fertigung, jedoch sind vollumfängliche Kostenbetrachtungen derzeit noch unvollständig. Für eine weitergehende Analyse der Wirtschaftlichkeit einer generativen Fertigung müssen Kostenmodelle entwickelt werden, die eine Bewertung des monetären Einflusses des Fertigungsverfahrens auf den Produktlebenszyklus bzw. die gesamte Supply Chain zulassen.

Insgesamt zeigt sich, dass sich der Betrachtungsraum mit der Zeit ausgeweitet hat. LINDEMANN ET AL. (2013) haben im Sinne der Lebenszykluskostenbetrachtung das bisher umfangreichste Kostenmodell entwickelt. Folgende Abbildung gibt einen qualitativen Überblick über die Entwicklung der Kostenmodelle:



**Abbildung 2.8: Überblick über die relevanten AM-Kostenmodelle (RUFFO ET AL. 2006; LINDEMANN ET AL. 2012; 2013)**

Durch Abgleich der identifizierten Probleme und der ermittelten Anforderungen an das Bewertungsmodell wurden die Ziele identifiziert.



**Abbildung 2.9: Zielidentifikation durch Abgleich von Problemen und Anforderungen**

Aufgezeigt wurde die Notwendigkeit eines Bewertungsmodells, das über die reine Kostenanalyse hinausgeht. In Form eines Nutzenmodells sollten Potenziale der Additiven Fertigung zu quantifizieren sein. Zunächst wurden mithilfe einer Literaturrecherche die Vorteile der Additiven Fertigung gesammelt.



### 3 Entwicklung des Bewertungssystems für die Additive Fertigung

Auf Basis der identifizierten Anforderungen wurde ein praxistaugliches Bewertungssystem für die Additive Fertigung entwickelt, welches aus einem Kosten- und einem Nutzenmodell besteht.

#### 3.1 Ein praxistaugliches Kostenmodell für die Additive Fertigung

Für das **Kostenmodell** wurden in einer umfassenden Literaturrecherche relevante Parameter und deren Zusammenhänge identifiziert. Vorliegend wurden aus Produktperspektive Berechnungen durchgeführt und Zusammenhänge ermittelt, um einerseits die Produktpreisgestaltung und andererseits eine Betrachtung der produktspezifischen Kostenvorteile während der Produktlebenszeit zu ermöglichen.

In Anlehnung an DIN 60300-3-3 wurden die identifizierten Kosten in die Produktlebenszyklusphasen *Konzept & Definition*, *Entwurf & Entwicklung*, *Herstellung*, *Installation*, *Betrieb & Instandhaltung* sowie *Entsorgung* eingeteilt. Durch eine Aggregation verschiedener Ansätze aus der Literatur wurden diese Kostenkategorien so weit wie möglich ausdetailliert. Somit wurde eine erste Grundstruktur zur Programmierung des Kostenmodells geschaffen. Vorliegend wurden insbesondere Kosten ins Auge gefasst, die in den Phasen *Herstellung* und *Betrieb & Instandhaltung* entstehen.

	Entwicklung	Manufacturing	Usage
Problem	Redesign nicht betrachtet Kostenentstehung wird nicht betrachtet	Die bestehenden Modelle sind nicht praktikabel: entweder sie sind zu grob oder zu detailliert	Bisher keine Quantifizierung Keine strukturierte Bewertung, was zu Ungenauigkeiten führt (z.B. doppelte Betrachtung)
Ziel	Redesign in die Bewertung mit aufnehmen	Praxisgerechtes und anwenderfreundliches Modell entwickeln: - Standarddaten hinterlegen - Skaliertes Modell: einfach und mit wenig Aufwand/Dateneingabe nutzbar und erweiterbar sein, wenn genauere Daten vorliegen	Erstellung eines strukturierten Bewertungsmodells Quantifizierung der Benefits
Lösung	Redesign kann in Theorie betrachtet werden, aber die Umsetzung in der Praxis ist noch nicht möglich	Standarddaten hinterlegt, einfache und anwenderfreundliche Umsetzung	Bewertungsmodell

Abbildung 3.1: Lösung zur Behebung der identifizierten Probleme

### 3.1.1 Erläuterung der Berechnungsgrundlage des Kostenmodells

Abbildung 3.2 zeigt die dem Kostenmodell zugrunde liegende entwickelte Datenstruktur. Betriebswerte wie beispielsweise Lohnkosten von Technikern und Ingenieuren, Arbeitszeiten, Energiekosten und die Maschinenauslastungsrate fließen in die Maschinendaten der Additiven Fertigung ein. Hinzu kommen hier u. a. Daten bezüglich der Technologie, der Investitionskosten und indirekte Materialkosten. Diese aggregierten Maschinendaten der Additiven Fertigung werden mit Teiledaten und Werten zum Rohmaterial zusammengeführt. Teiledaten umfassen unter anderen das Teilevolumen und die Teile-ID. Unter Rohmaterialdaten werden u. a. Material-ID, Kosten pro Kilogramm sowie die Pulverrecyclingrate betrachtet. Der Job fasst Teile-, Material- und Maschinendaten zusammen und ergänzt sie um weitere Daten wie Losgröße oder Schichtdicke. Der Manufacturing Prozess (SLM) nimmt die Job-Daten auf und ergänzt sie um Prozessdaten. Prozessdaten sind hier beispielsweise die Maschinenvorbereitungszeit, die in einzelne Faktoren aufgeteilte Bauzeit und die Maschinennachbereitungszeit. Ergänzt werden weiterhin Daten zur Nachbearbeitung, welche gegliedert sind in verpflichtende und optionale Prozesse. Schließlich werden Benefits gelistet. Dazu zählen u. a. verbesserte Produktnutzungskosten, Produktionskosten und strategische Kosten sowie eine verkürzte Durchlaufzeit.

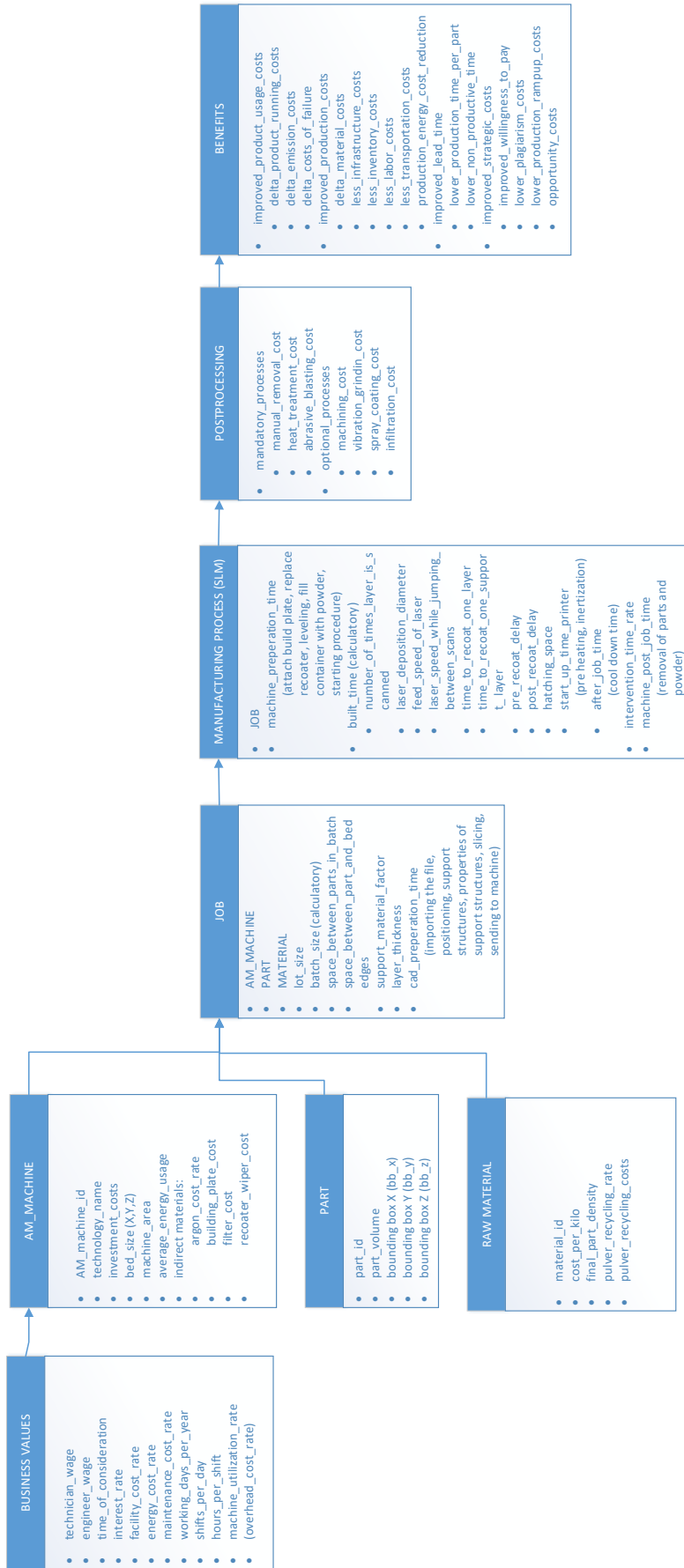
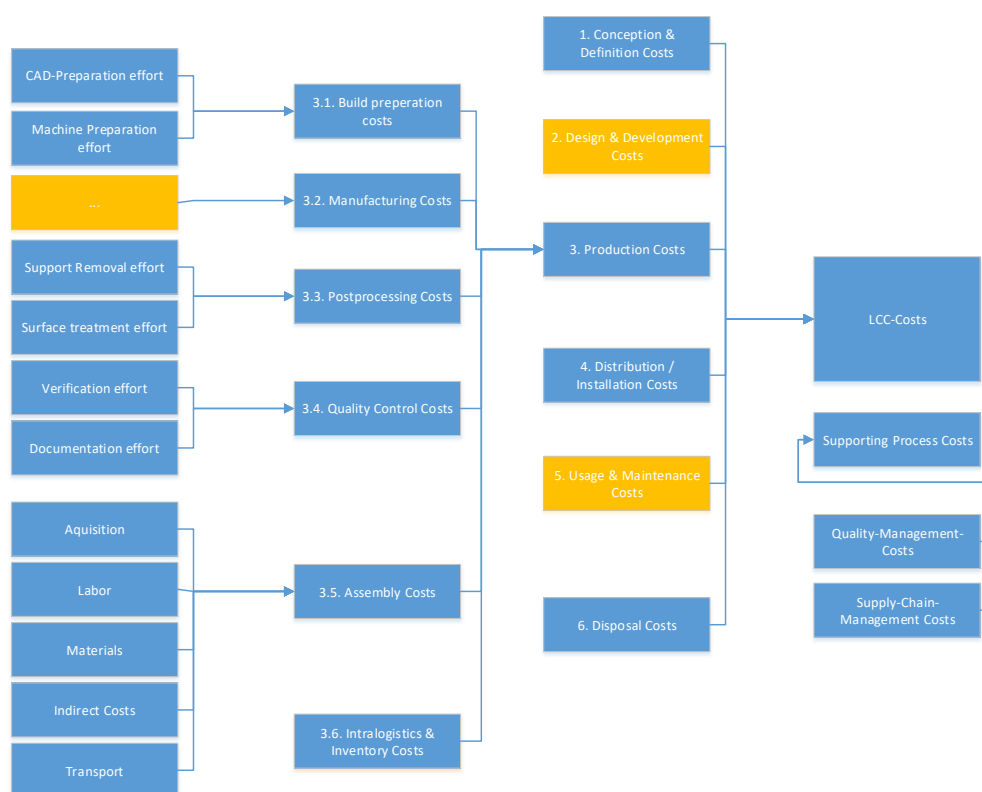


