

Philipp Neumann

Erstellung eines Kostenmodells für die additive Fertigung

Methodik, Leitfaden, Umsetzung

© 2022 Philipp Neumann

ISBN: 978-3-347-78289-1

Druck und Distribution im Auftrag des Autors:
tredition GmbH, An der Strusbek 10, 22926 Ahrensburg, Germany

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Für die Inhalte ist der Autor verantwortlich. Jede Verwertung ist ohne seine Zustimmung unzulässig. Die Publikation und Verbreitung erfolgen im Auftrag des Autors, zu erreichen unter: tredition GmbH, Abteilung "Impressumservice", An der Strusbek 10, 22926 Ahrensburg, Deutschland.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	9
1.1 Einführung in das Thema	9
1.2 Forschungsfrage	10
2. Herausforderungen im Cost Engineering	12
2.1 Beschaffung und Pflege der Datenbanken	12
2.2 Merkmale für gute Cost Estimation	13
2.3 Aktuelle Trends des Cost Engineering	15
3. Methoden der Cost Estimation	19
3.1 Kategorisierung der Methoden	19
3.1.1 Kategorisierung nach Weustink et al.....	19
3.1.2 Kategorisierung nach Curran et al.....	20
3.1.3 Kategorisierung nach Niazi et al	21
3.2 Analogiebasierte Cost Estimation.....	23
3.2.1 Einleitung in die analogiebasierte Cost Estimation	23
3.2.2 Prozessablauf des Case Based Reasoning	23
3.2.3 Case Based Reasoning an einem Beispiel	27
3.3 Parameterbasierte Cost Estimation	29
3.3.1 Einleitung in die parameterbasierte Cost Estimation	29
3.3.2 Parameterbasierte Cost Estimation an einem Beispiel	30
3.4 Analytische Cost Estimation	33
3.4.1 Einleitung in die Bottom-up Cost Estimation	33
3.4.2 Zuschlagskalkulation.....	35
3.4.3 Cost Breakdown	36
3.5 Kritische Reflektion der Cost Estimation Methoden	37

4. Einführung in die Fertigungstechniken.....	41
4.1 Einordnung nach DIN 8580.....	41
4.2 Technischer Überblick	41
4.2.1 Druckgießen	42
4.2.2 Selective Laser Melting.....	43
5. Kostenmodells für das Selective Laser Melting.....	49
5.1 Aufbau des Kostenmodells	49
5.1.1 Einleitung in das Modell	49
5.1.2 Materialkosten	51
5.1.3 Fertigungskosten	52
5.1.4 Personalkosten	53
5.1.5 Maschinenstundensatz.....	56
5.1.6 Verfahrensungebundene Kosten.....	59
5.1.7 Berechnung des Listenverkaufspreises	60
5.2 Kalkulation des Bauteils.....	60
5.2.1 Einführung in das Kalkulationsbeispiel	60
5.2.3 Anwendung des Kostenmodells	63
5.2.4 Kalkulation des Bauteils im Druckguss	71
5.3 Untersuchung der Ergebnisse	72
5.3.1 Ergebnisse des Selective Laser Melting	72
5.3.2 Break-even-Analyse.....	75
5.3.3 Optimierungsmöglichkeiten für die additive Fertigung	77
Literaturverzeichnis.....	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verkürzung des Produktlebenszyklus	16
Abb. 2: Einflussmöglichkeiten auf Änderungskosten im Zeitverlauf ..	17
Abb. 3: Cost Estimation nach Weustink et al.	19
Abb. 4: Cost Estimation nach Curran et al.	20
Abb. 5: Cost Estimation nach Niazi et al.	21
Abb. 6: Prozessablauf des Case Based Reasoning	24
Abb. 7: Matching im Case Based Reasoning Beispiel	28
Abb. 8: Beispiel der parameterbasierte Cost Estimation	31
Abb. 9: Beispieldaten der parameterbasierten Cost Estimation.....	31
Abb. 10: Kostenfunktion im parameterbasierten Beispiel	33
Abb. 11: Kalkulationsschema der Zuschlagskalkulationen	35
Abb. 12: Vor- und Nachteile der Cost Estimation Methoden'	38
Abb. 13: Prozessflowchart Selective Laser Melting.....	44
Abb. 14: Funktionsprinzip des Selective Laser Melting	46
Abb. 15: Kostenmodell für das Selective Laser Melting	49
Abb. 16: 3D-Darstellung des Kalkulationsbauteils 1.....	61
Abb. 17: 3D-Darstellung des Kalkulationsbauteil 2 - Draufsicht.....	61
Abb. 18: 3D-Darstellung des Kalkulations-bauteils 3 - Rücksicht	61
Abb. 19: Prozessflowchart für das Selective Laser Melting.....	62
Abb. 20: Kostenvergleich bei variierter Druckbettauslastung.....	72
Abb. 21: Stückkostenvorteilen verschiedener Drucklosgrößen	73
Abb. 22: Entwicklung der Kostengruppen nach Drucklosgrößen	73
Abb. 23: Kostenverlauf für mehr als 16 Bauteile	74
Abb. 24: Kostenverlauf zwischen 12 und 36 Bauteilen	75
Abb. 25: Break-Even-Analyse	76
Abb. 26: Kostenvergleich zwischen SLM300 und SLM100	77
Abb. 27: Stützstrukturen bei hochkantigem Druck	78
Abb. 28: Kosten unterschiedlicher Bauteilausrichtung	79

1. Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Das vorliegende Buch befasst sich mit der Thematik der Erstellung von Kostenmodellen mithilfe der Methoden des Cost Engineering. Das Cost Engineering hat die Hauptaufgabe Kosten zu identifizieren, zu schätzen und zu steuern. Das Identifizieren und Schätzen der Kosten erfolgt über die verschiedenen Methoden und Techniken der Cost Estimation (dt. Kostenschätzung). Dabei basiert viele Cost Estimation Methoden auf Vergangenheitsdaten und Erfahrungswerten die im Vorfeld erhoben wurden. Die zu kalkulierenden Produkten können sowohl Nachfolgemodelle bereits vorhandener Produkte, als auch innovative Neuproducte sein.

Mit den Methoden der Cost Estimation ist nur ein Teil des Cost Engineering abgedeckt. Als weiteres Ziel des Cost Engineering werden die entstandenen Kosten transparent dargestellt und versucht die Kosten während des gesamten Produktlebenszyklus zu minimieren. Das Cost Engineering überblickt den gesamten Produktlebenszyklus, von der Beschaffung bis zur Entsorgung oder Wiederverwendung.¹

Dabei sind mehrere aktuelle Trends wie Verkürzung der Produktlebenszyklen, zunehmende Qualitätsansprüche der Kunden, steigende Produktkomplexität und der erhöhte Kosteneinfluss der Beschaffung zu beobachten.² Ständige Veränderungen in Produktionstechnologien und Produktionsabläufen, sowie oben beschriebene Änderungen von Umweltfaktoren, machen das Themengebiet des Cost Engineerings zu einem innovativen Anwendungsfeld in Forschung und Praxis. In diesem müssen verschiedene Unternehmensfunktionen, insbesondere das Controlling und das Operations Management, eng kooperieren. Denn sowohl das betriebswirtschaftliche Fachwissen (Controlling, Finanzwesen, Einkauf, Marketing) als auch das produktionstechnische Know-how (Fertigungstechnik, Verfahrenstechnik) sind essentiell für die erfolgreiche Durchführung von Cost Engineering Projekten.

¹ Vgl. Wildemann (2022), S. 2.

² Vgl. Wildemann (2022), S. 10.

Die Neuentwicklung der additiven Fertigungsverfahren und deren Integration in die unternehmerische Praxis sind der Anstoß dieser Arbeit. Die additiven Fertigungsverfahren haben eine Entwicklungsphase erreicht, in der sie das Potenzial aufweisen herkömmliche Fertigungsverfahren ganz oder teilweise zu substituieren.³

1.2 Forschungsfrage

Die Forschungsfrage dieser Arbeit leitet sich aus der neu gewonnenen Bedeutung der additiven Fertigungsverfahren ab. Diese zeichnet sich unter anderem durch die Aufnahme im Entwurf zur DIN 8580 im Januar 2020 aus, der die Terminologie für die Begriffe der Fertigungsverfahren um die Kategorie der additiven Fertigungsverfahren erweitert. Wurden additive Verfahren vor wenigen Jahren noch ausschließlich für Prototypen, Designvisualisierungen oder die Einzelstückfertigung verwendet, können heute herkömmliche Fertigungsverfahren durch additive Methoden teilweise vollständig ersetzt werden.⁴

Da die neuen Verfahren der additiven Fertigung in der Industrie bisher noch einen geringen Anteil am Gesamtproduktionsvolumen aufweisen, sind nur wenige Kostenmodelle zur additiven Fertigung veröffentlicht. Das Identifizieren und Schätzen der Kosten ist für die Unternehmen, die diese neuen Fertigungsverfahren einsetzen, in den meisten Fällen unbekanntes Terrain für das noch keine Erfahrungswerte vorliegen.

