



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## Diplomarbeit

# Entwicklung eines Lebenszyklus- und Bewertungsmodells zur nachhaltigen und kosteneffizienten Implementierung der additiven Fertigung in das Ersatzteilmanagement des österreichischen Schienenfahrzeugsektors

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

**Dr. techn. Karl Ott**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,  
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Roland Segner, BSc**



Wien, im Juni 2022

---

Roland Segner



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2022

---

Roland Segner

## Gender-Erklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet. Entsprechende Begriffe gelten in dieser Arbeit im Sinne der Gleichbehandlung für alle Geschlechter.

## Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei all jenen, die mich während meines Studiums und bei der Anfertigung dieser wissenschaftlichen Arbeit unterstützt und motiviert haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern Gerlinde und Wolfgang bedanken. Ohne ihre bedingungslose Unterstützung wäre mein Studium an der Technischen Universität Wien nicht möglich gewesen. Durch ihren Glauben an mich, ihre Wegweisung sowie die von ihnen vorgelebten Werte, trugen sie entscheidend zu meiner persönlichen Entwicklung und meinem Studienerfolg bei.

Besonders bedanken möchte ich mich außerdem bei meiner Lebensgefährtin Leah, die mich während meines Studiums und dem Erstellen dieser Arbeit ermutigt und aufgebaut hat. Ihre Anmerkungen halfen mir, mich gedanklich über den Tellerrand hinauszubewegen.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem meinem Vorgesetzten und Betreuer Dr. Karl Ott, der meine Diplomarbeit mit fachlicher Expertise und großem Engagement betreut hat. Seine konstruktiven Anregungen und der offene fachliche Diskurs haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Außerdem möchte ich mich noch bei meinem Kollegen Dipl.-Ing. Stephan Keckeis für die regen Diskurse im Themenfeld der vorliegenden Arbeit bedanken. Unsere kollegiale Zusammenarbeit und der fachliche Austausch haben mich motiviert, den Fortschritt dieser Arbeit weiter voranzutreiben.

Ebenfalls gilt mein Dank allen beteiligten Experten, die mit wertvollem Wissen aus der Praxis dazu beigetragen haben, dass die Ergebnisse dieser Arbeit in Unternehmen angewendet werden können.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, mit denen ich viele Hürden gemeistert und eine schöne Zeit verbracht habe.



## Kurzfassung

In der Nachserienversorgung von Ersatzteilen führen verkürzte Produktentwicklungszyklen und eine hohe Variantenvielfalt häufig zu Versorgungsengpässen. Vor allem bei Maschinen und Anlagen mit langen Lebenszyklen bauen Betreiber folglich zur Vorbeugung von Obsoleszenz Lagerbestände auf. Da sich zukünftige Bedarfe lediglich teilweise vorhersagen lassen, entstehen hohe Lebenszykluskosten. Ein in der Praxis gelebtes reaktives Obsoleszenzmanagement verschärft die Situation im Ersatzteilmanagement weiter. Vor allem der Schienenfahrzeugsektor ist stark von diesen Entwicklungen betroffen. Die Ergänzung konventioneller Versorgungsstrategien durch additive Fertigungstechnologien eröffnet neue Möglichkeiten für die Ersatzteilbereitstellung in Form innovativer Anwendungsfälle.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Lebenszyklus von Ersatzteilen im Schienenfahrzeugsektor und zeigt darauf aufbauend die Vorteile der additiven Fertigung als Ergänzung zu konventionellen Beschaffungsmethoden auf. Da es im Bereich der Ersatzteilidentifikation und -bewertung für die additive Fertigung keine automatisierten und strukturierten Ansätze in der Literatur gibt, wird ein besonderes Augenmerk auf diesen Themenkomplex gelegt und ein Modell dafür entwickelt. Ersatzteilexperten werden durch Workshops partizipativ in die Arbeit eingebunden. Außerdem erfolgt die Durchführung von empirischen 3D-Druckversuchen zur Erhebung signifikanter Werte wie beispielsweise der Fertigungszeit.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, ein Potenzialbewertungsmodell und eine ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung von Ersatzteilen für die Implementierung der additiven Fertigung in den österreichischen Schienenfahrzeugsektor zu entwickeln. Um die Zielsetzung zu erreichen, wird die Design-Science-Forschungsmethodik herangezogen.

Das Ergebnis der Diplomarbeit ist ein Ersatzteilebenszyklusmodell für langlebige Maschinen und Anlagen sowie ein teilautomatisiertes Bewertungsmodell zur Identifikation und Potenzialbewertung von Ersatzteilen. Die Anwendbarkeit des teilautomatisierten Potenzialbewertungsmodells wird in Form einer R-Applikation anhand eines Fallbeispiels im Schienenfahrzeugbereich validiert.

Schlagworte: Ersatzteilebenszyklus, Ersatzteilbewertung, additive Fertigung, Schienenfahrzeugbereich, Ersatzteilmerkmale, Ersatzteilklassifizierung, Ersatzteilstrategien, Potenzialbewertung

## Abstract

In the post-production supply of spare parts, shortened product development cycles and a high number of different variants can lead to supply bottlenecks. Particularly in the case of long-life machinery, operating companies build up stocks to avoid obsolescence. Since future demands can only be partially forecasted, high life cycle costs occur. A reactive obsolescence management approach in practice worsens the situation in the spare part management even furthermore. The rail vehicle sector is strongly impacted by these developments. The complementation of conventional supply strategies with additive manufacturing technologies creates new opportunities for the disposal of spare parts in terms of innovative use cases.

This thesis analyses the life cycle of spare parts in the rail vehicle sector and shows the advantages of additive manufacturing as an extension to conventional procurement methods. Since no automated and structured solutions to identify and evaluate spare parts for additive manufacturing exist in the literature, special attention is paid to this issue and a model is developed. Through workshops, spare part experts are participatively involved in this thesis. Moreover, empirical 3D printing experiments are conducted to collect data such as the production time.

The objective of this thesis is to develop a potential evaluation model and a holistic life cycle assessment of spare parts for the implementation of additive manufacturing in the Austrian rail vehicle sector. To achieve these goals, the design science research methodology is used.

The result of this master's thesis is a spare part life cycle model for long-life machinery as well as a semi-automated evaluation model for the identification and potential assessment of spare parts. Based on a case study in the rail vehicle sector, the applicability of the developed model is validated within an R application.

Keywords: spare part life cycle, spare part evaluation, additive manufacturing, rail vehicle sector, spare part characteristics, spare part classification, spare part strategies, potential evaluation

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation .....	1
1.2	Problemstellung.....	1
1.3	Zielsetzung und Forschungsfragen .....	2
1.4	Definition der Forschungsmethodik .....	2
1.5	Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2</b>	<b>Theoretischer Bezugsrahmen.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ersatzteilmanagement.....	5
2.1.1	Definition Ersatzteil und Ersatzteilmanagement.....	5
2.1.2	Aufgaben und Ziele der Ersatzteillogistik .....	6
2.1.3	Begriffsdefinitionen und Erläuterungen .....	8
2.1.4	Dispositionsstrategien der Nachserienversorgung.....	10
2.2	Obsoleszenzmanagement.....	12
2.2.1	Definition der Obsoleszenz .....	12
2.2.2	Ziele des Obsoleszenzmanagements .....	13
2.2.3	Strategien des Obsoleszenzmanagements .....	14
2.3	Additive Fertigung.....	17
2.3.1	Definition und Funktionsweise .....	17
2.3.2	Verfahren und Materialien.....	18
2.3.3	Fused Deposition Modeling .....	19
2.3.4	Komplexität und geometrische Ähnlichkeit .....	20
2.3.5	Kostenberechnung.....	22
2.4	Lebenszyklusmodelle .....	25
<b>3</b>	<b>State of the Art .....</b>	<b>27</b>
3.1	Vorgehensweise der Literaturrecherche.....	27
3.2	Existierende Modelle von Lebenszyklusbetrachtungen im Ersatzteilmanagement.....	28
3.3	Existierende Modelle zur Klassifizierung und Potenzialbewertung von Ersatzteilen für die additive Fertigung .....	36
3.3.1	Klassifizierung und AM Potenzialbewertung .....	37
3.3.2	Ersatzteilmerkmale zur Klassifizierung .....	43

3.4	Zusammenfassung der aktuellen Forschung und deren Defizite.....	47
<b>4</b>	<b>Einführung eines Lebenszyklusmodells für die AM-Nutzung im Schienenfahrzeugbereich.....</b>	<b>48</b>
4.1	Entwicklung eines Lebenszyklusmodells im Schienenfahrzeugbereich.....	48
4.2	Erkenntnisse für die additive Fertigung .....	53
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines teilautomatisierten Potenzialbewertungsmodells.....</b>	<b>56</b>
5.1	Datenstruktur von Schienenfahrzeugbetreibern .....	56
5.2	Anforderungen aus der Praxis .....	58
5.3	Merkmale und Bewertungsbereiche .....	58
5.4	Bewertungsmodell.....	60
5.4.1	Aufbau des Bewertungsmodells.....	61
5.4.2	Algorithmus zur Kostenberechnung .....	69
<b>6</b>	<b>Anwendung des Bewertungsmodells .....</b>	<b>72</b>
6.1	Ausgangssituation und Zielsetzung .....	72
6.2	Ersatzteilspektrum des Fallbeispiels.....	74
6.3	Empirische Druckversuche.....	75
6.3.1	Versuch 1: Ermittlung der Aufbaurrate und des Materialbedarfs mittels Menger-Schwämmen .....	76
6.3.2	Versuch 2: Ermittlung der Aufbaurrate und des Materialverbrauchs anhand ausgewählter Ersatzteile .....	78
6.3.3	Versuch 3: Ermittlung der Auswirkung von Mehrfachanordnungen im Bauraum .....	82
6.4	Modellparameter für das Fallbeispiel.....	83
6.5	Erstellung einer Ersatzteildatenbank .....	89
6.6	Erstellung einer Applikation .....	89
6.7	Ergebnisse des Fallbeispiels .....	95
6.7.1	Definition der Rahmenbedingungen und automatisierte Bewertung .....	95
6.7.2	Beispiel 1   Teil 12123XXXX – Steckdosenklappe .....	97
6.7.3	Beispiel 2   Teil 12587XXXX – Bettleiterfuß .....	103
6.7.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	109
6.8	Restriktionen des Bewertungsmodells und zu berücksichtigende Rahmenbedingungen .....	110
6.8.1	Einschränkungen des Modells .....	110

---

6.8.2	Rahmenbedingungen.....	111
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
7.1	Ergebnisse der Arbeit.....	113
7.2	Abschließende Diskussion der Forschungsfragen.....	114
7.3	Ausblick.....	117
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>118</b>
8.1	Literaturnachweise Merkmalliste .....	118
8.2	Dokumentation der Versuchsdurchführung .....	119
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
9.1	Wissenschaftliche Veröffentlichungen .....	123
9.2	Normen.....	130
9.3	Internetquellen.....	131
9.4	Eigene unveröffentlichte Quellen.....	131
9.5	Fremde unveröffentlichte Quellen.....	132
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
<b>11</b>	<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>136</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
<b>13</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>139</b>
<b>14</b>	<b>Curriculum Vitae .....</b>	<b>141</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Im Schienenfahrzeugsektor besteht die Herausforderung, jahrzehntelange Verfügbarkeiten von Ersatzteilen zu gewährleisten, um Ausfallzeiten gering zu halten. Unternehmen müssen aus diesem Grund stark in ihre Ersatzteil-Lieferkette investieren und große Bestände nahe an Verbrauchsorten lagern, um Opportunitätskosten von fehlenden Teilen zu vermeiden (vgl. Khajavi et al. 2014; vgl. Knofius et al. 2016). Durch die gestiegene Anzahl an Fahrzeugvarianten und die Verkürzung von Innovationszyklen, bei gleichzeitig längeren Bereitstellungsdauern, steht das Ersatzteilmanagement vor großen Schwierigkeiten (vgl. Klug 2018). Konventionelle Strategien der Bauteilbereitstellung liefern aus Kostengründen oder bei drohender Obsoleszenz nicht immer die gewünschten Ergebnisse. Die additive Fertigung (englisches Pendant: Additive Manufacturing – AM) bietet eine Reihe von Möglichkeiten zur Verbesserung des Ersatzteilmanagements (vgl. Knofius et al. 2016).