Abbildung 3.2: Datenstruktur

Diese Datenstruktur liefert die Basis des Kostenmodells. Für die Integration von spezifischen Kostenfunktionen in das Modell wurden vier einschlägige Ansätze als zentrale Berechnungsgrundlagen herangezogen:

- Kostenstruktur für SLM-Produktion nach SCHMIDT (vgl. SCHMIDT 2015, 145 ff.)
- Direkte Materialkosten nach GIBSON ET AL. (vgl. GIBSON ET AL. 2010, S. 388)
- Bauzeitabschätzung nach GIBSON ET AL. (vgl. GIBSON ET AL. 2010, 389 ff.)
- Maschinenstundensatz nach VDI 3258 Blatt 1 (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1962)



**Abbildung 3.3: Hauptübersicht Kostenmodell**

Zur Berechnung wurden zunächst die LCC betrachtet. Entsprechend der identifizierten Hauptphasen des Produktlebenszyklus wurden die Kosten aufgeschlüsselt und dargestellt. Der Fokus liegt dabei zunächst auf den Produktionskosten, welche sich aus Vorbereitungskosten, Herstellkosten, Qualitätskontrollkosten, Montagekosten sowie Intralogistik und Lagerkosten zusammensetzen und weiter aufgeschlüsselt werden können.

Begonnen wurde mit der Berechnung der Kosten für Design & Development, siehe Abbildung 3.4.

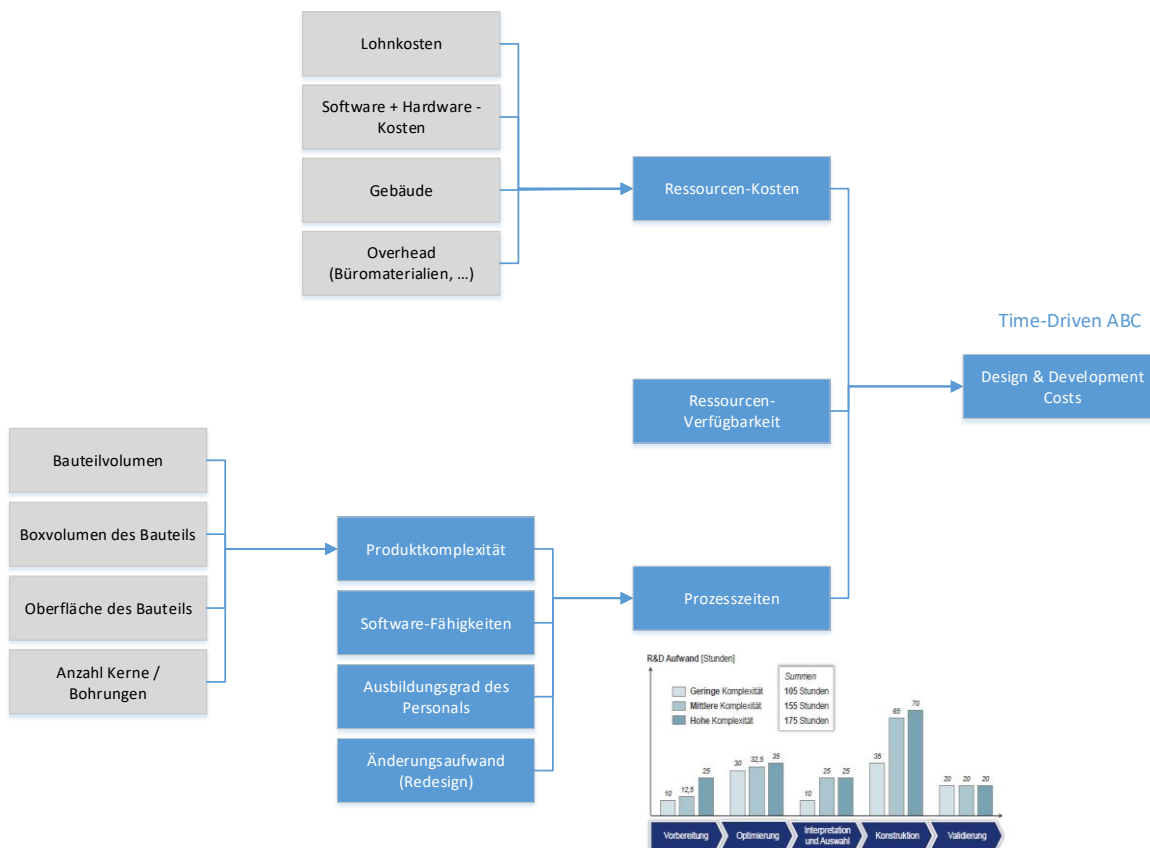


Abbildung 4.33: Durchschnittliche Einrichtungszeiten [eigene Darstellung]

**Abbildung 3.4: Design & Development**

Die Kosten werden durch drei Komponenten bestimmt: Ressourcenkosten, Ressourcenverfügbarkeit und Prozesszeiten. Die Herstellkosten stellen den Schwerpunkt der Berechnungen dar, siehe Abbildung 3.5.



Für die Herstellkosten des SLM-Verfahrens, welches im Rahmen des Projekts als Referenzverfahren herangezogen wurde, wurden die Kostenfunktionen ermittelt und in Zusammenhang gesetzt, siehe Abbildung 3.5. Die Berechnung basiert auf dem Ansatz von SCHMIDT (SCHMIDT 2015, S. 145 ff.).

Im Anschluss daran wurden die Kosten für Nutzung und Instandhaltung berechnet. Diese setzen sich gemäß VDI 2884 aus Faktoren von Hilfs- und Betriebsstoffen, Instandhaltungskosten / Ersatzteilen und Leistungs- und Qualitätsdaten zusammen (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2005).

Zuletzt fließen auch Entsorgungskosten ein, welche nach VDI 2884 von der Dekommissionierung und der Wiederherstellung des Materials bestimmt werden (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2005).

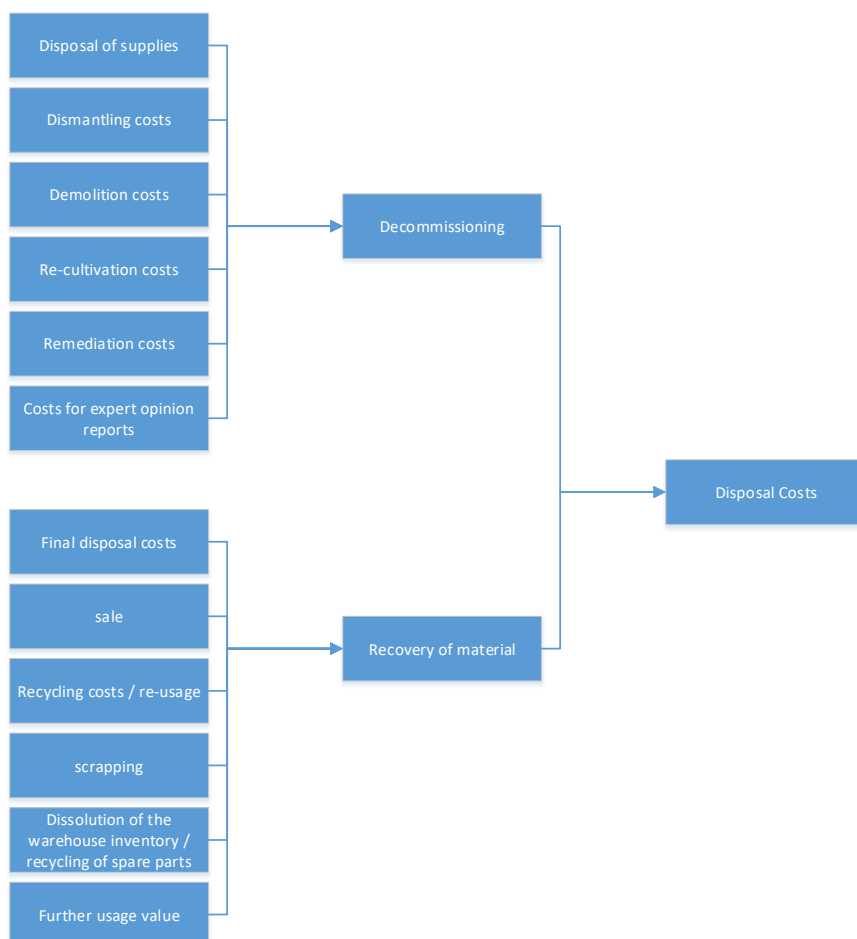


Abbildung 3.6: Entsorgungskosten

### 3.1.2 Aggregation der Berechnungsgrundlagen zu einem Kostenmodell

Durch Aggregation der verschiedenen Kalkulationsmethoden und der verfügbaren Daten wurde das Kostenmodell mit MS Excel erstellt. Dieses diente als Kostenmodell-Prototyp. Die Datei umfasst neun Blätter. Acht der Blätter realisieren die separate Berechnung oder Eingabemöglichkeit der verschiedenen Kosten. Ein weiteres Blatt dient der Zusammenfassung der Kosten, wie in folgender Abbildung dargestellt. Hier können die Lebenszykluskosten von der Additiven Fertigung mit den konventionellen Technologien verglichen werden.