Im vorliegenden Buch wurde ein Kostenmodell für das additive Pulverbettverfahren (Selective Laser Melting) entwickelt und in einer ausführlichen Beschreibung dargestellt. Ziel ist es ein Grundmodell aufzuzeigen, dass bei der Durchführung eines Cost Engineering Projekts mit additiver Fertigung genutzt werden kann und flexibel auf individuelle Projekte übertragbar ist. Dafür werden die Kostentreiber dieses Verfahren identifiziert und in ein Kostenschema implementiert. Schlussendlich wird das erarbeitete Kostenmodell an einem Beispiel angewendet.

In der finalen, praxisorientierten Gegenüberstellung werden die Kosten des herkömmlichen Fertigungsverfahren Druckgießen mit denen des additiven Pulverbettverfahren an einem identischen Bauteil verglichen. Dies soll Aufschluss darüber geben, unter welchen Umständen der Einsatz der additiven Pulverbettverfahren wirtschaftlicher als das Druckgießen ist, aufgezeigt an einer Break-Even-Analyse.

³ Vgl. Fritz/Schmütz/Wieneke-Toutaoui (2018), S. 7.

⁴ Vgl. Fritz/Schmütz/Wieneke-Toutaoui (2018), S. 7.

2. Herausforderungen im Cost Engineering

2.1 Beschaffung und Pflege der Datenbanken

Wie in der Einleitung beschrieben beruht das Cost Engineering häufig auf einer Datenbasis, die sich aus Erfahrungswerten vorheriger Produktprojekten zusammensetzt. Diese Daten sind bestimmten Anforderungen unterworfen. Die Reliabilität der Daten ist hierbei von hoher Bedeutung und ein single point of truth ist wünschenswert. Eine Kalkulation mit inkorrekten oder schlecht verarbeitenden Datensätzen führt zwangsläufig zu einer erheblichen Abweichung im Ergebnis. Eine bessere Datengrundlage mit aktuellen, korrekten Daten bedingt grundsätzlich genauere Ergebnisse. Die Daten bilden die Grundlage für die Berechnung und haben somit unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisqualität.

Da heutzutage Berechnungen in der Regel computergestützt durchgeführt werden ist die Datenbasis digital in einer Datenbank hinterlegt. Eine solche Datenbank enthält möglichst alle Produktionsinformationen, die für zukünftige Kalkulation benötigt werden. Dazu zählen beispielsweise die Materialkosten, Personalkosten, Maschinenstundensätze und Informationen zu Produktmerkmalen.

Die Beschaffung der Daten liegt im Aufgabengebiet des Cost Engineers. Die benötigten Informationen sind vor der Implementierung von Cost Engineering Projekten in der Regel über das gesamte Unternehmen in den unterschiedlichen Unternehmensfunktionen verteilt. So liefern die unterschiedlichen Unternehmensfunktionen:

- Forschung und Entwicklung,
- Marketing,
- Einkauf,
- Operations Management und
- Controlling

jeweils wichtige Informationen, die für die Durchführung der Kalkulationen und die Anwendung von Cost Engineering Methoden notwendig sind.

Der Einkauf liefert beispielsweise Preise für benötigte Rohstoffe und Bauteile. Diese sollten möglichst aktuell sein, da Marktpreisschwankungen die Preise beeinflussen. Technische Daten für Maschinen sind im Operations Management gegeben. In dieser Unternehmensfunktion werden beispielsweise Datenblätter für die unterschiedlichen Anlagen und Werkzeugen aufbewahrt, die

unter anderem Kapazitätsgrenzen beinhalten in den Kalkulationen beachtet werden müssen. Auch das Controlling kann eine Vielzahl von nützlichen Informationen wie Lohn- und Gehaltskosten oder Gemeinkostenzuschläge in die Kalkulationen mit einbringen.