AM erlaubt eine kosteneffiziente Herstellung kleiner Losgrößen on demand und eignet sich aus diesem Grund für das Ersatzteilwesen. Im Ersatzteilmanagement besteht durch den Einsatz des 3D-Drucks ein hohes Kosten- und Emissionseinsparungspotenzial. Bisher sind bis zu mehr als 60 Prozent der Lebenszykluskosten von Anlagen auf das Ersatzteilmanagement zurückzuführen (vgl. Öner et al. 2007).

## 1.2 Problemstellung

Folgende Herausforderungen hindern Schienenfahrzeugbetreiber bisher daran, AM als Alternative zu bestehenden Ersatzteilstrategien einzusetzen:

- Eine ganzheitliche Untersuchung des Lebenszyklus von Ersatzteilen im Schienenfahrzeugbereich fokussiert auf AM-Anwendungsfelder wurde in der Literatur bis dato nicht behandelt
- Die Potenzialbewertung von Ersatzteilen erfolgt bisher individuell sowie nach subjektiven Kriterien und nicht standardisiert nach definierten Kriterien
- Eine datengetriebene automatisierte AM-Potenzialbewertung ganzer Ersatzteilspektren findet aktuell im Bahnsektor nicht statt
- Es existiert keine durchgängige Vorgehensweise die aus heterogenen, unstrukturierten Datenquellen und strukturierten Daten eine valide Datengrundlage für eine automatische AM-Potenzialbewertung auf Artekelebene generiert

## 1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, ein Potenzialbewertungsmodell und eine ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung von Ersatzteilen für die Implementierung der additiven Fertigung in den österreichischen Schienenfahrzeugsektor zu entwickeln.

Dieses Modell wird es Unternehmen der oben genannten Branche ermöglichen, die additive Fertigung in die Nachserienversorgung zu integrieren und geeignete Ersatzteile standardisiert und weitgehend automatisiert dafür zu identifizieren.

Auf Basis der ausgearbeiteten Problemstellung und der definierten Zielsetzung lässt sich die spezifischen Forschungsfrage sowie die drei Subfragen wie folgt ableiten.

**Forschungsfrage:** *Wie können etablierte Methoden und Bereitstellungskonzepte des Ersatzteil- und Obsoleszenzmanagements mit Technologien der additiven Fertigung und Lebenszyklusbetrachtungen kombiniert werden, um Bestände zu reduzieren, eine hohe Teileverfügbarkeit zu gewährleisten und nachhaltiger zu wirtschaften?*

- **Subfrage 1:** Wie gestaltet sich der Lebenszyklus eines Ersatzteiles, welche Strategien lassen sich draus ableiten und welche Aspekte des Ersatzteillebenszyklus sind zur Potenzialbewertung der AM-Eignung relevant?
- **Subfrage 2:** Welche ökonomischen und technischen Kriterien sprechen bei der Teilbereitstellung für den Einsatz der additiven Fertigung und wie können diese automatisiert sowie standardisiert ausgewertet werden?
- **Subfrage 3:** Wie kann ein Potenzialbewertungsmodell von Schienenfahrzeugbetreibern in der Praxis eingesetzt werden und wie lässt sich für ein definiertes Ersatzteilspektrum die Funktionsfähigkeit des Bewertungsmodells nachweisen?

## 1.4 Definition der Forschungsmethodik

Zur wissenschaftlichen Beantwortung der vorgestellten Forschungsfragen wird das Design-Science-Paradigma (DSP) herangezogen. Dieses dient der Entwicklung eines Artefaktes zur strukturierten Lösung und Evaluierung von Problemstellungen aus der Praxis. Das DSP stammt ursprünglich aus den Ingenieurwissenschaften und findet mittlerweile in vielen Forschungsdomänen Anwendungsgebiete (vgl. Hevner et al. 2004, S. 76).

Peppers et al. (vgl. 2007) stellen in ihrer Arbeit, ausgehend von DSP, die Design-Science-Forschungsmethodik (englisches Pendant: Design Science Research Methodology – DSRM) vor. Diese fasst Ansätze aus der Literatur zusammen und ermöglicht ein strukturiertes wissenschaftliches Vorgehen. Da es sich bei der



vorliegenden Arbeit im Sinne des DSP um die Lösung eines praktischen Problems handelt, ist sie entsprechend der DSRM aufgebaut (siehe Abbildung 1).

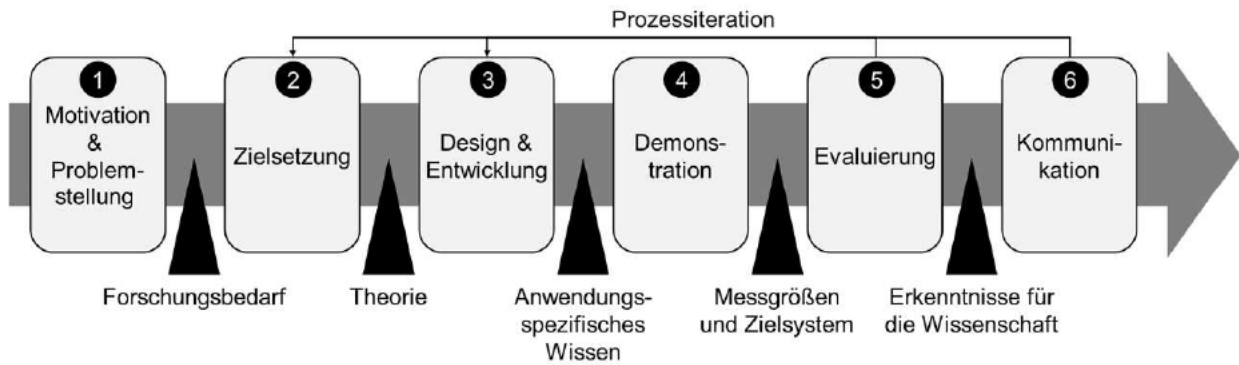


Abbildung 1: Angewandte DSRM nach Peffers et al. (vgl. 2007, S. 54)

In der Tabelle 1 werden die sechs Schritte der DSRM näher beschrieben.

<b>Nr.</b>	<b>Element</b>	<b>Beschreibung</b>
1	Motivation & Problemstellung	Definition der Problemstellung sowie Aufzeigen des praktischen Nutzens der möglichen Lösung
2	Zielsetzung	Erarbeitung von Zielen in Bezug auf die Problemlösung und Durchführung einer State of the Art Recherche
3	Design & Entwicklung	Aufzeigen des Forschungsbedarfs und Erstellung des Artefaktes sowie dessen Funktionalität
4	Demonstration	Anwendung des entwickelten Artefakts zur Lösung des beschriebenen Problems in einem Praxisbeispiel
5	Evaluierung	Vergleich der Ergebnisse mit den Zielvorgaben und Bewertung
6	Kommunikation	Diskussion des Artefaktes und Verbreitung der Erkenntnisse in der Wissenschaft

Tabelle 1: Schritte der DSRM nach Peffers et al. (vgl. 2007, S. 12ff.)



## 1.5 Aufbau der Arbeit

Die Struktur der Arbeit ist entsprechend der DSRM (siehe Abbildung 1) ausgelegt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die Abschnitte *Grundlagen*, *Lösungsentwicklung* sowie *Validierung und Resümee*. Die Abbildung 2 gibt einen Überblick über den Aufbau und die Inhalte der Arbeit.

	Kapitelstruktur	Ergebnisse	DSRM-Prozess
Grundlagen	Kapitel 1   Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Definierte Ausgangssituation</li> <li>▪ Problemstellung und Zielsetzung</li> <li>▪ Gewählte Forschungsmethodik</li> </ul>	Schritte 1 und 2
	↓		
	Kapitel 2   Theoretischer Bezugsrahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grundlagenwissen des Themenkomplexes</li> </ul>	
	↓		
	Kapitel 3   State of the Art	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aktueller Stand der Forschung</li> <li>▪ Identifizierte Forschungslücke</li> </ul>	
	↓		
Lösungs-entwicklung	Kapitel 4   Einführung eines LC-Modells für die AM-Nutzung im Schienenfahrzeugbereich	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entwickeltes Lebenszyklusmodell</li> <li>▪ AM-Anwendungsfelder im Lebenszyklus</li> </ul>	Schritt 3
	↓		
	Kapitel 5   Entwicklung eines teilautomatisierten Potenzialbewertungsmodells	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Datenbankübersicht</li> <li>▪ Anforderungen aus der Praxis</li> <li>▪ Entwickeltes Bewertungsmodell</li> </ul>	
	↓		
Validierung und Resümee	Kapitel 6   Anwendung des Bewertungsmodells	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Druckparameter aus Versuchen</li> <li>▪ Evaluiertes Bewertungsmodell anhand eines Fallbeispiels</li> </ul>	Schritte 4 und 5
	↓		
	Kapitel 7   Diskussion und Ausblick	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diskutierte Ergebnisse</li> <li>▪ Beantwortete Forschungsfragen</li> <li>▪ Zukünftiger Forschungsbedarf</li> </ul>	Schritt 6

Abbildung 2: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

Die *Grundlagen* decken *Schritt 1 und 2* der DSRM ab. Im *Kapitel 1* werden ausgehend von der Ausgangssituation die Problemstellung, die Forschungsfragen sowie die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beschrieben. Außerdem wird die Forschungsmethodik vorgestellt. Das *Kapitel 2* vermittelt Grundlagenwissen zum notwendigen Verständnis des Themenkomplexes, während in *Kapitel 3*, ausgehend von einer Literaturrecherche, der aktuelle Stand der Forschung dargelegt wird.