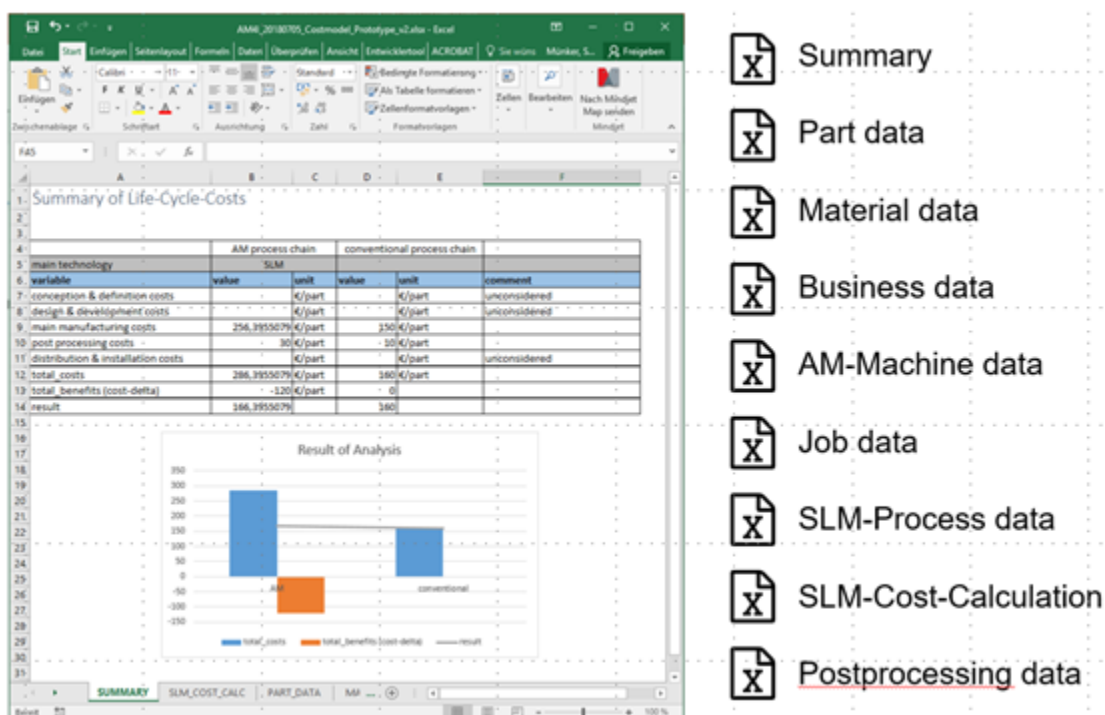


Abbildung 3.7: Kostenmodell Excel

Anforderungen an das Modell waren u. a. ein möglichst geringer Analyseaufwand sowie eine anwenderfreundliche Handhabung. Dem Anwender sollte es möglich sein, seinen spezifischen Problemfall auf das Kostenmodell zu projizieren. Zur ersten und einfachen Nutzung des Modells sollten weiterhin verschiedene realistische Werte als Datengrundstock im Modell hinterlegt sein. Hierzu wurden Best-Practice-Werte sowie Werte aus der Literatur herangezogen und im Kostenmodell-Prototypen bereitgestellt.

## 3.2 Ein praxistaugliches Nutzenmodell für die Additive Fertigung

Durch das **Nutzenmodell** sollen mögliche Potenziale aufgedeckt und diese samt ihrer Abhängigkeiten voneinander offengelegt werden. Zur Strukturierung der mittels einer



Literaturrecherche identifizierten Vorteile und Potentiale wurden diese zunächst unterschieden in Alleinstellungsmerkmale und resultierende Mehrwerte. Dazu wurden die Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung identifiziert, aus der alle bekannten Mehrwerte hervorgehen. Eine derartige Strukturierung bietet die Grundlage für eine Quantifizierung dieser Mehrwerte, sodass diese in der Gesamtbewertung Einfluss finden können.

Die vertikale Differenzierung basierte auf „Means-End-Chains“, sodass eine Unterteilung in fünf Kategorien erfolgte:

- „Unique property“
- „Methods / applications of unique properties“
- „Purposes of methods / applications“
- „Generic purposes“
- „Quantified value added / advantage“

Die Ergebnisse wurden zunächst mit MS Visio festgehalten, siehe Abbildung 3.8.



Abbildung 3.8: Ergebnisse Nutzenmodell

Weiterhin wurde eine Literaturmatrix erstellt, in der die einzelnen Benefits samt ihrer Abhängigkeiten erfasst sind. Sowohl die Potentiale selbst als auch die Abhängigkeiten zwischen diesen wurden gemessen an ihrer Erwähnung in der einschlägigen Literatur klassifiziert. Eine Unterscheidung liefern die Klassen „Mentioned Potential“, „Case Study“, „Empirical Study“, „Simulation“ und „Author’s Hypothesis“. In den Zeilen der Literaturmatrix sind alle identifizierten Benefits aufgeführt. Die Spalten listen die einzelnen Literaturnachweise auf. Abbildung 3.9 zeigt einen Ausschnitt der Matrix.

	Achillas et al.	Atzeni	Baldinger	Bauer et al.	Ben-Ner et al.	Bhandari und Suyogya	Busachi et al.	Campbell et al.	Chekurov et al.	Chu et al.	Denga et al.
1 Benefits											
2 unique property											
3 CAD2Product							N	N			
4 formless raw material					N		N	N			
5 geometric freedom								N			
6 material combinations								CS/N			
7 material properties											
8 Toolless manufacturing & small lot efficiency/ product changeability	N		N	N	N			N			
9 methods / applications of unique properties											
10 adding material to surfaces											
11 avoiding expensive conventional manufacturing steps											
12 continuous product development			N								
13 controlled porosity				N							
14 converting 3D-Scam to product											
15 creation of unique geometry forms								N			
16 customization of products								N			
17 decentralized manufacturing							N		N		
18 embedding systems											
19 fluidmechanical optimization											
20 local material differantiation								N			

Abbildung 3.9: Ausschnitt der Literaturmatrix bezüglich der Benefits

Auf Basis der gewonnenen Daten wurde das Nutzenmodell um die vertikalen und horizontalen Abhängigkeiten der einzelnen Benefits voneinander ergänzt und in einem Cytoscape-Projekt umgesetzt. Das Ergebnis ist ein Graphenmodell, das die vertikal in fünf Kategorien eingeteilten Benefits in Form von Knoten sowie die Abhängigkeiten in Form von Verbindungen zwischen diesen sowohl innerhalb einer Kategorie als auch kategorieübergreifend abbildet.