Zuletzt sind hier ebenfalls das Marketing und die Forschung und Entwicklung zu nennen. Diese hat unter anderem die Aufgabe herauszufinden, welche Produkte und Produktmerkmale die Konsumenten zum Kauf anregt und wie diese innovativ in die Produkte implementiert werden können. So hat das Marketing, die Forschung zusammen mit dem Operations Management maßgeblichen Einfluss am Produktdesign, welches wiederum entscheidenden Einfluss auf den Herstellungsprozess und die damit verbundenen Kosten hat.⁵ Dies zeigt, dass viele unterschiedliche Einflussgrößen aus unterschiedlichen Unternehmensfunktionen, teilweise sogar ineinander verknüpft, abgerufen werden müssen.

Neben der Datenbeschaffung gehört auch die Pflege der Daten zum Aufgabenbereich des Cost Engineerings. Technische Daten des Maschinenparks müssen regelmäßig aktualisiert und abgeschlossene Kostenkalkulationen als Datensätze in der Datenbank eingepflegt werden. Die Integration beendeter Kalkulationen gehört zum festen Bestandteil aller Methoden des Cost Engineering. Auf diese Weise können Aktualität und Qualität des Datenbestandes fortlaufend verbessert werden, dass zugleich die Ergebnisqualität der zukünftigen Kalkulationen positiv beeinflusst.

2.2 Merkmale für gute Cost Estimation

Die Cost Estimation ist einer der Kernaspekte des Cost Engineerings und stellt deshalb häufig den Anfang eines jeden Produktprojekts dar. In der Praxis haben sich einige Merkmale als besonders relevant erwiesen, die bei Einhaltung die Qualität der Ergebnisse der Cost Estimation sicherstellen.

Obwohl es einen großen Methodenpool für die Cost Estimation gibt, können einige Merkmale zur Qualitätssicherung besonders hervorheben werden:

- reliable und aktuelle Daten
- Berücksichtigung der Produktionsprogrammrisiken
- überprüfbar und transparent für Adressaten
- Validität gegenüber unabhängigen Meinungen

⁵ Vgl. Duverlie/Castelain (1999), S. 896.

Dies sind grundlegende Eigenschaften für die Durchführung guter Cost Estimation mit hochwertigen und verlässlichen Ergebnissen.⁶ Die Wichtigkeit der Datenbasis wurde in der Einleitung bereits betont. Ohne Daten, die in der Vergangenheit korrekt gemessen und verarbeitet wurden, ist eine sachgemäße Cost Estimation nicht möglich.

Die Bezeichnung Estimation im Begriff Cost Estimation verweist darauf, dass in der Schätzung immer auch mögliche Risikofaktoren mit einkalkuliert und berücksichtigt werden müssen. In der industriellen Produktion sind Störungen im Produktionsablauf, wie zum Beispiel Maschinen- oder Personalausfälle, unerwünscht, aber dennoch keine Seltenheit. Auch ein verspäteter Eingang notwendiger Rohstoffe kann eine Störung im Produktionsablauf verursachen. Derartige Risikofaktoren sind die Grundlage für ungeplante Kosten, die allerdings in die Kalkulationen und Schätzungen berücksichtigt werden.

Neben der Genauigkeit der Cost Estimation ist es von Bedeutung, dass diese für Außenstehende akzeptierbar, logisch und nachvollziehbar ist. Schlussendlich sollte nicht nur der Cost Estimator (dt. Kostenschätzer) die ausgearbeitete Methode verstehen und anwenden können. Adressaten wie Entscheidungsträger und Anwender müssen die Kalkulation nachvollziehen, verstehen und anwenden können. Wenn das entwickelte Kostenmodell transparent und für Dritte nicht überprüfbar ist, können nicht ins Thema eingearbeitete Personen das Kostenmodell nicht selbstständig nachvollziehen. Sollte das Kostenmodell für die Entscheidungsträger oder Anwender nicht transparent sein, kann es zur Ablehnung des Modells kommen. Daher werden in der Praxis häufiger simplicere Techniken als komplexe, mehrstufige Modelle angewandt.⁷