Im Abschnitt *Lösungsentwicklung* werden die beiden Artefakte Lebenszyklus- (*Kapitel 4*) und Potenzialbewertungsmodell (*Kapitel 5*) entwickelt.

Im letzten Abschnitt (*Validierung und Resümee*) wird das in *Kapitel 5* entwickelte Artefakt in einem Fallbeispiel validiert und mit den Zielvorgaben verglichen (*Kapitel 6*). Abschließend werden in *Kapitel 7* die Ergebnisse diskutiert, die Forschungsfragen beantwortet und der zukünftige Forschungsbedarf abgeleitet. Die Verbreitung der Erkenntnisse in der Wissenschaft nach *Schritt 6* erfolgt über deren Integration in das Forschungsprojekt „AM4Rail“<sup>1</sup>, welches von der *Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft* (FFG) gefördert wird.

<sup>1</sup> <https://projekte.ffg.at/projekt/4105765>

## 2 Theoretischer Bezugsrahmen

### 2.1 Ersatzteilmanagement

#### 2.1.1 Definition Ersatzteil und Ersatzteilmanagement

In der DIN 24420 (DIN 24420-1:1976-09 1976, S. 1) werden Ersatzteile als „Teile (z. B. auch Einzelteile genannt), Gruppen (z. B. auch Baugruppen und Teilegruppen genannt) oder vollständige Erzeugnisse, die dazu bestimmt sind, beschädigte, verschlissene oder fehlende Teile, Gruppen oder Erzeugnisse zu ersetzen“ beschrieben. Seitens der Instandhaltung ergibt sich in der DIN EN 13306 (DIN EN 13306:2018-02 2018, S. 14) eine ähnliche Definition. Ersatzteile sind in dieser Norm als „Objekte zum Ersatz eines entsprechenden Objekts, um die ursprünglich geforderte Funktion des Objekts zu erhalten“ definiert. Zusammenfassend lässt sich folgern, dass ein Ersatzteil der Erhaltung bzw. Wiederherstellung des Funktionsumfangs eines Primärproduktes dient und wesentlicher Bestandteil des Instandhaltungsprozesses ist (vgl. Pawellek 2016, S. 291; vgl. Strunz 2012, S. 569).

Biedermann (vgl. 2008, S. 3) und Schuh et al. (vgl. 2012, S. 166–167) unterteilen Ersatzteile gemäß der DIN 31051 (vgl. DIN 31051:1985-01 1985) in Reserve-, Verbrauchs- und Kleinteile. In aktuellen Literaturquellen wie beispielsweise dem Werk von Dombrowski et al. (vgl. 2020) werden ausgehend von der DIN 31051 (vgl. DIN 31051:2019-06 2019, S. 11) Ersatzteile in Sollbruchteile, zeitbegrenzte Teile, Verschleißteile und Ausfallteile differenziert. Die Abbildung 3 liefert einen zusammenfassenden Überblick über die Arten von Ersatzteilen.

Ersatzteil				
Reserveteile/ Ausfallteile	Verbrauchsteile	Verschleißteile	Sollbruchteile	Kleinteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lebensdauer schwer vorhersagbar</li> <li>Hoher Wert (A-Teile)</li> <li>Geringer Lagerbestand</li> <li>Austausch nicht vorgesehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lebensdauer oft gut vorhersagbar</li> <li>Austausch während des LC des übergeordneten Systems vorgesehen</li> <li>Instandhaltung oft nicht wirtschaftlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Abnutzung am Einsatzort</li> <li>Schutz anderer Bauteile bei betriebsüblichen Belastungen</li> <li>Austausch während des LC des übergeordneten Systems vorgesehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schutz anderer Bauteile bei Überbelastung des Systems</li> <li>Eigenverzehr</li> <li>Austausch vorgesehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Meist Normteile</li> <li>Geringer Wert (C-Teile)</li> <li>Hoher Lagerbestand</li> </ul>
Zeitbegrenzte Teile				

Abbildung 3: Einteilung von Ersatzteilen (eigene Darstellung in Anlehnung an Biedermann 2008, S. 3, Schuh und Stich 2012, S. 166–167 sowie Dombrowski et al. 2020, S. 37)

Unter Reserveteile verstehen die Autoren Ersatzteile, die einem übergeordneten Objekt zugeordnet sind und nicht selbstständig genutzt werden können. Es handelt es sich um Teile mit einer niedrigen Bestandsmenge und einem hohen Wert. Reserveteile

werden als Ausfallteile bezeichnet und dadurch charakterisiert, dass kein Austausch während der normalen Lebensdauer aufgrund von Verschleiß oder Alterung notwendig ist. Zeitbegrenzte Teile lassen sich in Verbrauchsteile und Verschleißteile differenzieren. Sie sind für den Austausch während des Lebenszyklus des Gesamtsystems vorgesehen. Verbrauchsteile sind Teile, die bei der Nutzung aufgebraucht werden. Typische Verbrauchsteile sind Kleinmotoren, Relais und Wälzlager. Verschleißteile werden speziell an Stellen betriebsbedingter Abnutzung eingesetzt, um andere Objekte zu schützen. Ein Verschleißteil ist beispielsweise eine Gleitschiene. Unter einem Sollbruchteil wird ein Ersatzteil verstanden, das bei betriebsbedingter Überbeanspruchung anderer Teile durch geplanten Ausfall vor Schaden schützt. Die Kategorie der Kleinteile zeichnet sich dadurch aus, dass die Teile allgemein verwendbar, vorwiegend genormt und von geringem Einzelwert sind. Kleinteile weisen eine hohe Lagerbestandsmenge bei einem geringen Lagerbestandswert auf. Beispiele für Kleinteile sind Schrauben, Muttern und Federn (vgl. Dombrowski et al. 2005a, S. 125; vgl. Schuh et al. 2012, S. 166–167; vgl. Biedermann 2008, S. 3).

Das Ziel des Ersatzteilemanagements (EM) besteht laut Strunz (2012, S. 570) darin, *„das jeweils richtige Ersatzteil in der richtigen Menge zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort bereitzustellen.“* Die Hauptaufgabe des EM ist es, die Balance zwischen geringen Beständen und einer hohen Teileverfügbarkeit zu finden. Das EM ist verantwortlich für die rechtzeitige Bestellung und planmäßige Bereitstellung der Ersatzteile. Es umfasst die gesamte Ersatzteildisposition in einem Unternehmen (vgl. Strunz 2012, S. 570–571).

### 2.1.2 Aufgaben und Ziele der Ersatzteillogistik

Die primäre Aufgabe der Ersatzteillogistik ist es, jene für die Instandhaltung benötigten Ersatzteile in der erforderlichen Menge, Art und Qualität am Bedarfsort zur rechten Zeit kostenminimal bereitzustellen (vgl. Biedermann 2008, S. 5; vgl. Schuh et al. 2012, S. 167). Sie betrifft nicht nur die operative Ersatzteilbereitstellung, sondern vor allem die Organisation der Versorgungsstrukturen im Sinne des EM. Die wesentlichen Bestandteile der Ersatzteillogistik sind neben der Ersatzteilbewirtschaftung einerseits die Bedarfsprognose und andererseits die Bestands- und Beschaffungsplanung von Ersatzteilen (vgl. Schuh et al. 2012, S. 167). Häufig wird die Ersatzteillogistik organisatorisch von der Instandhaltung abgegrenzt (vgl. Pawellek 2016, S. 293).

Die Ersatzteillogistik steht vor den in Abbildung 4 dargestellten Herausforderungen.

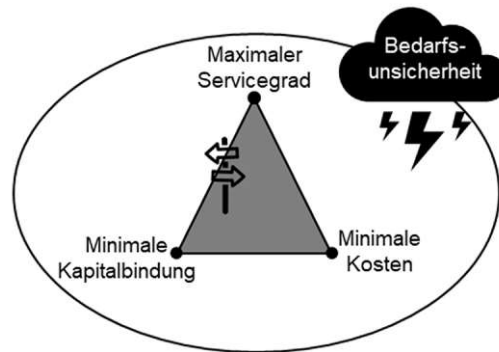


Abbildung 4: Zielkonflikte der Ersatzteillogistik (eigene Darstellung in Anlehnung an Pawellek 2016, S. 294)

Die Schwierigkeit der Ersatzteillogistik liegt darin, eine Balance zwischen den diametral zueinanderstehenden Zielen zu erreichen. Diese Ziele sind maximaler Servicegrad, minimale Kapitalbindung und minimale Kosten. Eine hohe Unsicherheit des zukünftigen Ersatzteilbedarfs verschärft den Zielkonflikt weiter. Die Abbildung 5 verdeutlicht die Herausforderung der Ersatzteillogistik anhand einer Kostenbetrachtung.

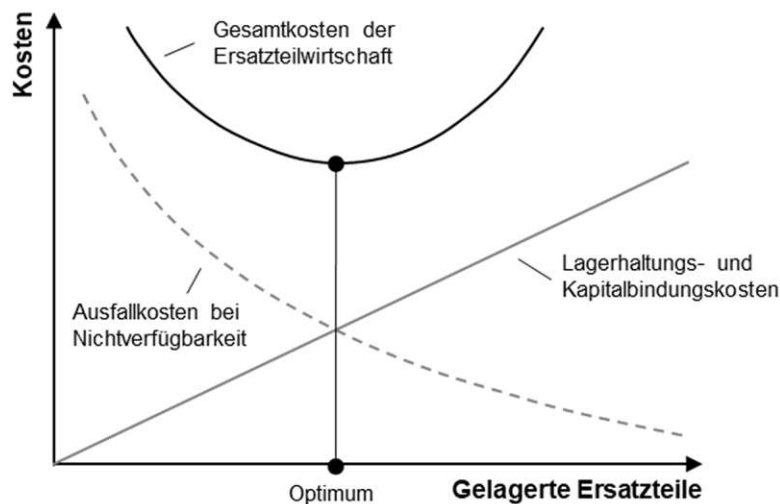


Abbildung 5: Optimierungsproblem der Ersatzteillogistik (vgl. Pawellek 2016, S. 294)

Eine Minimierung der Ausfallzeiten und -kosten durch erhöhte Ersatzbevorratung führt zu höheren Bestandskosten. Eine nicht risikoorientierte Senkung der Ersatzteilbestände führt zu Fehlmengen und längeren Ausfallzeiten, welche die Fehlbestandskosten erhöhen (vgl. Biedermann 2008, S. 6). Biedermann (vgl. 2008, S. 80) führt in seiner Arbeit aus, dass der Ersatzteilbestand so zu steuern ist, dass ein ersatzteilwirtschaftliches Optimum (siehe Abbildung 5) erreicht wird.