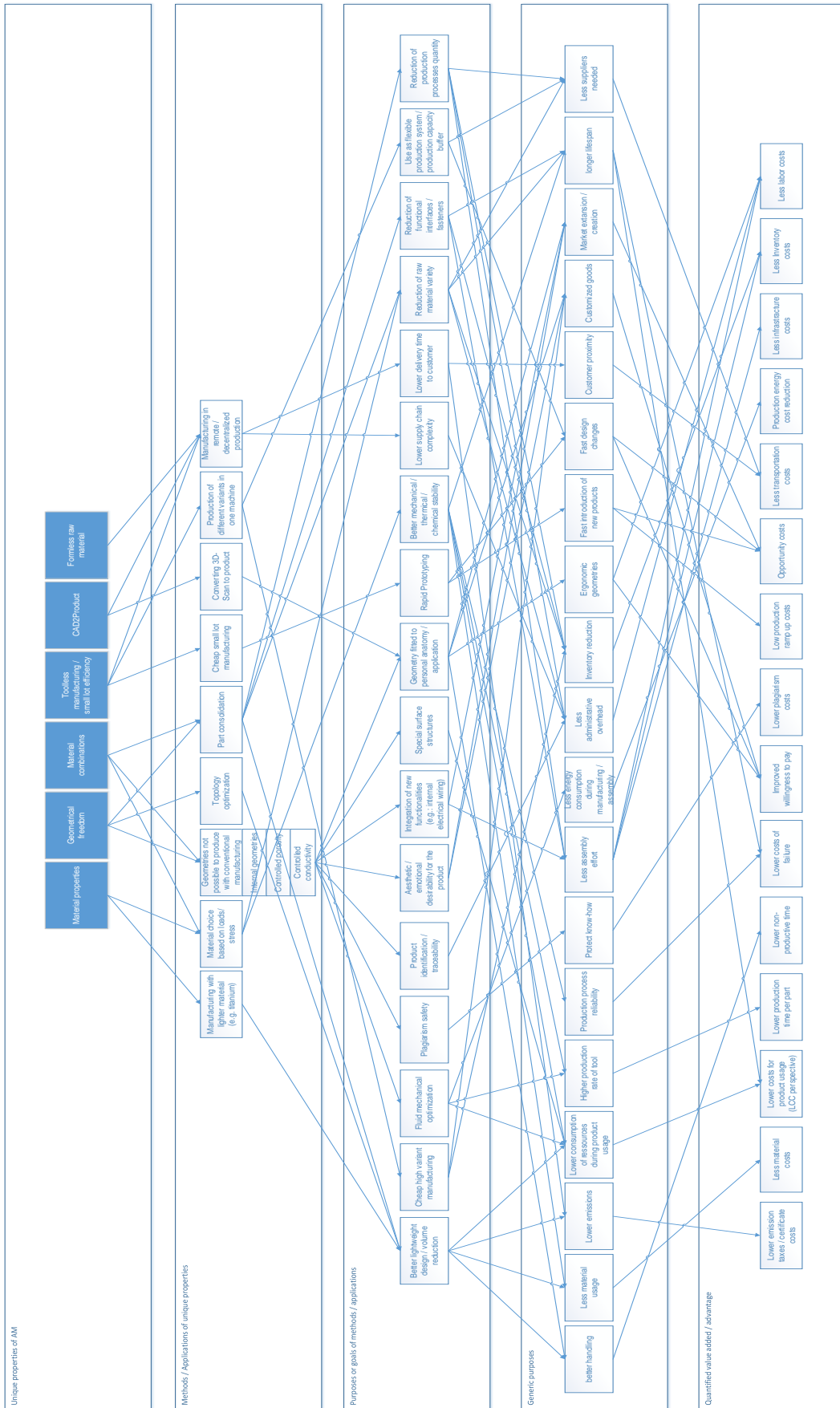


Abbildung 3.10: Graphenmodell

Das Graphenmodell ist interaktiv gestaltet. Hinter jedem Knoten ist eine Definition des Benefits inklusive der dazugehörigen Literaturquelle hinterlegt. Jede Verbindung stützt sich auf Literaturangaben. Mithilfe eines Klicks auf einen Knoten bzw. eine Verbindung werden die dazugehörigen Informationen abgebildet. Aus dieser Übersicht kann der Anwender die Zusammenhänge einzelner Benefits näher betrachten, indem er nur die Nachbarn eines Knoten anzeigen lässt. Durch diese Strukturierung werden sämtliche Potenziale durch den Anwender selbst aufgedeckt. Eine spätere Nutzwertanalyse wird so nicht nur vereinfacht, sondern es werden auch Inspirationen für zahlreiche Produkt- und Prozessverbesserungen geliefert. Dies ermöglicht den Unternehmen, die beschriebenen Erfolgsbeispiele zu verstehen und Maßnahmen für die eigene Produktion aus ihnen abzuleiten.

### 3.2.1 Wesentliche Vorteile der Additiven Fertigung

Die Bestandteile des Benefit-Modells sind die wesentlichen Vorteile der Additiven Fertigung, aufgeteilt in die Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung, die Methoden, die Zwecke, die Ziele und die Werte.

#### 3.2.1.1 Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung

Die Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung bestehen in den Materialeigenschaften, den geometrischen Freiheiten, den möglichen Materialkombinationen, der werkzeuglosen Fertigung, dem „CAD to product“ und dem formlosen Rohmaterial. In Tabelle 1 sind die einzelnen Alleinstellungsmerkmale beschrieben.

Tabelle 1: Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung

Material properties:	The main difference of AM to conventional materials regarding the material properties is, that AM technologies define the object's geometry and its material properties at the same time (THOMPSON ET AL. 2016, S. 738). Therefore, AM technology is capable of utilize a high variety of materials with different properties. While CNC for example works good for brittle materials like steels and other metal alloys, AM is not purposed to specific materials. Another difference to conventional material properties is, that final AM parts may have voids or anisotropy dependent on part orientation, process parameters or the product design (GIBSON ET AL. 2010, S. 10).
----------------------	--

Material combinations:	AM can be used to combine different sets of materials. For example in metal 3D-printing the technology can be used to create custom metallurgies (THOMPSON ET AL. 2016, S. 743). In technologies based on filament, laying it is possible to use different materials by feeding material via different nozzles. The local differentiation of materials with unique properties is an AM advantage, which cannot be attained with conventional technologies in one manufacturing step.
Geometrical freedom:	Through the layer-by-layer characteristics of AM it is possible to produce highly complex geometries (BAUMERS ET AL. 2012, S. 933). So product design can be nearly free from any geometrical restrictions (BAUER ET AL. 2016, S. 17). Compared to conventional manufacturing technologies the product designer has a high degree of freedom. He can easily create geometric forms like undercuts or internal features without a lot of effort for process planning (GIBSON ET AL. 2010, S. 11).
Toolless manufacturing & small lot efficiency	Traditional manufacturing technologies like casting, joining or machining are making use of forms, tools or fixtures. Using these manufacturing aids, it is recommended to produce in higher lot sizes for cost efficiency. Because AM doesn't need any tools for building a product the production of small lot sizes is getting more feasible (REEVES ET AL. 2011).
CAD2Product	For most conventional technologies the CAD product model has to be manipulated manually to prepare the production process (e.g. by using CAM-Software). For AM the product model can be used directly to manufacture the part. (BREUNINGER ET AL. 2013, S. 2)
Formless raw material	Raw material of AM is available in form of pulver, liquid or filament. The aggregation state of the raw material is in either way formless.

### 3.2.1.2 Methoden der Additiven Fertigung

Die Methoden der Additiven Fertigung sind in der Tabelle 2 beschrieben.

Tabelle 2: Methoden des Benefit-Modells

Methods	
Local material differentiation	Local differentiation of mechanical, thermal or chemical properties can be achieved through the combination of different materials or the setting of specific local properties with one material. The differentiation is possible on macro and micro scales. An example for micro scale material differentiation is the creation of custom alloys with powder-bed fusion technologies (THOMPSON ET AL. 2016, S. 743)

Utilization of different colors	The creation of local color differentiation can be achieved by adding color to the raw material, by using different color feedstock or by inducing different colors in a single feedstock via in-process activation of pigments (KERMER ET AL. 1998; POPAT U. EDWARDS 2000).
Adding material to surfaces	Some AM technologies (e.g. direct energy deposition or material extrusion technologies) are suitable to add material on 3D surfaces. This can be used for example to repair damaged, worn-out or corroded parts (DUTTA U. FROES 2015, S. 456).
Utilization of better material	In case a weak material has been used before, AM can facilitate the utilization of a strong material like titanium. The usage of titanium with AM is more cost efficient than with conventional technologies, because only the needed amount of material gets consumed and difficult machining processes are avoided (BAUER ET AL. 2016, S. 21).
Reduction of material variety	Producing with AM the same material can be used to produce different parts of one assembly or different products in general. This can lead to an overall reduction of raw material variety in a company (BEN-NER U. SIEMSEN 2017, S. 9).
Fluidmechanical optimization	Parts like pipes, valves or restrictors can be optimized for their fluidmechanical properties. For example the exchange of thermal energy, gas distribution or critical strength can be optimized by using freeform geometries (GAUSEMEIER ET AL. 2014, S. 12)
Micro structures	AM also allows the designer to influence the micro- and meso-structures of a part. Typical application is the creation of lattices or mesh structures. (THOMPSON ET AL. 2016, S. 744)
Controlled porosity	Size, type, orientation and boundary conditions of periodic cells on a micro-scale influence the porosity of an AM produced part (THOMPSON ET AL. 2016, S. 744).
Creation of unique geometry forms	Artists, artisans and industrial designers often adopt AM to create unique, intriguing and appealing geometries (THOMPSON ET AL. 2016, S. 741).
Part consolidation	The consolidation of parts is understood as the redesign of an assembly with fewer, but therefore often more complex parts (KNOFIUS ET AL. 2018, S. 1).
Customization of products	AM products can easily be customized to personal needs. Customization can have a functional purpose (e.g. in the medical sector) or can add personal value to single customers by creating unique products. (DOUBROVSKI ET AL. 2011, S. 3)

Topology optimization	Topology optimization usually uses finite element methods to generate an optimal material distribution to reduce weight for given mechanical properties. Because AM can easily produce highly complex geometries an optimized topology can be produced without many manufacturing restrictions. (BRACKETT ET AL. 2011, S. 348)
Reduction of overall production/assembly steps	Because a variety of products or multiple parts of an assembly can be produced in a single AM machine, the number of steps in a production chain typically gets reduced (HEUTGER 2016, S. 4).
Simultaneous production of variants	With AM it is possible to produce a variety of products in a single 3D printer (HEUTGER 2016, S. 4)
Embedding systems	Through the layer-by-layer characteristic of AM technologies it is possible to integrate sensors/actors, electronic wiring or connectors during the production process (GAUSEMEIER ET AL. 2014, S. 12).
Converting 3D-Scan to product	AM does not need product specific machine settings neither product specific tools. Therefore, it is possible to “directly” use 3D data for manufacturing obtained by 3D scanners. (GEBHARDT 2012, S. 104)
Avoiding expensive conventional manufacturing steps	Using AM some expensive conventional manufacturing can be avoided. For example the CNC milling of titanium alloy aerospace parts is considered as slow, expensive and produces a lot of metal scrap. By producing these parts additively this disadvantages will be reduced. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 193)
Reduction of suppliers	The total number of suppliers decreases when producing with AM. For example it is possible to order big bags of granulate/filament from a limited number of suppliers instead of sourcing a large variety of materials and parts from different suppliers. (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 686)
On-demand production / digital warehouse	With AM it is possible to let the production happen on demand and at the point of consumption. This is possible because products and tools do not need to be stored physically but can be stored in digital warehouses. (MOHR U. KHAN 2015, S. 22)
Decentralized manufacturing	In order to reduce transportation time and increase the service level there is a tendency to decentralize production sites. Decentralized manufacturing gets facilitated by many characteristics of AM. (HEUTGER 2016, S. 4)
Continuous product development	Additively produced products can be developed iteratively without any further investments in tools, machines or other physical components. Therefore it is possible to cost efficiently improve products continuously. (BALDINGER 2015)