Das letzte besonders hervorzuhebende Merkmal für eine gute Cost Estimation ist die Validität gegenüber anderen Cost Estimators. Darunter ist nicht zu verstehen, dass mit der Kalkulation die einzige korrekte Lösung herausgearbeitet werden muss. Vielmehr steht die allgemeine Akzeptanz der Kalkulation und der darin angewandten Techniken im Vordergrund. Sprichwörtlich heißt es: »Gibt man fünf Cost Estimators dieselbe Kalkulationsaufgabe, erhält man zehn unterschiedliche Ergebnisse.«

Diese Aussage basiert auf der Tatsache, dass in nahezu allen Produktprojekten des Cost Engineerrings nicht nur den einen, richtigen Weg zum Ziel gibt. Stattdessen sind je nach Datengrundlage und spezifischem Anwendungsfall meh-

⁶ Vgl. Mislick/Nussbaum (2015), S. 13 f.

⁷ Vgl. Mislick/Nussbaum (2015), S. 13.

rere, teils divergierende Kalkulationsansätze erfolgreich nutzbar. Zudem arbeitet jeder Cost Estimator eines Unternehmens mit der gleichen Datenbasis, verwendet allerdings für nicht definierte Bereiche eigene Parameter, die auf persönlichen Erfahrungswerten basieren. Daher ist jede Cost Estimation eine Mischung aus vergangenheitsorientierten Daten und persönlicher Berufserfahrung.

Zurückkommend auf die Validität bedeutet dies, dass andere Cost Estimators die Vorgehensweise des generierten Kostenmodells im Aufbau akzeptieren sollten. Es ist zu beachten, dass Kalkulationen mit Methoden außerhalb der bestehenden Datenbasis, zu abweichenden Ergebnissen führen und deshalb nicht genutzt werden sollten.⁸

2.3 Aktuelle Trends des Cost Engineering

Da das Cost Engineering mit einer Vielzahl von Unternehmensfunktionen verknüpft ist, ist es stetig neuen wirtschaftlichen Trends ausgesetzt. Diese Trends stellen das Cost Engineering vor Herausforderungen, auf die mit geeigneten Maßnahmen reagiert werden muss. So gelten unter anderem

- kürzer werdende Produktlebenszyklen,
- steigende Produktkomplexität,
- steigende Qualitätsansprüche der Kunden und
- ein Wandel der Fertigungstechnologien

als aktuelle wirtschaftliche Trends, die die Arbeit des Cost Engineering beeinflussen.⁹

Der Trend verkürzter Produktlebenszyklen ist eine einfluss schwere Neuerung für das Cost Engineering. Insbesondere das Marketing sowie die Forschung und Entwicklung werden durch diesen Trend beeinflusst. Während in den 1970er Jahren die Lebenszyklusdauer eines Autos etwa acht Jahren betrug, hat sich diese in 2020 auf ungefähr drei Jahre reduziert.¹⁰ Ein kürzerer Produktlebenszyklus hat Einfluss auf alle Phasen des Zyklus (s. Abb. 1).

⁸ Vgl. Hueber/Horejsi/Schledjewski (2016), S. 3.

⁹ Vgl. Wildemann (2022), S. 10 ff.

¹⁰ Vgl. Glück (2022), S. 186.

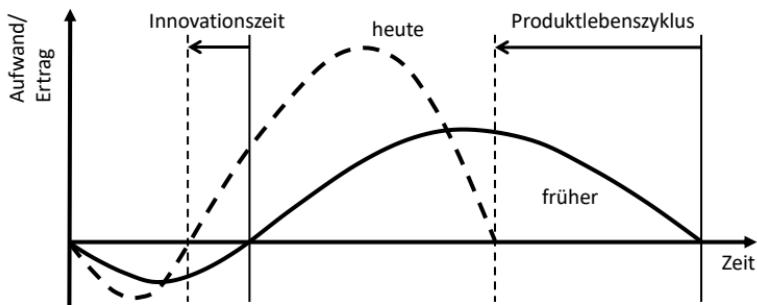


Abb. 1: Verkürzung des Produktlebenszyklus¹¹

Der Graph des früheren Produktlebenszyklus wird bei einer Verkürzung gestaucht. Der neue Produktlebenszyklus ist das Ergebnis dieser Verkürzung. Nach Wildemann (2022) wird die Innovationszeit durch den Break-even-Point begrenzt. Mit der dadurch gekürzten Innovationszeit ist die Forschung und Entwicklung in den Trend involviert. Innovationen müssen schneller entwickelt und umgesetzt werden. Hier kann mit einem gezielten Controlling von Zeit, Kosten und Ressourcen das Cost Engineering unterstützen.¹²