## 2.1.3 Begriffsdefinitionen und Erläuterungen

### 2.1.3.1 Kritikalität

Zur Klassifizierung von Ersatzteilen wird oft die Kritikalität herangezogen. Sie definiert, ob ein Ersatzteil funktionskritisch oder funktionsunkritisch ist und bezieht sich auf die Konsequenzen, die der Ausfall eines Teils auf den Betrieb einer Anlage hat. Ersatzteile lassen sich folglich in drei Kategorien einteilen (vgl. Huiskonen 2001, S. 129):

- Unkritisch: Die Störung ist für den Betrieb nicht bedeutsam und muss nicht unmittelbar behoben werden. Für die Ersatzteilversorgung besteht keine Eile.
- Kritisch: Der Betrieb kann kurzfristig fortgesetzt werden. Die Ersatzteilversorgung muss möglichst rasch erfolgen.
- Sehr kritisch: Der Betrieb muss eingestellt werden, bis der Fehler behoben ist. Die Ersatzteilversorgung muss unmittelbar erfolgen, ansonsten kommt es zu hohen Ausfallkosten.

### 2.1.3.2 Lagerreichweite

Die Lagerreichweite gibt an, wie viele Perioden der durchschnittliche Lagerbestand  $LB$  ausreicht, um den durchschnittlichen Bedarf  $B$  zu decken. In der Formel 1 ist die Berechnung ersichtlich.

$$R = \frac{LB}{B}$$

mit

$R$  ... Lagerreichweite [Periode]

$B$  ... durchschnittlicher Bedarf [Stk./Periode]

$LB$  ... durchschnittlicher Lagerbestand [Stk.]

**Formel 1: Berechnung der Lagerreichweite (vgl. Meers et al. 2011, S. 3)**

### 2.1.3.3 Beschaffungszeit

In dieser Arbeit wird unter Beschaffungszeit (englischen Pendant: Lead Time) jene Zeit verstanden, die von der Bestellung eines Ersatzteiles bis zum Wareneingang andauert. Abzugrenzen ist diese Definition der Lead Time von der Begriffsbedeutung im Produktionsmanagement (vgl. Kurlang et al. 2011, S. 25).

### 2.1.3.4 Ersatzteilsteher

Unter Ersatzteilsteher werden im Schienenfahrzeugbereich Stillstände von Fahrzeugen verstanden, die aus fehlenden Ersatzteilen bei der Instandhaltung resultieren. Mögliche Gründe dafür sind überraschende Ausfälle von Teilen in Kombination mit geringen Beständen oder Verzögerungen in der Beschaffungszeit (Expertenworkshop Ersatzteilbeschaffung, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021).

### 2.1.3.5 ABC-Analyse

Viele Unternehmen unterteilen ihr Artikelspektrum anteilmäßig am gesamten Verbrauchs- oder Bestandswert in A-, B- und C-Artikel (vgl. Heiserich 2011, S. 113). A-Güter zeichnen sich durch einen hohen wertmäßigen und geringen mengenmäßigen Anteil am Gesamtwert aus. Für sie ist eine aktive Beschaffungs- und Lagerhaltungspolitik zu bevorzugen. B-Güter sind Materialien mit mittlerem Wert. Für diese Artikel ist eine vergleichsdifferenzierte Vorgehensweise in der Disposition sinnvoll. C-Artikel werden als Teile mit geringem Einzelwert charakterisiert. Da das Verhältnis von Bestellwert und -kosten ungünstig ist, sollten Prozess- und Einkaufskosten in erster Instanz bei den C-Materialien reduziert werden. B- und C-Teile eignen sich für einfache Dispositionsverfahren mit ausreichenden Sicherheits- und Bestellbeständen (vgl. Wannewetsch 2008, S. 27-35; vgl. Heiserich 2011, S. 113).

Die Visualisierung erfolgt über eine Konzentrationskurve (siehe Abbildung 6). Als Einteilungskriterium wird üblicherweise der kumulierte Gesamtwert des Bestands oder Absatzes herangezogen. Die Klassifizierungsgrenzen werden in Anlehnung an das Pareto Prinzip<sup>2</sup> definiert (vgl. Heiserich 2011, S. 113).

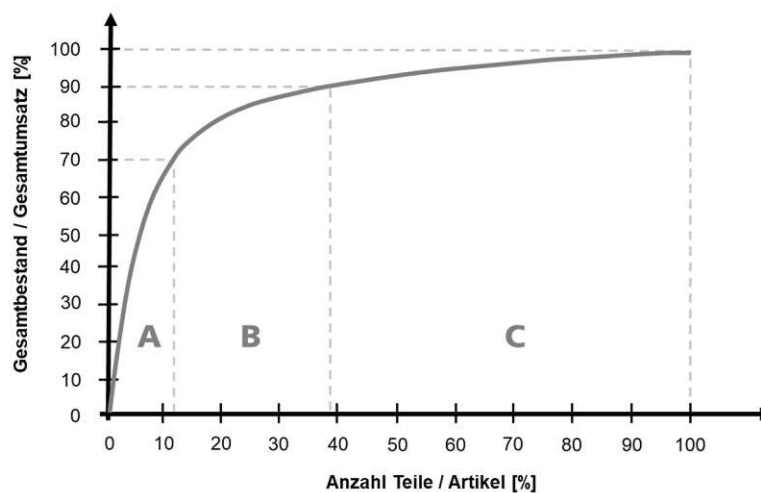


Abbildung 6: Schematische ABC-Analyse (eigene Darstellung in Anlehnung an Heiserich 2011, S. 113)

### 2.1.3.6 XYZ-Analyse

Viele Unternehmen führen ergänzend zur ABC-Analyse eine XYZ-Analyse<sup>3</sup> durch. Bei dieser erfolgt die Einteilung nach dem Verbrauchsverhalten in XYZ-Materialien (vgl. Heiserich 2011, S. 114). X-Teile sind definiert als Material mit einem gleichmäßigen Verbrauch und geringen Schwankungen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Vorhersagegenauigkeit aus. Unterliegt das Material stärkeren Schwankungen mit

<sup>2</sup> Dieses besagt, dass bei vielen Ergebnissen 80 Prozent der Folgen auf 20 Prozent der Ursachen zurückzuführen sind.

<sup>3</sup> In der Literatur ist auch die Bezeichnung RSU-Analyse geläufig.



trendförmigem oder saisonalem Verlauf, wird in der Literatur von Y-Teilen gesprochen. Teilen dieser Art wird eine mittlere Prognosegenauigkeit attestiert. Z-Teile unterliegen einem sporadischen Verbrauch und sind schwer prognostizierbar. Sie deuten in der Regel im Ersatzteilbereich auf einen Spontanverschleiß hin (vgl. Wannewetsch 2008, S. 30; vgl. Schuh et al. 2012, S. 179).

Materialien werden bei der XYZ-Analyse über den Variationskoeffizienten  $v$  klassifiziert. Dieser bestimmt das Verhältnis zwischen empirischer Standardabweichung  $S^4$  und Mittelwert  $\bar{x}^5$  des Periodenverbrauchs (siehe Formel 2). Ein geringer Variationskoeffizient einer Stichprobe weist darauf hin, dass die Streuung im Verhältnis zum Mittelwert gering und der Bedarf bei angenommener Normalverteilung regelmäßig ist (vgl. Strunz 2012, S. 218).

$$v = S/\bar{x}$$

mit

$v$  ... Variationskoeffizient [-]  $\bar{x}$  ... Mittelwert des Verbrauchs [Stk.]

$S$  ... Standardabweichung des Verbrauchs [Stk.]

**Formel 2: Berechnung des Variationskoeffizienten (vgl. Strunz 2012, S. 218)**

Die Einteilung in die Kategorien XYZ ist frei wählbar. In der Praxis hat sich nachfolgende Klassifizierung bewährt (vgl. Broschek & Eicher 2015, S. 38).

X (regelmäßig)	Massengütergeschäft	$v \leq 0,5$
	Ersatzteilgeschäft	$v \leq 1,5$
Y (unregelmäßig)	Massengütergeschäft	$0,5 < v < 1,2$
	Ersatzteilgeschäft	$1,5 < v < 3,0$
Z (sporadisch)	Massengütergeschäft	$v \geq 1,2$
	Ersatzteilgeschäft	$v \geq 3,0$

**Tabelle 2: Einteilung in XYZ-Artikel (vgl. Broschek & Eicher 2015, S. 38)**

## 2.1.4 Dispositionsstrategien der Nachserienversorgung

In diesem Abschnitt werden praxisrelevante Strategien der Nachserienversorgung aus Sicht von Anlagenbetreibern vorgestellt. Hervorzuheben ist die Interferenz mit den Strategien des Obsoleszenzmanagements aus Kapitel 2.2. Um die Perspektive des Herstellers einzunehmen, lohnt sich ein Blick in die Werke von Dombrowski et al. (vgl. 2005a) und Dombrowski et al. (vgl. 2005b).

---

<sup>4</sup>  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$

<sup>5</sup>  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

### 2.1.4.1 Zukauf und interne Bereitstellung

Ersatzteile können auf den drei Märkten Erstausrüstermarkt (englisches Pendant: Original Equipment Service – OES), Bauteilanschlussmarkt (BTM) und unabhängiger Ersatzteilmarkt (Independent Aftermarket – IAM) von Anlagenbetreibern erworben werden (vgl. Freichel 2017, S. 1; vgl. Schnieder 2018, S. 228–232; vgl. Klostermann und Günnel 2012, S. 128). Beim OES kann über den Erstausrüster (Original Equipment Manufacturer – OEM) bzw. Originalkomponentenhersteller (Original Component Manufacturer – OCM) der Zukauf von originalen Ersatz- oder Austauschteilen erfolgen, bis die Versorgung über den letzten Bestellauftrag (Last Order Call – LOC) aufgekündigt wird. Danach gibt es die Möglichkeit, fehlende Teile am BTM zu beschaffen. Als BTM werden Lieferquellen bezeichnet, die Produktionslinien von Bauteilen aufkaufen, die durch den OCM nicht mehr gefertigt werden (vgl. Schnieder 2018, S. 228–232; vgl. VDI 2882:2018-05 2018). Weiters ist es möglich, am IAM Teile zu beschaffen. Der IAM umfasst herstellerunabhängige Unternehmen, die mit Originalteilen, Identteilen und Nachbauteilen handeln (vgl. Freichel 2017, S. 1). Oft bieten dort auch OEM/OCM Zulieferer Ersatzteile mit eigenem Markenzeichen an (vgl. Klostermann und Günnel 2012, S. 128).

Eine weitere Möglichkeit zur Sicherstellung der Ersatzteilversorgung ist der Zukauf von kompatiblen Teilen aus der laufenden Serie eines Nachfolgeproduktes. Diese Bezugsvariante erweist sich als kostenoptimal und schützt zuverlässig vor einer Unterversorgung (vgl. Nyhuis 2008, S. 446). Eine Abwärtskompatibilität der Teile ist in diesem Fall Grundvoraussetzung (vgl. Dombrowski et al. 2009, S. 954).

Ersatzteile können auch intern durch die Kannibalisierung von älteren Primärprodukten bereitgestellt werden. Unter Kannibalisierung wird der Prozess verstanden, bei dem Teile und Baugruppen aus älteren Systemen (z.B. Schienenfahrzeugen) entnommen und diese in ähnlichen Systemen eingesetzt werden (vgl. Schnieder 2018, S. 228–232; vgl. VDI 2882:2018-05 2018). Bei sicherheitsrelevanten Teilen ist eine Altteil-Wiederverwendung problematisch und die Bauteilprüfung aufwändig (vgl. Dombrowski und Schulze 2008, S. 445–446).