### 3.2.1.3 Zwecke der Additiven Fertigung

Die Zwecke der Additiven Fertigung sind in Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3: Zwecke der Additiven Fertigung

Purposes	
Material resource efficiency	Theoretically, only the material quantity needed to form the geometry layer-by-layer is used. Because AM is consuming less material than subtractive manufacturing methods it has a higher material resource efficiency. (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 687)
Less product interfaces	Through consolidating multiple parts of an assembly, the number of interfaces between these parts get reduced. Product interfaces are often considered as major weak points of a product. (GRUND 2015, S. 234)
Flexible geometrical structures	Flexible structures like inflatable (deployable) parts can be realized by enclosed lattices (MAHESHWARAA NAMASIVAYAM U. CONNER SEEPERSAD 2011).
Product identification	Specific identification measures like imprinted serial numbers or QR-Codes can be printed in order to identify similar-looking products or protect manufacturers and customers against counterfeit (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 692).
Less fasteners	If components get consolidated or a product is designed to fulfill multiple functions by complex geometries, a lot of simpler components like fasteners are getting obsolete (CAMPBELL U. BERNABEI 2017, S. 73).
Lightweight design	Lightweight design is considered as the reduction of a components weight without decreasing the functional specification of the product (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 186).
Optimization of functional performance	With AM products can be designed for functional optimization without compromising restrictions given by the manufacturing process (CAMPBELL U. BERNABEI 2017, S. 77).
Plagiarism safety	The integration of embedded systems (e.g. RFID-Chips, barcodes or surface structures) can be used for plagiarism safety purposes (SCHMIDT 2015, S. 131).
Create insulations	Multifunctional structures can be created to build acoustic or thermal insulation (GAUSEMEIER ET AL. 2014, S. 10).
Create unique connectors	By printing embedded interfaces for assemblies it is possible to create unique connectors which differ a lot from standardized fasteners, e.g. biomedical implants (GAUSEMEIER ET AL. 2014, S. 10)
Integration of new functionalities	By using multifunctional structured components it is possible to enhance and upgrade the functionality of a part (GAUSEMEIER ET AL. 2014, S. 10).

Better demand forecasting accuracy	With a replenishment of raw material by only a few raw material suppliers, the planning activities decrease and the forecasting accuracy of material demand increases (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 685).
Aesthetic product creation	Through the high geometrical freedom the product designers can explore aesthetic forms to improve emotional values (CAMPBELL ET AL. 2013, S. 7).
Better handling and transportability	Better handling and transportability can be achieved for raw material, assemblies or finished products (BEN-NER U. SIEMSEN 2017, S. 10).
Enabling fast design changes	In case of a design change there is no production of new tools needed. Therefore the design changes of a product can be realized a lot faster (HOPKINSON U. DICKENS 2005, S. 32).
Production capacity buffer	Even if an additive manufacturing machine is purchased for other purposes, it can be utilized to react as a capacity buffer for other production systems. So AM can help in case of unexpected surges in demand. (KHAJAVI ET AL. 2014, S. 58)
Lead time reduction	Lead time can be reduced (e.g. compared to injection molding), because no tools need to be produced previously. This can lead to a faster time to market. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 181)
Less equipment wearout	Conventional technologies to produce parts with strong materials like titanium suffer a high equipment wear out. Because AM doesn't use subtractive procedures, the equipment wear out gets reduced. (GRUND 2015, S. 234)
Reduction of downstream painting	Some AM technologies can print parts directly in different colors. This possibly eliminates downstream painting operations. (THOMPSON ET AL. 2016, S. 741)
Product volume flexibility	Different products can be produced without changing the machine setup. Thus the production rates can be modified quickly to match changing demands. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 182)
Product mix flexibility	Because no tooling is needed, the product mix can be changed on short notice. Thus AM usage can result in a high product volume flexibility. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 182)
Reduction of administrative overhead	Administrative overhead like documentation, inspection, production planning, etc. can be reduced by consolidating parts (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 182)
Economies of scale	AM allows scaling the production capacity more closely to the market demands (BEN-NER U. SIEMSEN 2017, S. 9)
Enable rapid repair and remanufacturing	Customer gain profit from shorter downtimes if missing spare parts can be remanufactured any time (BAUER ET AL. 2016, S. 18)

### 3.2.1.4 Ziele der Additiven Fertigung

Die Ziele der Additiven Fertigung sind in Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4: Ziele der Additiven Fertigung

Goals	
Less energy consumption of product in use	Energy consumption of the product, where the AM produced part gets deployed, can get reduced if product improvements got achieved (e.g. by lightweight design). (YANG ET AL. 2017, S. 838)
Protection of know-how	By imprinting hidden characteristics AM can be used to protect manufacturers and customers against counterfeit (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 692)
Longer lifespan of products	Longer lifespans can achieved by consolidating parts, because less functional interfaces result in less failure possibilities (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2017, S. 234)
Sustainability	Usage of AM can result in many sustainability benefits. For example through a higher raw material efficiency, reduction of energy or production closer to the customer. (SREENIVASAN ET AL. 2010, S. 82)
Long term conservation of spare parts	Any part can be replicated at any time, if the digital model is available. Therefore a long term conservation of spare parts is possible without the need of physical space. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 182)
Enhance intrinsic customer value	Intrinsic customer values refer to emotional customer relationships. The intrinsic value can be increased by offering customized products. (SPALLEK U. KRAUSE 2017, S. 74)
Enhance extrinsic customer value	Extrinsic customer values refer to customized functionalities, which enhances the usability for individual customers (SPALLEK U. KRAUSE 2017, S. 74).
Reduction of energy during production	Production energy can be reduced e.g. by avoiding energy intensive manufacturing steps like casting, or CNC machining (SREENIVASAN ET AL. 2010, S. 82)
Fast time/reaction to market	Mainly because there is no need for tooling and designs can be adjusted quickly, fast reaction on market activities can be achieved with AM (SCHMIDT 2015, S. 33)
Improved overall manufacturing / assembly performance	Assembly performance can be improved by reducing the amount of parts to be assembled (ATZENI U. SALMI 2012). Also the connectors can be designed freely and can be shaped ergonomically

Better serve customer segments	AM enables companies to serve small customer segments cost efficiently, because individual parts can be produced with no enhancement of production effort (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 677)
Fast and reliable delivery service	In case of long transport distances a distributed production system based on AM can reduced delivery times and thus improve the delivery service level (HEUTGER 2016, S. 4)
Reduction out-of-stock risk	Out-of-stock risk describes the risk, which a customer cannot be served with the product. It can be reduced by storing parts digitally. (SIRICHAKWAL U. CONNER 2016, 57ff.)
Inventory reduction	Many aspects, especially the digital workflow of AM and the absence of tools, lead to an reduction of inventory and needed shop floor area (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 182)
Trade barrier bypassing	High customs and trade barriers can be avoided by sending products digitally and producing them decentral (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 686)

### 3.2.1.5 Werte der Additiven Fertigung

Die Werte der Additiven Fertigung sind in Tabelle 5 beschrieben.

Tabelle 5: Werte der Additiven Fertigung

Values	
Less operating costs for product in use	The usage of beneficial additive manufactured parts saves costs – either for the customer or the company
Higher revenues	The company gets higher revenues while utilizing additive manufacturing. Major reasons are for example better delivery reliability, lower lead time, higher flexibility and a high variety of the product portfolio (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 692).
Less labor costs	Create reduction of labor costs can be achieved, for example if parts get consolidated and assembly gets eliminated (M. ZANARDINI ET AL. 2015, S. 5).
Less material costs	Material costs can be saved when less material gets used or material gets recycled in a high rate
Lower emission costs	Emissions like CO2 emission can be priced and so the cost savings for emission reduction can be evaluated
Less manufacturing / assembly costs	By reducing the number of production steps, the overall manufacturing/assembly costs can be reduced (CAMPBELL ET AL. 2013, S. 9)

Less transportation costs	Transportation costs can be reduced by lightweight design or by sending the products digitally and printing them locally (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 690).
Less inventory costs	Inventory costs can be saved by producing on demand and because no tool storages are needed (GIFFI ET AL. 2014, S. 4)
Less infrastructure costs	Less production steps lead to less material handling equipment and other infrastructural components, which saves investment and running costs
Less equipment maintenance/repair costs	Maintenance and repair costs can be saved. E.g. if no tools are needed, there are no tools which need to be maintained etc. (WOHLERS ASSOCIATES INC. 2017, S. 181)
Less scrapping/disposal costs	Scrapping and disposal costs get reduced, e.g. while printing on demand, because there is no storage of products being phased-out (FELDMANN U. PUMPE 2017, S. 686)
Less cost of risks	“Total cost of risk is the sum of all aspects of an organization's operations that relate to risk, including retained (uninsured) losses and related loss adjustment expenses, risk control costs, transfer costs, and administrative costs.” <a href="https://www.irmi.com/term/insurance-definitions/cost-of-risk">https://www.irmi.com/term/insurance-definitions/cost-of-risk</a>
Lower production ramp up costs	Production ramp up (introducing a new product) gets reduced in time and costs, e.g. because no tools are needed (HOLMSTRÖM ET AL. 2010, S. 692).

### 3.2.2 Anwendung des Benefit-Modells

In Abbildung 3.11 ist die vertikale Differenzierung des Benefit-Modells zu sehen, die sich in fünf Kategorien gliedert. Hierbei bestehen die Alleinstellungsmerkmale der Additiven Fertigung in den Materialeigenschaften, den geometrischen Freiheiten, den möglichen Materialkombinationen, der werkzeuglosen Fertigung, dem „CAD to product“ und dem formlosen Rohmaterial. Ausgehend von diesen spezifischen Eigenschaften oder bereits bekannter Vorteile bietet das Modell dem Anwender die Möglichkeit, strukturiert an der Identifikation und Kombination von Vorteilen zu arbeiten, um in der Gesamtheit aus potenziellen Anwendungsfällen im Rahmen der Kosten-Nutzenbewertung wirtschaftliche Anwendungsfälle zu bestimmen. Das Vorgehen hierzu wird im Folgenden beschrieben.