Der Produktlebenszyklus spielt für das Cost Engineering insofern eine wichtige Rolle, da dieser die Gestaltungsmöglichkeiten für nachträgliche Änderungen und den damit verbundenen Änderungskosten am Produkt mitbestimmt. Änderungen am Produktdesign oder an Produktmerkmalen in einer frühen Phase der Produktentwicklung sind einfacher umsetzbar und verursachen geringere Kosten, als wenn diese erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgenommen werden (s. Abb. 2). Das bedeutet, im Hinblick auf den Trend des kürzer werdenden Produktlebenszyklus, dass sich die Zeit verkürzt, in der kostengünstig auf das Produkt Einfluss genommen werden kann.

Die Änderungskosten steigen dementsprechend schneller und früher an, so dass eine frühzeitigere Erfassung und Umsetzung von notwendigen Änderungen am Produkt erforderlich ist, damit die Aufwendungen für Änderungskosten möglichst minimiert werden.

¹¹ In Anlehnung an Wildemann (2022), S. 11.

¹² Vgl. Wildemann (2022), S. 11.

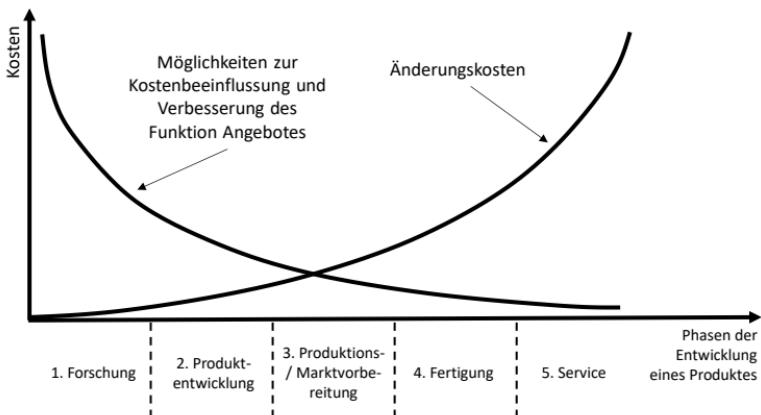


Abb. 2: Einflussmöglichkeiten auf Änderungskosten im Zeitverlauf¹³

Ein weiterer Trend ist, dass Endprodukte aus immer mehr Komponenten bestehen. Durch die steigende Komplexität der Produkte rückt das Kostenbewusstsein in den Fokus. Es müssen mehr unterschiedliche Bauteile fremdbezogen oder selbst gefertigt werden. Damit verbunden steigt die Bedeutung der Beschaffung. Die Fragestellung »Make or Buy« muss neu begutachtet werden.

Als letztes ist die Weiterentwicklung und Neuentwicklung von Fertigungstechniken zu berücksichtigen. Die Verbesserung von Fertigungstechniken bietet eine Möglichkeit Kosten zu minimieren. So ist es eine Zielsetzung die Fertigungstechniken derartig weiterzuentwickeln, dass Verfahren ineinander integriert oder substituiert werden können.¹⁴ Auf diese Art können Fertigungsschritte eingespart und Bearbeitungszeiten am Werkstück verringert werden, mit dem Ziel der Produktionskostenreduktion. Als Beispiel sind die neuen additiven Fertigungsverfahren zu nennen, die die klassischen Fertigungstechniken teilweise vollständig substituieren können.¹⁵

Auf Grundlage neuer Fertigungsmöglichkeiten entstehen neue Ansätze der Kostenkalkulation und verpflichten das Cost Engineering zur Erstellung innovativer Kostenmodelle, die die neuen Fertigungsverfahren berücksichtigen, und stellen damit ein breites Forschungsfeld dar.

¹³ In Anlehnung an Marchthaler/Wigger/Lohe (2011), S. 29.

¹⁴ Vgl. Kühn (2018), S. 2.

¹⁵ Vgl. Fritz/Schmütz/Wieneke-Toutaoui (2018), S. 7.