### 2.1.4.2 Bevorratung

Bei der Bevorratungsstrategie wird zwischen Überbrückungs-, Langzeit- und Endbevorratung unterschieden. Bei der Überbrückungsbevorratung erfolgt die Einlagerung von Ersatzteilen über einen kurzen Zeitraum. Bis der Ersatzteilbedarf anderweitig gedeckt werden kann, wird auf den aufgebauten Lagerbestand zugegriffen (vgl. Schnieder 2018, S. 228–232). Bei der Langzeitbevorratung wird eine bedarfsbezogene Menge über einen längeren Zeitraum gelagert. Über diese Form der Lagerhaltung werden beim Einkauf oft Mengenrabatte realisiert. Wird von einer Endbevorratung (Schlusseindeckung) gesprochen, bedeutet dies, dass nach dem



LOC für den gesamten restlichen Lebenszyklus des Primärproduktes Ersatzteile eingelagert werden. Durch ungenaue Bedarfsprognosen besteht in diesem Fall das Risiko einer Unter- oder Überdeckung. Weiters treten wirtschaftliche Belastungen durch gebundenes Kapital und Lagerkosten auf (vgl. Dombrowski und Schulze 2008, S. 445–446; vgl. Klug 2018, S. 502). Untersuchungen haben ergeben, dass sich das durchschnittliche Verschrottungsrisiko auf circa 25 Prozent des Einkaufsvolumens von Schlusseindeckungen beläuft (vgl. Barkawi et al. 2007, S. 274).

Die Bevorratung kann über das eigene oder ein angemietetes Lager erfolgen. Es gibt auch die Möglichkeit, Ersatzteile bei Dritten einzulagern. Weiters bieten Logistikdienstleister Konsignationslager beim Kunden an (vgl. Geissbauer et al. 2012, S. 89).

### 2.1.4.3 Nachfertigung

Eine weitere Möglichkeit der Ersatzteilversorgung ist das Nachfertigen von Ersatzteilen. Es ermöglicht, flexibel auf den Bedarfsverlauf zu reagieren und Lagerbestände gering zu halten. Als Voraussetzung gelten die Verfügbarkeit notwendiger Fertigungseinrichtungen und die technischen Pläne der betroffenen Ersatzteile. Da Anlagenbetreiber oft nicht die benötigten Fertigungseinheiten besitzen oder in ihrer Fertigungskapazität begrenzt sind, wird neben der internen Nachfertigung auch extern über Auftragsfertiger nachgefertigt (vgl. Nyhuis 2008, S. 446). Durch die Vergabe an einen spezialisierten Ersatzteilerfertiger erfolgt die Fertigung oft deutlich effizienter (vgl. Dombrowski et al. 2009, S. 954–955). Sowohl für die interne als auch die externe Nachfertigung werden konventionelle als auch additive Fertigungsverfahren angewendet. In Bezug auf die Nachfertigung ist die additive Fertigung (siehe Abschnitt 2.3) für geringe Ersatzteilbedarfe und hohe Teilevarianz geeignet. Es müssen nur wenige Werkzeuge und Vorrichtungen angeschafft werden und die Fertigung ist weitgehend flexibel. Außerdem ist ein geringes fertigungstechnisches Know-how zum Bedienen der Anlagen vonnöten (vgl. Dombrowski et al. 2014, S. 623). Die konventionelle Nachfertigung eignet sich vor allem bei höheren Losgrößen.

## 2.2 Obsoleszenzmanagement

### 2.2.1 Definition der Obsoleszenz

Der Begriff Obsoleszenz stammt vom lateinischen Wort „obsolescere“ ab und bedeutet gemäß Duden (Duden 2022) so viel wie *„die [in seiner Herstellungsweise, seinen Materialien oder Ähnlichem angelegte] Alterung eines Produkts, das dadurch veraltet oder unbrauchbar wird.“*

In der Richtlinie VDI 2882 (VDI 2882:2018-05 2018, S. 2) vom *Verein Deutscher Ingenieure (VDI)* bedeutet Obsoleszenz, „*dass eine Komponente, eine Baugruppe oder ein komplettes Produkt (wie auch Prozesse, Materialien, Software, Produktionseinrichtungen usw.) während der Nutzungsdauer nicht mehr verfügbar ist.*“ Weiters kann Obsoleszenz auch als „*Wechsel von der Lieferbarkeit durch den Originalhersteller zu Nicht-Lieferbarkeit*“ sowie dem bleibenden „*Übergang von der Funktionsfähigkeit zur Nicht-Funktionsfähigkeit aufgrund externer Einflüsse*“ verstanden werden (DIN EN 62402:2008-01 2018, S. 8).

Zusammenfassend bedeutet Obsoleszenz für das Ersatzteilmanagement in der Praxis, dass ein Ersatzteil nicht mehr im Lager liegt, nicht ohne Weiteres selbst fertigbar ist und beim ursprünglichen Hersteller des Bauteils nicht mehr beschafft werden kann (vgl. Bartels et al. 2012, S. 2).

Bartels und Haeffs (vgl. 2018, S. 182) machen in ihrer Arbeit folgende mögliche Gründe für das Auftreten von Obsoleszenz aus:

- Der OEM oder OCM ist nicht mehr auf dem Markt aktiv
- Das notwendige Wissen zur Herstellung ist nicht mehr vorhanden
- Das Teil wurde durch den Hersteller abgekündigt oder modifiziert
- Das benötigte Werkzeug zur Fertigung ist nicht mehr nutzbar oder vorhanden
- Änderungen von nationalen und internationalen Gesetzen und Normungen
- Die Komponente ist vorübergehend nicht verfügbar oder lieferbar

In dieser Arbeit wird unter Obsoleszenz verstanden, dass ein Ersatzteil auf sämtlichen zur Verfügung stehenden Märkten weder als Originalteil noch als Identteil bezogen werden kann.

### 2.2.2 Ziele des Obsoleszenzmanagements

Obsoleszenz ist unausweichlich und kann nicht verhindert werden. Eine vorausschauende und sorgfältige Planung kann ihre Auswirkungen und somit Folgekosten minimieren (vgl. DIN EN 62402:2008-01 2018, S.5). Aus diesem Grund hat sich das Obsoleszenzmanagement (OM) entwickelt. Es ist Teil des Risiko- und Zuverlässigkeitsmanagements und dient der Reduktion von Produktions- oder Dienstleistungsausfällen (vgl. Bartels und Haeffs 2018, S. 182). Das Ziel des OM ist es, sicherzustellen, dass Obsoleszenz als integraler Bestandteil des Produktlebenszyklus betrachtet wird, um Kosten und schädliche Auswirkungen zu minimieren (vgl. DIN EN 62402:2008-01 2018, S.5).

Im Zuge des OM von Fahrzeugflotten werden die nachfolgenden Ziele verfolgt (vgl. Schnieder 2018, S. 226):

- Verlängerung der Lebensdauer eingesetzter Fahrzeuge: Die veranschlagte Lebensdauer eines Fahrzeugs darf nicht durch die Obsoleszenz seiner Bauteile gefährdet werden.
- Gewährleistung der Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte: Kein Fahrzeug soll wegen fehlerhaften Komponenten aus dem Betrieb genommen werden oder wegen langer Zeiten für Entwicklung, Zulassung und Freigaben einer Ersatzkomponente außer Betrieb bleiben müssen.
- Aufrechterhaltung sicherheitstechnischer Nachweise: Zu tauschende Bauteile sollen bezüglich ihrer Form, Passung und Funktion identisch sein.
- Minimierung der Kosten: Kosten des Einkaufs, der Kapitalbindung, der Lagerung und Folgekosten einer Obsoleszenz sollen reduziert werden.

## 2.2.3 Strategien des Obsoleszenzmanagements

### 2.2.3.1 Reaktives Obsoleszenzmanagement

Reaktives OM bedeutet, erst Handlungen in Form eines spezifischen Problemlösungsprozesses gegen eine auftretende Obsoleszenz zu setzen, wenn die Teileversorgung durch den Lieferanten nicht mehr gewährleistet wird (vgl. VDI 2882:2018-05 2018, S.11). Ausgehend von der VDMA 24903 (vgl. VDMA 24903:2017-12 2017, S. 6) vom *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA)* und der DIN EN 62402 (vgl. DIN EN 62402:2008-01 2018, S.10) finden in der Praxis nachfolgende Formen der An- und Abkündigungen durch den OEM statt, die als Auslöser für eine reaktive Strategie charakterisiert werden können:

- Produktabkündigungsmitteilung
- Produktänderungsmitteilung
- Mitteilung über die Einstellung des Vertriebs
- Mitteilung über die Einstellung der Produktion
- Mitteilung über die Einstellung von Service, Wartung und Reparatur
- Endbevorratungsankündigung

Für Anlagenbetreiber gibt es bei der Aufkündigung der Ersatzteilversorgung bei einem reaktionären OM die in Kapitel 2.1.4 erörterten Handlungsoptionen des EM. Werden neben der Teileproduktion auch sämtliche Serviceleistungen des OEM aufgekündigt, besteht die Möglichkeit, die Instandsetzung in den eigenen Reihen oder über Dienstleister, die sich auch auf abgekündigte und obsoletere Produkte spezialisiert haben, abzuwickeln (vgl. Schnieder 2018, S. 228–232; vgl. VDI 2882:2018-05 2018, S. 13).

Die reaktive Variante gilt als kostengünstig, wenn sie bei nicht systemrelevanten Komponenten angewendet wird, da hohe Ausfallkosten ausgeschlossen werden können. Folglich erstreckt sich das OM in diesem Fall hauptsächlich auf Standard- und

Normteile. Wenn der geschäftliche Erfolg nicht von der Funktion eines Einzelsystems abhängt, oder wenn es keinerlei Sicherheitsrisiken für Mensch und Umwelt gibt, spricht nichts gegen ein reaktionäres OM (vgl. Bartels und Haeffs 2018, S. 185–187).

### 2.2.3.2 Proaktives Obsoleszenzmanagement

Das proaktive OM erweitert das reaktive OM um zusätzliche vorausschauende Aktivitäten, wodurch eine Vorlaufzeit bis zum Eintreten einer Bauteilobsoleszenz geschaffen wird. Diese Vorlaufzeit wird durch eine regelmäßige Lifecycle-Status-Untersuchung des proaktiven OM gewonnen. Es werden vor allem Komponenten vorausschauend überwacht, deren Ausfall einen erheblichen Einfluss auf das System oder die übergeordneten Anlagen haben.