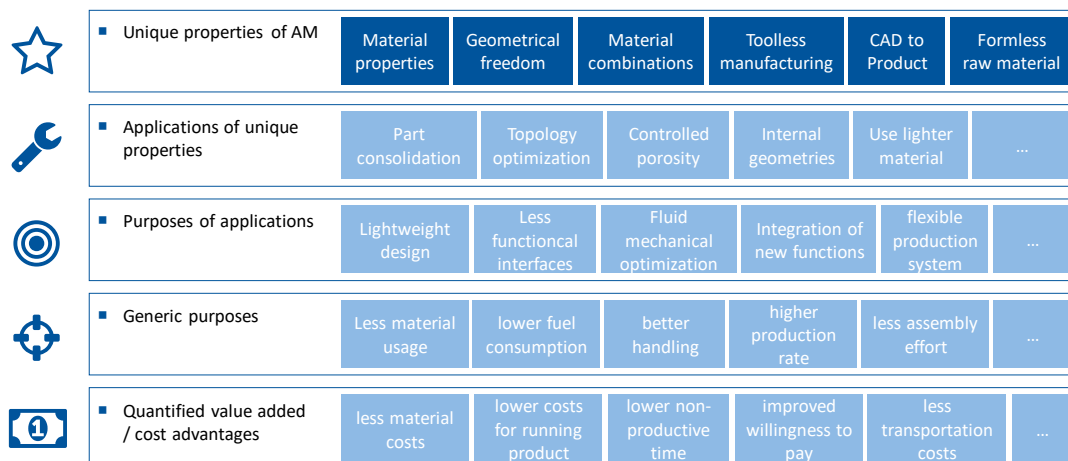


Abbildung 3.11: Vertikale Differenzierung des Benefit-Modells

In Abbildung 3.12 ist zu sehen, wie sich die Ursachen und möglichen direkten Konsequenzen innerhalb des Benefit-Modells ergeben. Startet man mit der Betrachtung bei einem spezifischen Benefit, wie beispielsweise der Optimierung der Strömungsmechanik, so ergeben sich daraus mögliche direkte Konsequenzen auf den Ebenen der generischen Zwecke und der Kostenvorteile wie z. B. eine höhere Produktionsrate und daraus folgend eine geringere Stückbearbeitungszeit. Weiterhin werden die Ursachen des betrachteten Knotens auf den übergeordneten Ebenen angezeigt, welche in diesem Fall den internen Geometrien in der Kategorie der Anwendung der Alleinstellungsmerkmale sowie den geometrischen Freiheiten als das ursächliche Alleinstellungsmerkmal entsprechen.

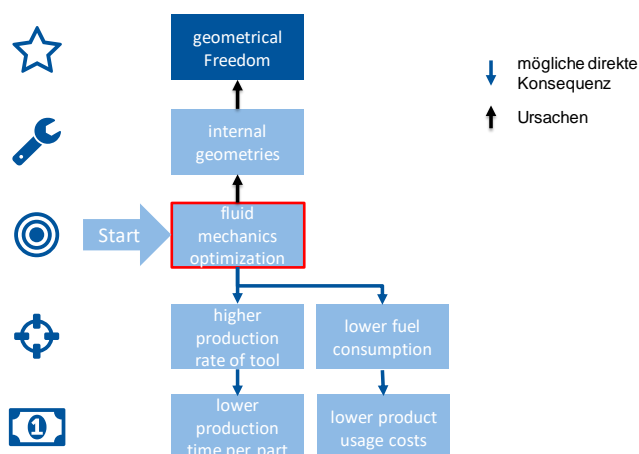


Abbildung 3.12: Benefit-Modell — Ursachen und direkte Konsequenzen

Durch die Strukturierung des Benefit-Modells ist es weiterhin möglich, die Nachbarn eines beliebigen weiteren Knotens anzeigen zu lassen, wie in Abbildung 3.13 dargestellt. Hier sind neben den möglichen direkten Konsequenzen einer Optimierung der Strömungsmechanik zudem auch die mit der übergeordneten internen Geometrie

verbundenen Knoten dargestellt. Dadurch kann zusätzlich analysiert werden, welche möglichen Konsequenzen sich ergeben können, sollte der der Strömungsmechanik übergeordnete Knoten verändert werden. Eine Umgestaltung dessen würde sich nicht nur auf den betrachteten (Start-)Knoten auswirken, sondern könnte auch weitere positive Effekte mit sich bringen. So könnte eine Optimierung der internen Geometrien neben den Konsequenzen für die Strömungsmechanik zusätzlich ohne großen Mehraufwand zu einer Verbesserung der Plagiatssicherheit führen, welche sich wiederum vorteilhaft auf den Schutz des Know-Hows auswirkt und dadurch zu geringeren Plagiatskosten führt.

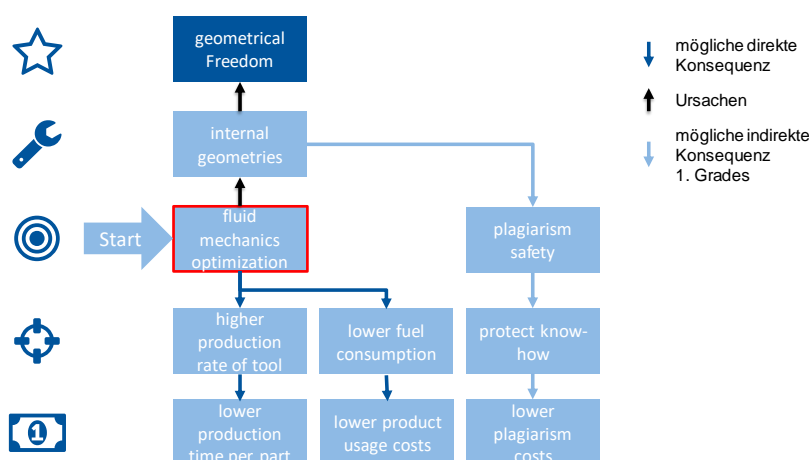


Abbildung 3.13: Benefit-Modell — Ursachen und mögliche indirekte Konsequenzen 1. Grades

Ähnlich dem im vorherigen Absatz beschriebenen Vorgehen sind die möglichen Konsequenzen der Umgestaltung des nächsten übergeordneten Knotens in Abbildung 3.14 abgebildet. Durch eine Veränderung der geometrischen Freiheiten könnten zusätzlich zur daraus folgenden Optimierung interner Geometrien und damit der Strömungsmechanik positive Effekte in den Bereichen der Topologieoptimierung und Teilekonsolidierung erzielt werden. Diese haben wiederum Auswirkungen auf die darunter folgenden Ebenen der Anwendungszwecke, der generischen Zwecke und der Kostenvorteile.

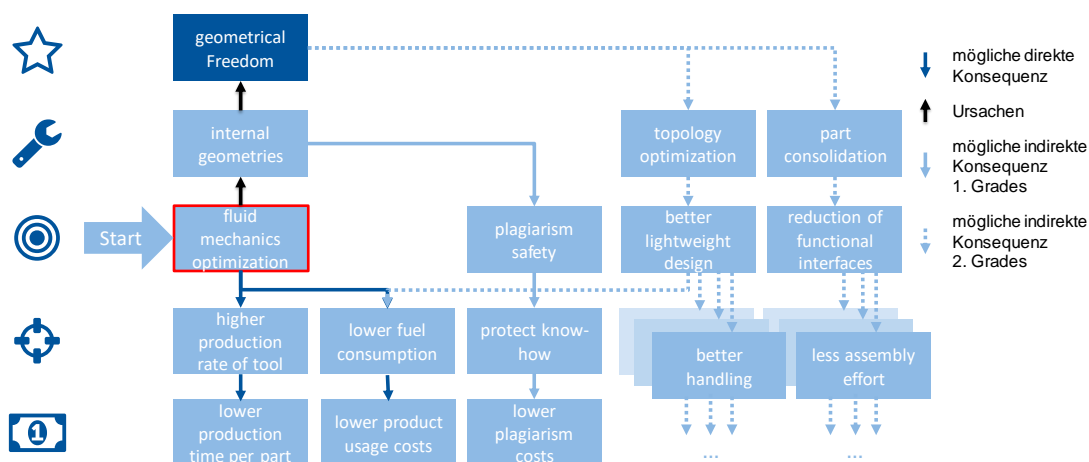


Abbildung 3.14: Benefit-Modell — Ursachen und mögliche indirekte Konsequenzen 2. Grades

Somit ist ein wesentlicher Erfolg des Benefit-Modells, dass dieses eine Übersicht über die Merkmale der Additiven Fertigung und die Zusammenhänge dieser ermöglicht. Hierdurch können die Auswirkungen der Optimierung eines Merkmals auf die damit verbundenen Merkmale abgeschätzt werden, wodurch große Potentiale für Produkt- und Prozessverbesserungen aufgedeckt werden können.

### 3.3 Ein webbasiertes, integriertes Cost-Benefit-Tool

Ergebnis ist ein Kostenmodell-Prototyp, der eine einfache generische Anwendung zulässt und eine Kostenberechnung mit nur wenigen Parametern erlaubt. Auf dieser Basis wurde das Kostenmodell in ein Dashboard in der Programmiersprache Python transformiert. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Strukturierung des Kosten-Nutzen-Modells.



## AM4Industry Cost-Benefit Model



Abbildung 3.15: Cost-Benefit-Modell

Der Anwender kann auf diesem Dashboard zwischen verschiedenen Tabs navigieren. Es stehen eine Übersichtsseite sowie je eine Seite zur Eingabe von Produkt-, Maschinen-, Material-, Job-, Business und Postprocessing-Daten zur Verfügung. Eine letzte Seite beinhaltet die Benefits, welche für den Teil des Nutzenmodells relevant ist.