Die Obsoleszenz muss bei der Entwicklung und Konstruktion neuer Produkte zukünftig stärker berücksichtigt werden. In der Literatur wird von *Design for Obsolescence* gesprochen (vgl. Bartels und Haeffs 2018, S. 188; vgl. Schnieder 2018, S. 233–234). Im Sinne einer vorsorgenden Fehlervermeidung kann dafür die Methode der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (englisches Pendant: Failure Mode and Effect Analysis – FMEA) angewendet werden. Sie ermöglicht die frühzeitige Identifikation und Bewertung potenzieller Fehlerursachen und liefert vor allem in der Entwurfsphase einer Anlage oder Maschine einen Mehrwert. Es werden dadurch anfallende Kontroll- und Fehlerfolgekosten in der Produktionsphase oder beim Betreiber vermieden und die Kosten gesenkt.

### 2.2.3.3 Strategisches Obsoleszenzmanagement

Strategisches OM beschreibt die Anwendung von Maßnahmen in allen Phasen des Produktlebenszyklus. Die Implementierung dieses Ansatzes erfolgt in der Entwicklungsphase, um bestimmen zu können, welche Komponenten für den beabsichtigten Lebenszyklus der Systeme (z. B. Schienenfahrzeuge) verwendet werden sollen und um Verträge mit Lieferanten zu schließen. Auch die strategische Planung von Upgrades des eigenen Systems gehört zum strategischem OM, um veraltete Komponenten mit lediglich einmaligem Ingenieurs- und Qualifizierungsaufwand aus einem System entfernen zu können (vgl. VDI 2882:2018-05 2018, S.21; vgl. Bartels und Haeffs 2018, S. 184–190).

Nachfolgende Methoden minimieren bezugnehmend auf die Arbeit von Bartels et al. (vgl. 2012, 199) die Auswirkungen obsoleter Komponenten:

- Berücksichtigung von Optionen für das OM bei der Bauteilauswahl
- Verbesserung der Vorhersagefähigkeit von Obsoleszenz durch den Einsatz proaktiver Informationssysteme
- Gewährleistung maximaler Komponentenverfügbarkeit durch Identifizierung, Nutzung und Unterstützung aller verfügbaren Ressourcen für die Beschaffung

- Auslegung von Managementprozessen auf Systemebene statt Einzelteilbetrachtungen
- Planen und Steuern des Lebenszyklusmanagements von Systemen

## 2.3 Additive Fertigung

### 2.3.1 Definition und Funktionsweise

Die additive Fertigung ist ein Überbegriff für Fertigungsverfahren, bei denen durch schichtweises Aufbringen von formlosem oder formneutralem Werkstoff in einem automatisierten Prozess ein dreidimensionales Produkt hergestellt wird (vgl. Klahn et al. 2018, S. 11; vgl. Fastermann 2014, S. 25–44). Entsprechend der Systematik der Fertigungsverfahren aus der DIN 8580 (vgl. DIN 8580:2020-01 2020, S. 11) zählt die additive Fertigung zu den urformenden Verfahren. AM ermöglicht es durch den schichtweisen Aufbau komplexe Geometrien, die mit konventionellen Fertigungsverfahren wie beispielsweise Drehen, Fräsen, Gießen oder Schmieden lediglich mit hohem Aufwand bzw. gar nicht erzielbar sind, zu erreichen.

In der Norm DIN 17024 (DIN 17024:2021-09, 2021, S. 5) ist AM wie folgt definiert:

*„Prozess, der durch Verbinden von Material Bauteile aus 3D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden, üblicherweise Schicht für Schicht, herstellt.“*

Da AM eine Vielzahl unterschiedlicher Herstellungsverfahren umfasst, werden in Abschnitt 2.3.2 die wichtigsten Verfahren in einer Übersicht dargestellt. Der prinzipielle Ablauf von der Modellerstellung bis zum fertigen Objekt ist in Abbildung 7 dargestellt.

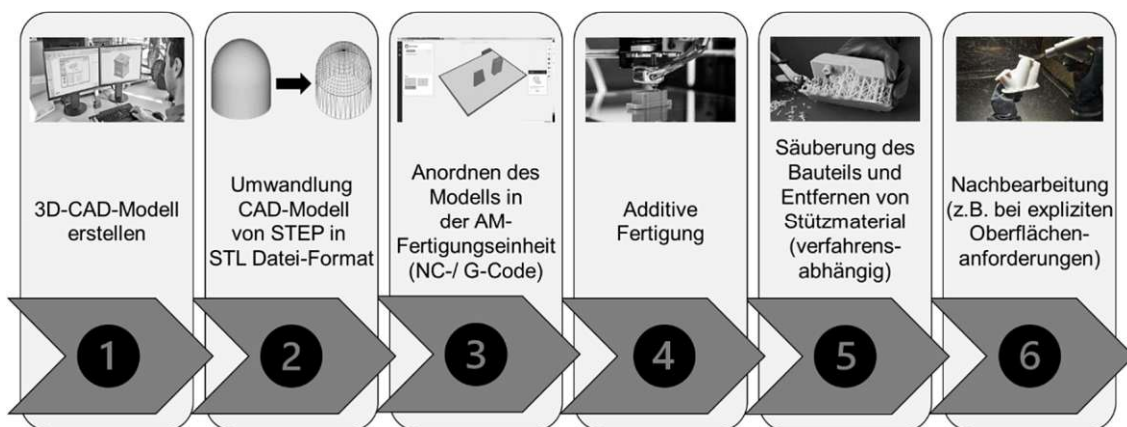


Abbildung 7: Ablauf des AM-Prozesses (eigene Darstellung in Anlehnung an Jiménez et al. 2019, S. 6)<sup>6</sup>

Den Grundstein liefern virtuelle, dreidimensionale, rechnerunterstützte Modelle, aus denen physische Bauteile generiert werden (vgl. Gebhardt et al. 2019, S. 1). Alle fertigungsrelevanten Informationen sind in dem in *Schritt 1* konstruierten CAD-Datensatz vorhanden. Das 3D-Modell muss zunächst in ein STL<sup>7</sup>-Datenformat

<sup>6</sup> Die Grafiken in der Abbildung wurden den Websites [www.javelin-tech.com](http://www.javelin-tech.com), [www.meusburger.com](http://www.meusburger.com), [www.cadimensions.com](http://www.cadimensions.com), [www.formlabs.com](http://www.formlabs.com), [www.ewellix.com](http://www.ewellix.com) und [www.bigrep.com](http://www.bigrep.com) entnommen (zuletzt geprüft: 21.03.2022).

<sup>7</sup> STL: Datenformat, das geometrische Informationen für die additive Fertigung bereitstellt.



überführt werden (*Schritt 2*). Im Anschluss kann das Modell exportiert und in die Software des Maschinenherstellers importiert werden (*Schritt 3*). Bei neueren additiven Fertigungseinheiten entfällt *Schritt 2*. Die Software des Druckers teilt das Modell in ebene Schichten ein und berechnet den Ablauf der Fertigung. Die Fertigungssimulation liefert Erkenntnisse über die Fertigungszeit, den Materialverbrauch und die Herstellungskosten. Je nach Simulationsergebnis kann es vorkommen, dass Nachkonstruktionen vorzunehmen sind und wieder mit *Schritt 1* gestartet werden muss. Nachdem das Objekt virtuell im Bauraum angeordnet wurde, startet die Fertigung. Bei manchen Materialien wird zur Unterstützung des Druckverfahrens während der Fertigung sogenanntes Stützmaterial mitgedruckt. Dieses muss im Anschluss entfernt werden (*Schritt 5*). Es sind keine bauteilspezifischen Werkzeuge notwendig. Je nach Anforderungen an das Bauteil können, wie in *Schritt 6* dargestellt, Werkzeuge für eine Nachbearbeitung benötigt werden (vgl. Lachmayer und Lippert 2017, S. 50–52; vgl. Jiménez et al. 2019, S. 6).

Die Hauptvorteile der AM-Technologien liegen einerseits in der Fertigungspräzision und andererseits in der Verwendbarkeit einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien (vgl. Jiménez et al. 2019, S. 25). Die Prozesszeit wird nicht mehr hauptsächlich von der Komplexität des Bauteils, sondern durch dessen Volumen festgelegt (vgl. Klahn et al. 2018, S. 14). Außerdem können durch Funktionsintegration Baugruppen in einem Stück gefertigt werden. Weiters ist es möglich, Leichtbaustrukturen anzufertigen, Materialsubstitutionen durchzuführen und Topologieoptimierungen vorzunehmen. Werden diese Gestaltungsansätze aufgegriffen, kann das Potenzial der additiven Fertigungsverfahren vollständig ausgenutzt werden (vgl. Gebhardt et al. 2019, S. 1). Aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich im EM Kosteneinsparungen durch einen geringeren Bedarf an Lagerbeständen und die Verkürzung von Beschaffungszeiten. Die Fertigung ist, je nach Stückzahl und Bauteil, verglichen mit der konventionellen Fertigung, meist teurer (vgl. Lindemann et al. 2015, S. 936).

### 2.3.2 Verfahren und Materialien

Die Verfahren lassen sich nach dem zu verarbeitenden Werkstoff, der Ausgangsform des Werkstoffs, der Art und Weise, wie der Stoffzusammenhalt geschaffen wird und der Anlagenform unterscheiden (vgl. Burkhart und Aurich 2015, S. 327–330). Die Wahl des geeigneten AM-Verfahrens ist vom gewünschten Ergebnis abhängig (vgl. Jiménez et al. 2019, S. 25). Die Technologien verbinden funktionale Gemeinsamkeiten, obwohl sie sich in Wirkprinzip und Ausführung stark unterscheiden können. Unter anderem ermöglicht ein Großteil der AM-Verfahren sowohl die Herstellung von Prototypen als auch funktionsfähigen Bauteilen (vgl. Jiménez et al. 2019, S. 1). Nachfolgende Grafik (siehe Abbildung 8) liefert einen Überblick über eine Auswahl der gängigsten AM-Technologien wie *Stereolithografie (SL)*, *Photopolymere Jetting (PJ)*, *Binder Jetting (BJ)*, *Laserschmelzen (SLM)*, *Elektronenstrahlschmelzen (EBM)*, *Fused Deposition*

*Modelling* (FDM), *Lasersintern* (SLS) und *Material Jetting* (MJ). Die Verfahren sind nach ihrem Wirkprinzip und den verwendbaren Materialien abgebildet. Bezugnehmend auf eine Umfrage von Ilg (vgl. 2019, S. 28) werden mit Abstand am häufigsten Kunststoffe, gefolgt von Metallen, additiv gefertigt.

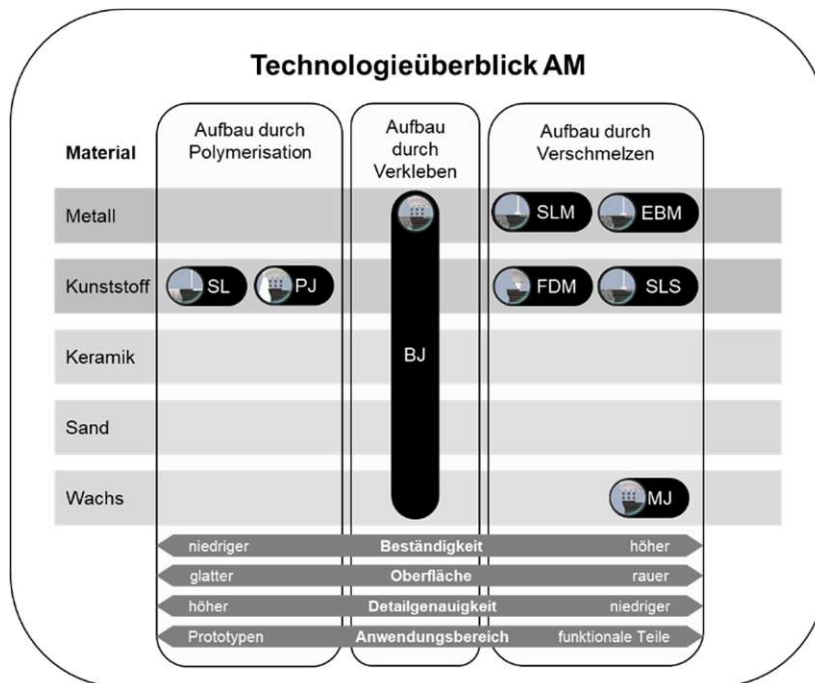


Abbildung 8: Überblick über die wichtigsten AM-Verfahren (vgl. Klahn et al. 2018, S. 13)

Auf das FDM-Verfahren wird in Abschnitt 2.3.3 näher eingegangen, da das in Kapitel 5 entwickelte Bewertungsmodell mit diesem Verfahren in einem Fallbeispiel validiert wird. Die anderen Herstellungsmethoden werden in dieser Arbeit nicht gesondert vorgestellt. Ein Anhaltspunkt für weitere Informationen bezüglich Verfahren und Materialien liefert die Monographie von Feldmann (vgl. 2016).

### 2.3.3 Fused Deposition Modeling

Diese Technologie wurde 1989 von dem Unternehmen *Stratasys*<sup>8</sup> entwickelt und in den darauffolgenden Jahren laufend weiterentwickelt (vgl. Jiménez et al. 2019, S. 3). Es handelt sich bei FDM um ein Fertigungsverfahren, bei dem das Bauteil aus Kunststoffsträngen schichtweise aufgebaut wird. Abbildung 9 verbildlicht die nachfolgend beschriebenen Fertigungsschritte.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren werden zur Materialbereitstellung keine Pulver oder Flüssigkeiten sondern Kunststoffdrähte verwendet (vgl. Klahn et al. 2018, S. 15). Diese werden Filament genannt und sind auf Spulen (1) gewickelt. Geeignete Materialien für FDM sind Thermoplaste und thermoplastische Elastomere (vgl. Hofmann und Spindler 2019, S. 67).

<sup>8</sup> <https://www.stratasys.com/>



Beim Herstellungsvorgang wird das Filament über Transportrollen (9) in eine Düse gefördert und dort aufgeschmolzen (8). Das zugeführte Material wird durch die Wärmezufuhr plastifiziert und als zähflüssige Schmelze aus der Düse (7) extrudiert. Die Düse wird über anlagenspezifische Mechanismen in weiterer Folge über die Bauplattform (3) bzw. Druckunterlage (4) bewegt. Bei industriellen Druckern kann die Düse in x-y-z-Koordinatenrichtung bewegt werden. Bei manchen Modellen übernimmt eine bewegliche Bauplattform die Bewegung der z-Koordinate. Der geschmolzene Kunststoffstrang wird so Schicht für Schicht auf der Bauplattform platziert. Ist eine Lage fertig gestellt, wird der Abstand zwischen Extruder und Bauplatte um eine Lagenhöhe vergrößert und es erfolgt der Aufbau der nächsten Schicht. In vielen Maschinen wird der Bauraum beheizt, um eine bessere Verbindung zwischen der Schmelze und den abgelegten Strängen zu erreichen (vgl. Klahn et al. 2018, S. 15; vgl. Lachmayer et al. 2021, S. 167). Weiters können komplexe Teile beim FDM-Verfahren nur unter Zuhilfenahme von Stützkonstruktionen (z. B. Wachs) erzeugt werden. Das Stützmaterial (12) wird dem Drucker über eine weitere Spule (2) zugeführt und über die Düse extrudiert. Hervorzuheben ist, dass dieses in einem zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt entfernt werden muss.

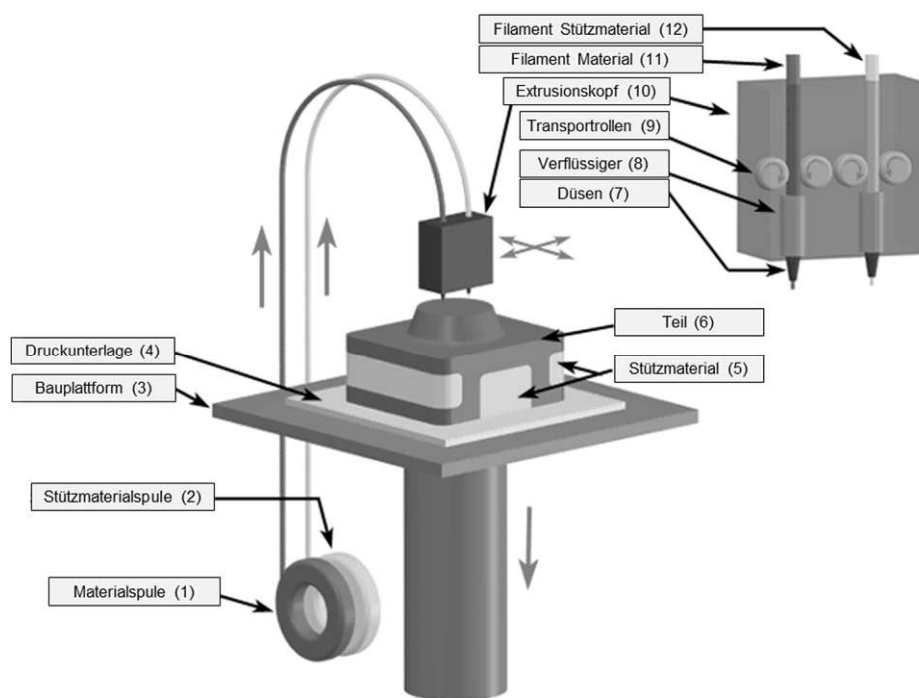


Abbildung 9: Schematische Funktionsweise des FDM-Verfahrens (vgl. Reddy Bathula 2017, S. 3; vgl. Jiménez et al. 2019, S. 10)

### 2.3.4 Komplexität und geometrische Ähnlichkeit

In der Praxis wird in Abhängigkeit von der Komplexität eines Bauteils das Fertigungsverfahren gewählt. Dies gilt sowohl für die konventionelle Fertigung (englisches Pendant: Conventional Manufacturing – CM) als auch für AM. Mit

folgenden Ansätzen aus der Literatur kann die Komplexität eines Bauteils beschrieben werden (vgl. Lachmayer und Lippert 2017, S. 53):

- Volumenverhältnis: Verhältnis des Produktvolumens zum Volumen einer begrenzenden Boundingbox<sup>9</sup>
- Oberflächenverhältnis: Verhältnis der Produktoberfläche zur Oberfläche einer Kugel

Neben dimensionslosen Komplexitätszahlen können Ähnlichkeitskennzahlen zur Beschreibung geometrischer Produkteigenschaften herangezogen werden (vgl. Lachmayer und Lippert 2017, S. 53). Unter dem Begriff der Ähnlichkeit wird das Übereinstimmen von Objekten in mehreren Merkmalen verstanden (vgl. Koschorrek 2007). Die Ähnlichkeitskennzahl spiegelt eine geometrische Produkteigenschaft wider und lässt einen Vergleich mit anderen Körpern zu (vgl. Lachmayer und Lippert 2017, S. 56).

Um die Ähnlichkeit von Bauteilen zu beschreiben gibt es Ansätze, die die fraktale Geometrie heranziehen (vgl. Barnsley 1995). Die bekannteste Menge der fraktalen Geometrie ist der sogenannte Menger-Schwamm (siehe Abbildung 10). Das Gebilde entsteht durch fortwährendes Zerteilen eines Würfels nach dem Konstruktionsprinzip des Sierpinski-Teppichs. Der Würfel wird mit jedem Iterationsschritt  $n$  nach dem Muster aus Abbildung 10 dezimiert (vgl. Zeitler und Pagon 2000, S. 45ff.).

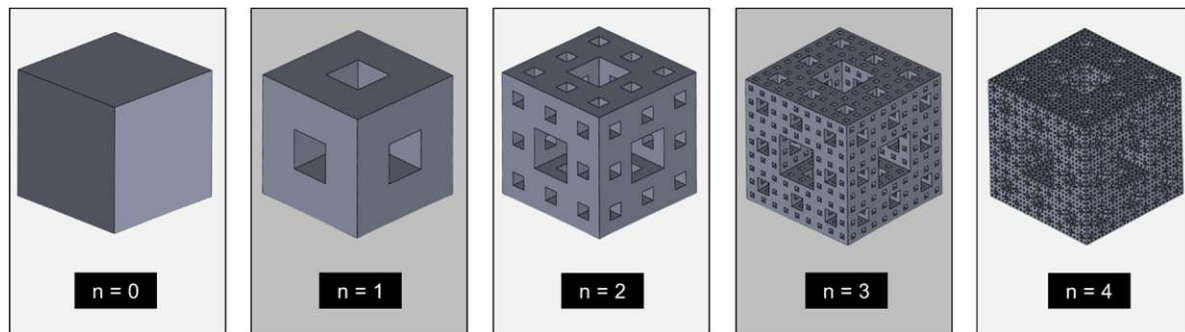


Abbildung 10: Menger-Schwamm nach  $n$  Iterationsstufen (eigene Darstellung)

Lachmayer und Lippert (vgl. 2017, S. 57) leiten in ihrem Sammelwerk, ausgehend von einem Würfel, nachfolgende Ähnlichkeitskennzahl  $K$  her (siehe Formel 3).

$$K = O * V^{-\frac{2}{3}}$$

mit

$K$ ... Ähnlichkeitskennzahl [-]

$V$ ... Volumen des Bauteils [ $\text{cm}^3$ ]

$O$ ... Oberfläche des Bauteils [ $\text{cm}^2$ ]

Formel 3: Berechnung der geometrischen Ähnlichkeitskennzahl (vgl. Lachmayer und Lippert 2017, S. 57)

<sup>9</sup> Das kleinste Rechteck, welches ein Objekt vollständig umgibt, ohne es zu schneiden.

Die Autoren führen aus, dass bei gleicher Ähnlichkeitskennzahl  $K$  zweier Körper beim 3D-Druck ähnliche additive Fertigungsparameter beobachtet werden können. Dieses Erkenntnis kann zur Prognose von Druckzeiten und Materialverbräuchen herangezogen werden. Unter anderem schließen Lachmayer und Lippert (vgl. 2017, S. 64–65) über die in Abbildung 10 dargestellten Menger-Schwämmen auf Druckparameter anderer Bauteile.