Auf der Ansichtsseite (**Overview**) werden die auf Basis der eingegebenen Parameter berechneten Daten übersichtlich zusammengefasst. Auch hier sind die Kosten in Kostenkategorien gegliedert.

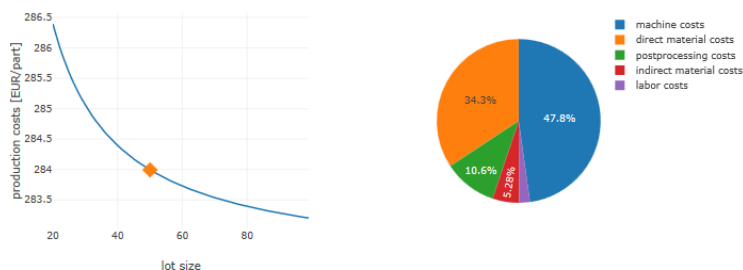
Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

manipulate data

Selected lot sizes: "[20, 50, 100]"

sensitivity analysis

production costs pie



cost-benefit comparison

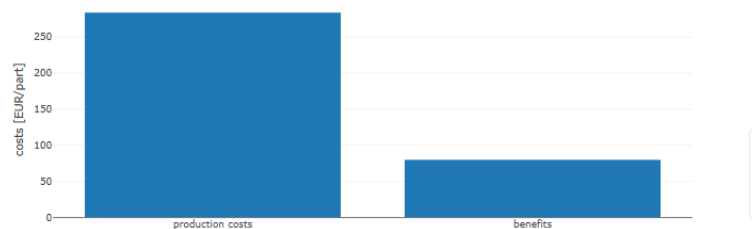


Abbildung 3.16: Cost-Benefit-Modell — Overview

Mithilfe eines Reglers kann der Bereich der betrachteten Losgröße eingestellt werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt die Produktionskosten in Abhängigkeit von der Losgröße. Das Kuchendiagramm stellt die prozentuale Zusammensetzung der Produktionskosten dar. Diese teilen sich auf in Maschinenkosten, direkte und indirekte Materialkosten, Postprocessing-Kosten sowie Arbeitskosten. Alle Berechnungen basieren auf den bereits erläuterten Strukturen und Berechnungsgrundlagen. Die Gegenüberstellung von Kosten und möglichen Einsparungen durch Nutzung der identifizierten Vorteile analog der zuvor erläuterten Vorgehensweise ermöglicht dem Anwender die Bewertung der Eingaben. Im Folgenden werden die einzelnen Eingabeseiten des Modells erläutert.

Unter **Product** werden produktspezifische Informationen eingegeben.

Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

## Product information input

Part Volume

Bounding box X of part [mm]

Bounding box Y of part [mm]

Bounding box Z of part [mm]

alpha (exponential value to approximate average cross sectional area)

support base layer rate [%]

intervention time rate [%]

**Abbildung 3.17: Cost-Benefit-Modell – Product**

Unter **Machine** können Maschineninformationen, Parameter zum SLM-Processing und indirekte Materialkosten eingegeben werden. Zur aufwandsarmen Erstanwendung sind bezüglich der Maschineninformationen bereits die aus der Literatur identifizierten Beispieldaten hinterlegt. Diese können vom Anwender angepasst werden. Außerdem können neue Reihen hinzugefügt werden.

Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

## Machine information input

Machines working life [years]

All information is subject to change.

manufacturer	machine	price	estimate	unit	bedsize_x	bedsize_y	bedsize_z	unit.1	average_energy_consumption	unit.2	average_workspace_area	unit.3
<input type="checkbox"/>	Example	Example	100000	EUR	400	400	400	mm	16	kW	39	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	Mlab cusing	150000	EUR	90	90	90	mm	1	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	TruPrint 1000	150000	EUR	100	100	100	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	Mlab cusing R	165000	EUR	90	90	90	mm	1	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	SLM 125	175000	EUR	125	125	125	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	SLM Solutions	Mlab cusing 200R	175000	EUR	100	100	100	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	M1 cusing	320000	EUR	250	250	250	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	TruLaser Cell 3000	360000	EUR	800	600	400	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	EOSINT M 280	370000	EUR	250	250	325	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	EOS	TruPrint 3000	385000	EUR	300	300	400	mm	5	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	SLM Solutions	SLM 280	400000	EUR	280	280	365	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	M2 cusing	430000	EUR	250	250	280	mm	2	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	EOS M 290	430000	EUR	250	250	325	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	EOS	TruLaser Robot	450000	EUR	2000	700	1000	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	EOS M2 cusing	Multilaser	540000	EUR	250	250	280	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	EOS	TruLaser Cell 7020	625000	EUR	2000	1500	750	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	TruLaser Cell 7040	665000	EUR	4000	2000	750	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	SLM 500 Twin	890000	EUR	500	280	365	mm	8	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	M LINE Factory	1058000	EUR	400	400	425	mm	10	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Concept Laser	EOS M 400	1113000	EUR	400	400	400	mm	10	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	Trumpf	EOS M 400-4	1265000	EUR	400	400	400	mm	4	kW	40	m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	SLM Solutions	X LINE 2000R	1405000	EUR	800	400	500	mm	10	kW	40	m <sup>2</sup>

ADD ROW

## SLM processing parameters

machine preparation time executed by technician [h]

machine post job time executed by technician [h]

number of times a layer is scanned [-]

laser deposition diameter [mm]

hatching space [%]

feed speed of laser [mm/s]

laser speed while jumping between scans [mm/s]

time to recoat one layer [s]

time to recoat one support layer [s]

pre-recoat delay [s]

post-recoat delay [s]

startup time of printer [h]

after job time of printer [h]

## indirect material costs

Inertgas cost rate [€/h]

Building plate costs [€/job]

Filter costs [€/job]

Recoater wiper costs [€/job]

Abbildung 3.18: Cost-Benefit-Modell — Machine

Unter **Material** sind Angaben bezüglich der verwendeten Materialien aufgeführt. Auch hier sind bereits Beispieldaten hinterlegt. Der Anwender kann diese bearbeiten oder in

einer neuen Reihe ein neues Material hinzufügen. Zur Berechnung wählt der Anwender das jeweilige Material aus.

Overview	Product	Machine	<b>Material</b>	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	-----------------	-----	----------	-----------------	----------

## Material data

pulver recycling rate [% of total pulver volume]:

pulver recycling cost [% of raw material cost]:

All information is subject to change.

	material	cost	unit	final_density	unit.1
<input type="radio"/>	steel	99	EUR/kg	7.87	g/cm <sup>3</sup>
<input type="radio"/>	nickel	94	EUR/kg	8.26	g/cm <sup>3</sup>
<input checked="" type="radio"/>	titanium	321	EUR/kg	4.42	g/cm <sup>3</sup>
<input type="radio"/>	cobalt	99	EUR/kg	8.47	g/cm <sup>3</sup>
<input type="radio"/>	aluminium	68	EUR/kg	2.67	g/cm <sup>3</sup>
<input type="radio"/>	copper	99	EUR/kg	8.78	g/cm <sup>3</sup>

ADD ROW

Abbildung 3.19: Cost-Benefit-Modell — Material

Unter **Job** werden die auftragspezifischen Informationen ergänzt.

Overview	Product	Machine	Material	<b>Job</b>	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	------------	----------	-----------------	----------

## Job input data

space between parts in batch [mm]:

space between parts and bed edges [mm]:

support material factor [%]:

layer thickness [mm]:

CAD preparation time:

Abbildung 3.20: Cost-Benefit-Modell – Job

Unter **Business** werden die unternehmensspezifischen Informationen eingegeben.

Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

## Business values input data

technicians wage [€/h]:

engineer wage [€/h]:

time of consideration [years]:

interest rate [%]:

facility cost rate [€/m<sup>2</sup> \* month]:

energy cost rate [€/kWh]:

maintenance cost rate [% of capital commitment]:

working days per year [d/a]:

shifts per day [shift/d]:

hours per shift [h/shift]:

machine utilization rate [%]:

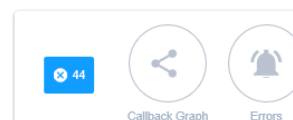


Abbildung 3.21: Cost-Benefit-Modell — Business Values Input Data

Unter **Postprocessing Data** werden die Kosten für mögliche Nachbearbeitungsschritte gelistet. Auch hier können die Beispieldaten bearbeitet oder neue Daten hinzugefügt werden. Das Feld „description“ ermöglicht es, Kommentare zu jedem Verfahren hinzuzufügen. Hier kann z. B. aufgeführt werden, ob das Nachbearbeitungsverfahren optional oder verpflichtend ist. Für die Berechnung wählt der Anwender die Nachbearbeitungsschritte aus, die durchgeführt werden sollen. Nachbearbeitungskosten beziehen sich hier jeweils auf ein Teil.

Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

## Postprocessing data

Select the needed postprocessing steps. The cost per part can be edited and additional rows can be added.

	postprocessing cost	unit	description
<input checked="" type="checkbox"/>	manual removal	10 EUR/part	mandatory for SLM (includes: cleaning the part, removing from baseplate, removal of support structures)
<input checked="" type="checkbox"/>	heat treatment	10 EUR/part	mandatory for SLM
<input checked="" type="checkbox"/>	abrasive blasting	10 EUR/part	mandatory for SLM
<input type="checkbox"/>	machining	10 EUR/part	optional (includes: milling, drilling, grinding)
<input type="checkbox"/>	vibration grinding	10 EUR/part	optional
<input type="checkbox"/>	spray coating	10 EUR/part	optional
<input type="checkbox"/>	infiltration	10 EUR/part	optional

ADD ROW

Postprocessing costs [€/part]

30

Abbildung 3.22: Cost-Benefit-Modell — Postprocessing Data

Nach der Auswahl der Modelle in Cytoscape findet der Anwender die relevanten Nutzendimensionen in der webbasierten Bewertung und kann diese einzeln quantifizieren, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen (Abbildung 3.23).

Overview	Product	Machine	Material	Job	Business	Post-processing	Benefits
----------	---------	---------	----------	-----	----------	-----------------	----------

## Benefit model

### --- Integration in development



Select the benefits you want to consider. The cost per part can be edited and additional rows can be added.

	postprocessing	cost	unit	description
<input checked="" type="checkbox"/>	less operating costs of product	20	EUR/part	e.g. based on less fuel consumption
<input checked="" type="checkbox"/>	higher revenues	50	EUR/part	e.g. based on better willingness to pay
<input checked="" type="checkbox"/>	less labor costs	10	EUR/part	
<input type="checkbox"/>	less material costs	10	EUR/part	
<input type="checkbox"/>	less transportation costs	10	EUR/part	
<input type="checkbox"/>	less disposal costs	10	EUR/part	

ADD ROW

Benefit costs [€/part]

80

Abbildung 3.23: Benefit-Modell

## 4 Literaturverzeichnis

- ATZENI, E.; SALMI, A.: Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 62 (2012) 9-12, S. 1147 – 1155.
- BALDINGER, M.: Ansätze zum Management der Additive Manufacturing Supply Chain. <http://www.rtejournal.de/ausgabe12/4235>.
- BAUER, D.; BORCHERS, K.; BURKERT, T.; CIRIC, D.; COOPER, F.; ENSTHALER, J.; GAUB, H.; GITTEL, H. J.; GRIMM, T.; HILLEBRECHT, M.; KLUGER, P. J.; KLÖDEN, B.; KOCHAN, D.; KOLB, T.; LÖBER, L.; LENZ, J.; MARQUARDT, E.; MUNSCH, M.; MÜLLER, A. K.; MÜLLER-LOHMEIER, K.; MÜLLER-TER JUNG, M.; SCHAEFLEIN, F.; SEIDEL, C.; SCHWANDT, H.; VAN DE VRIE, R.; WITT, G.; ZÄH, M.: Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren. 1. Auflage. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2016.
- BAUMERS, M.; HOLWEG, M.; ROWLEY, J.: The economics of 3D Printing: A total cost perspective 2015.
- BAUMERS, M.; TUCK, C.; WILDMAN, R.; ASHCROFT, I.; ROSAMOND, E.; HAGUE, R.: Combined Build-Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering. In: Proceedings of Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference 13 (2012) 1, S. 932 – 944.
- BEN-NER, A.; SIEMSEN, E.: Decentralization and Localization of Production. In: California Management Review 59 (2017) 2, S. 5 – 23.
- BRACKETT, D.; ASHCROFT, I.; HAGUE, R.: Topology Optimization for Additive Manufacturing. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium (2011) 1, S. 348 – 362.
- BREUNINGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Springer, Berlin, Heidelberg 2013.
- CAMPBELL, R. I.; BERNABEI, R.: Increasing product attachment through personalised design of additively manufactured products. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17) 21 (2017) 5, S. 71 – 79.
- CAMPBELL, R. I.; JEE, H.; KIM, Y. S. (Hrsg.): Adding product value through additive manufacturing. © The Design Society 2013.
- COSTABILE, G.; FERA, M.; FRUGGIERO, F.; LAMBIASE, A.; PHAM, D.: Cost models of additive manufacturing. A literature review. In: International Journal of Industrial Engineering Computations 8 (2017) 2, S. 263 – 283.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten DIN EN 60300-3-3, September 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): Additive Fertigung - Grundlagen DIN EN ISO/ASTM 52900, Juni 2017.

DOUBROVSKI, Z.; VERLINDEN, J. C.; GERAEDTS, J. M.P.: Optimal Design for Additive Manufacturing: Opportunities and Challenges. In: Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (2011) 1, S. 1 – 12.

DUTTA, B.; FROES, F. H.: The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. In: Titanium Powder Metallurgy. Hrsg.: M. Qian; F. H. Froes. Butterworth-Heinemann, Boston 2015, S. 447 – 468.

FELDMANN, C.; PUMPE, A.: A holistic decision framework for 3D printing investments in global supply chains. In: Transportation Research Procedia 25 (2017) 1, S. 677 – 694.

GAUSEMEIER, J.; ECHTERHOFF, N.; KOKOSCHKA, M.; WALL, M.: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Future Applications. Hrsg.: DMRC University of Paderborn, Paderborn 2014.

GEBHARDT, A.: Understanding additive manufacturing. Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Hanser Publishers, Munich, Cincinnati 2012.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. Springer, New York, Heidelberg, Dordrecht, London 2010.

GIFFI, C. A.; GANGULA, B.; ILLINDA, P.: 3D opportunity in the automotive industry. Additive manufacturing hits the road 2014.

GRUND, M.: Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren. Mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik. Springer Vieweg, Berlin 2015.

HEUTGER, M.: 3D Printing and the future of Supply Chains. A DHL perspective on the state of 3D printing and implications for logistics. Hrsg.: M. Heutger DHL Customer Solutions & Innovation 2016.

HOLMSTRÖM, J.; PARTANEN, J.; TUOMI, J.; WALTER, M.: Rapid manufacturing in the spare parts supply chain. In: Journal of Manufacturing Technology Management 21 (2010) 6, S. 687 – 697.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P.: Rapid prototyping for direct manufacture. In: Rapid Prototyping Journal 7 (2001) 4, S. 197 – 202.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P.: Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 217 (2005) 1, S. 31 – 39.

KERMER, C.; RASSE, M.; LAGOGIANNIS, G.; UNDT, G.; WAGNER, A.; MILLESI, W.: Colour stereolithography for planning complex maxillofacial tumour surgery. In: Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery 26 (1998) 6, S. 360 – 362.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J.: Additive manufacturing in the spare parts supply chain. In: Computers in Industry 65 (2014) 1, S. 50 – 63.



- KNOFIUS, N.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; ZIJM, W.H.M.: Consolidating spare parts for asset maintenance with additive manufacturing. In: International Journal of Production Economics 208 (2018) 1, S. 269 – 280.
- LINDEMANN, C.; JAHNKE, U.; MOI, M.; KOCH, R.: Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium (2012) 1, S. 177 – 188.
- LINDEMANN, C.; JAHNKE, U.; MOI, M.; KOCH, R.: Impact and Influence Factors of Additive Manufacturing on Product Lifecycle Costs. 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, TX 2013.
- M. BAUMERS, M. H.: Cost Impact Of the Risk of Build Failure in Laser Sintering. In: Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2016) 1, S. 1910 – 1921.
- M. ZANARDINI; A. BACCHETTI; M. ASHOUR POUR; S. ZANONI: Benefits and costs of additive manufacturing applications: an holistic evaluation guide 2015.  
[https://www.researchgate.net/publication/306100171\\_Benefits\\_and\\_Costs\\_of\\_Additive\\_Manufacturing\\_Applications\\_An\\_Evaluation\\_Guideline](https://www.researchgate.net/publication/306100171_Benefits_and_Costs_of_Additive_Manufacturing_Applications_An_Evaluation_Guideline).
- MAHESHWARAA NAMASIVAYAM, U.; CONNER SEEPERSAD, C.: Topology design and freeform fabrication of deployable structures with lattice skins. In: Rapid Prototyping Journal 17 (2011) 1, S. 5 – 16.
- MOHR, S.; KHAN, O.: 3D Printing and Its Disruptive Impacts on Supply Chains of the Future. In: Technology Innovation Management Review 5 (2015) 11, S. 20 – 25.
- POPAT, A. H.; EDWARDS, M. R.: Process for forming a colored three-dimensional article, USA 2000.
- REEVES, P.; TUCK, C.; HAGUE, R.: Additive Manufacturing for Mass Customization. In: Mass Customization. Engineering and Managing Global Operations. Hrsg.: F. S. Fogliatto; G. J. C. da Silveira. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer-Verlag London, London 2011, S. 275 – 289.
- RUFFO, M.; TUCK, C.; HAGUE, R.: Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 220 (2006) 9, S. 1417 – 1427.
- SCHMIDT, T.: Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile, Technischen Universität Hamburg-Harburg Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) und LZN Laser Zentrum Nord GmbH, Dissertation 2015.
- SIRICHAKWAL, I.; CONNER, B.: Implications of Additive Manufacturing for Spare Parts Inventory. In: 3D Printing and Additive Manufacturing 3 (2016) 1, S. 56 – 63.
- SPALLEK, J.; KRAUSE, D.: Entwicklung individualisierter Produkte durch den Einsatz Additiver Fertigung. In: Additive Manufacturing Quantifiziert. Hrsg.: R. Lachmayer; R. B. Lippert. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2017, S. 69 – 83.

- SREENIVASAN, R.; GOEL, A.; BOURELL, D. L.: Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. In: Physics Procedia 5 (2010) 1, S. 81 – 90.
- THOMPSON, M. K.; MORONI, G.; VANEKER, T.; FADEL, G.; CAMPBELL, R. I.; GIBSON, I.; BERNARD, A.; SCHULZ, J.; GRAF, P.; AHUJA, B.; MARTINA, F.: Design for Additive Manufacturing. Trends, opportunities, considerations, and constraints. In: CIRP Annals 65 (2016) 2, S. 737 – 760.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen VDI 3258 Blatt 1, Oktober 1962.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC) VDI 2884, Dezember 2005.
- WOHLERS ASSOCIATES INC.: Wohlers report 2017. 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado 2017.
- YANG, S.; TALEKAR, T.; SULTHAN, M. A.; ZHAO, Y. F.: A Generic Sustainability Assessment Model towards Consolidated Parts Fabricated by Additive Manufacturing Process. In: Procedia manufacturing 10 (2017) 1, S. 831 – 844.