### 2.3.5 Kostenberechnung

In der Literatur lassen sich unterschiedliche Ansätze zur AM-Kostenberechnung finden. In dieser Arbeit bezieht sich die Kostenevaluierung auf die interne Nachfertigung (siehe Abschnitt 2.1.4.3) von Ersatzteilen durch den Betreiber von langlebigen Maschinen und Anlagen.

Der AM-Prozess lässt sich in die Blöcke Pre-, In- und Post-Processing unterteilen. Unter Pre-Processing werden jene Tätigkeiten verstanden, die erfolgen, bevor das Bauteil in der additiven Fertigungsanlage hergestellt wird. Es umfasst angefangen von der Datenvorbereitung bis hin zur Anlagenvorbereitung (z. B. Materialbefüllung) alle notwendigen Arbeitsschritte. Die Fertigungsoperationen der Anlage erfolgen im In-Processing. Nachdem die Fertigung abgeschlossen ist, beginnt das Post-Processing. Darunter werden alle Arbeitsschritte verstanden, die nach der Entnahme des Bauteils aus der Anlage ablaufen. Dazu zählen die Entfernung von Pulverrückständen oder Stützkonstruktionen und zwingend erforderliche Schritte zur Herstellung der geforderten technischen Bauteileigenschaften (vgl. VDI 3405:2014-12 2014, S.6).

Den drei vorgestellten übergeordneten Prozessschritten der additiven Fertigung werden in der vorliegenden Arbeit Kosten zugeordnet. Eine Übersicht über die Zusammensetzung der Gesamtkosten für den beschriebenen Anwendungsfall ist in der Abbildung 11 ersichtlich.

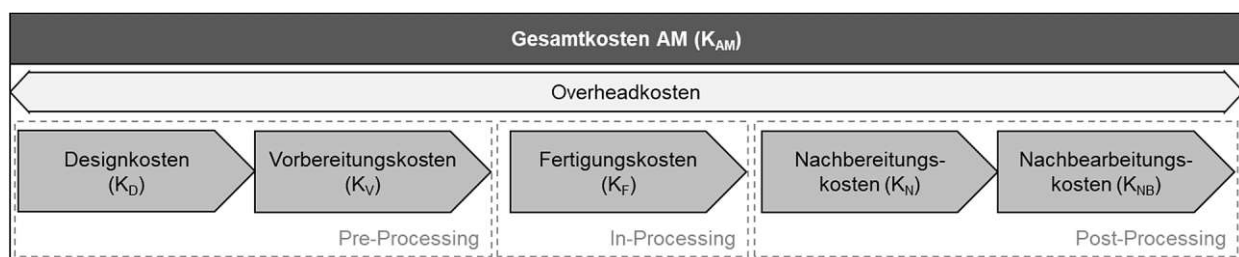


Abbildung 11: AM-Kosten bei der internen Nachfertigung durch Anlagenbetreiber (eigene Darstellung in Anlehnung an Rudolph 2018, S. 88; Baumers et al. 2016, S. 197; Baumers und Holweg 2019, S. 10; Cardeal et al. 2021, S. 213; Lindermann et al. 2012, S. 183; VDI 3405:2014-12 2014, S.6)

Die Gesamtkosten setzen sich demnach aus den Pre-, In- und Post-Processingkosten sowie Overheadkosten<sup>10</sup> zusammen. Die Kosten des Pre-Processings können in Design- und Vorbereitungskosten (siehe Formel 5) unterteilt werden. Unter Designkosten werden Kosten verstanden, die durch das notwendige Nach- oder Umkonstruieren vorliegender Ersatzteilzeichnungen beim Anlagenbetreiber anfallen.

$$K_D = k_p * t_D$$

mit

$K_D$  ... Vorbereitungskosten [€]

$t_D$  ... Designzeit [h]

$k_p$  ... Personalkostensatz [€/h]

#### Formel 4: Berechnung der Designkosten (eigene Darstellung)

In den Vorbereitungskosten sind alle Kosten enthalten, die der Bediener benötigt, um die Anlage für die Fertigung einzustellen (vgl. Cardeal et al. 2021, S. 213). Kostentreiber sind in diesem Fall die Aufwendungen für das Personal und die Maschine (siehe Formel 5).

$$K_V = (k_{\text{Maschine}} + k_p) * t_v$$

mit

$K_V$  ... Vorbereitungskosten [€/Artikel]

$t_v$  ... Vorbereitungszeit [h/Artikel]

$k_{\text{Maschine}}$  ... Maschinenkostensatz [€/h]

#### Formel 5: Berechnung der Vorbereitungskosten (vgl. Cardeal et al. 2021, S. 213)

Für die Berechnung der In-Processing-Kosten werden die Fertigungskosten errechnet. Die Zusammensetzung dieser Kostenart kann Formel 6 entnommen werden. Neben dem Zeitbezug des Maschinenkostensatzes (siehe Formel 8) fallen Materialkosten für das Roh- und Supportmaterial an. Außerdem werden Stromkosten berücksichtigt.

$$K_F = k_{\text{Maschine}} * t_F + m_M * P_M + t_F * E_V * P_E + m_S * P_S$$

mit

$K_F$  ... Fertigungskosten [€/Stk.]

$E_V$  ... Energieverbrauch [kWh/Stk.]

$t_F$  ... Fertigungszeit [h/Stk.]

$P_E$  ... Strompreis [€/kWh]

$m_M$  ... Masse Rohmaterial [kg/Stk.]

$m_S$  ... Masse Supportmaterial [kg/Stk.]

$P_M$  ... Preis Rohmaterial [€/kg]

$P_S$  ... Preis Supportmaterial [€/kg]

#### Formel 6: Berechnung der Fertigungskosten (vgl. Baumers et al. 2016, S. 197)

Nach der Fertigung lassen sich die Kosten des Post-Processing in Kosten der Nachbereitung und Nachbearbeitung differenzieren. Im Zuge der Nachbereitung müssen die meisten Maschinen abgekühlt, Materialreste entfernt und der Bauraum gereinigt werden (vgl. Cardeal et al. 2021, S. 213). Diese Kosten schlagen sich, wie in

<sup>10</sup> Kosten die einem Kostenträger nicht unmittelbar zugerechnet werden können. Diese sind als Gemeinkosten bekannt.

Formel 7 ersichtlich, hauptsächlich durch den Maschinen- und Personalkostensatz nieder.

$$K_N = (k_{\text{Maschine}} + k_P) * t_N$$

mit

$K_N$  ... Nachbereitungskosten [€/Stk.]

$t_N$  ... Nachbereitungszeit [h/Stk.]

**Formel 7: Berechnung der Nachbereitungskosten (vgl. Cardeal et al. 2021, S. 213)**

Auf die Nachbearbeitungskosten  $K_{NB}$  wird nicht näher eingegangen, da sie je nach AM-Verfahren und Bauteilanforderungen weitläufig sein können und im Zuge des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Potenzialbewertungsmodells (siehe Abschnitt 5) lediglich abgeschätzt werden.

Die nachfolgende Formel zeigt die Zusammensetzung des Maschinenkostensatzes. Dieser hat auf die in Abbildung 11 vorgestellten Prozessblöcke einen wesentlichen Einfluss. Neben der Abschreibung für Anlagen und der Berücksichtigung kalkulatorischer Zinsen werden Overheadkosten sowie Kosten für die Wartung und Betriebsmittel darin berücksichtigt.

$$k_{\text{maschine}} = \frac{K_{\text{AFA}} + K_Z + K_R + K_I + K_B + K_W}{T_n}$$

mit

$K_{\text{AFA}}$  ... Kosten der kalkulatorischen Abschreibung [€/a]

$K_B$  ... Betriebsstoffkosten [€/a]

$K_Z$  ... Kosten der kalkulatorischen Zinsen [€/a]

$K_W$  ... Werkzeugkosten [€/a]

$K_R$  ... Raumkosten [€/a]

$T_n$  ... Jährliche Nutzungsdauer der Anlage [h/a]

$K_I$  ... Instandhaltungskosten [€/a]

**Formel 8: Berechnung des Maschinenkostensatzes (vgl. Rudolph 2018, S. 88)**

Die für die Berechnung wichtigste Zeit ist die sogenannte Fertigungszeit. Sie wird durch die Division des erzeugten Volumens mit der durchschnittlichen Aufbaurrate ermittelt und kann näherungsweise zur Berechnung der Fertigungskosten herangezogen werden (vgl. Rudolph 2018, S. 98).

$$t_F = \frac{V_{BT} + V_S}{\vartheta}$$

mit

$V_{BT}$  ... Bauteilvolumen [cm<sup>3</sup>/Stk.]

$\vartheta$  ... Durchschnittliche Aufbaurrate [cm<sup>3</sup>/h]

$V_S$  ... Volumen Supportmaterial [cm<sup>3</sup>/Stk.]

**Formel 9: Berechnung der Fertigungszeit (vgl. Rudolph 2018, S. 98)**

Die Gesamtkosten zur Herstellung eines Ersatzteils mittels AM setzen sich ausgehend von den vorgestellten Berechnungen wie folgt zusammen (siehe Formel 10).

$$K_{AM} = \frac{K_D}{n} + \frac{K_V}{n_{Los}} + K_F + K_N + K_{NB}$$

mit

$K_{AM}$  ... Gesamtkosten [€/Stk.]

$n_{Los}$  ... Anzahl der Teile je Fertigungslos [Stk./Artikel]

$n$  ... Anzahl der Teile [Stk.]

$K_{NB}$  ... Nachbearbeitungskosten [€/Stk.]

#### Formel 10: Berechnung der Gesamtkosten (eigene Darstellung)

Auffällig ist, dass vor allem der Einfluss der Designkosten  $K_D$  von der produzierten Menge abhängt. Weiters muss angemerkt werden, dass Transportkosten und Lagerkosten für Ersatzteile und Rohstoffe unternehmensspezifisch ergänzt werden müssen.

Für tiefere Einblicke in die Materie lohnt sich die Literaturrecherche von Kadir et al. (vgl. 2020). In dieser sind sämtliche gängige AM-Kostenmodelle zusammengefasst.

## 2.4 Lebenszyklusmodelle

Die DIN 31051 (DIN 31051:2019-06 2019, S. 12) definiert den Lebenszyklus (englisches Pendant: Life Cycle – LC) als die *„Anzahl von Phasen, die ein Objekt, durchläuft, beginnend mit der Konzeption und endend mit der Entsorgung“*. Ein Objekt kann laut Norm ein *„Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Funktionseinheit, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann“* sein (DIN 31051:2019-06 2019, S. 7). Eine ähnliche Definition liefert die DIN 14001. Diese versteht unter dem Lebenszyklus eine *„aufeinander folgende und miteinander verknüpfte Phasen eines Produktsystems (oder Dienstleistungssystems), von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“* (DIN 14001:2015-11 2016, S. 19).

Der Zeitraum und die Phasen des Lebenszyklus hängen vom Betrachter sowie den betrachteten Objekten (z.B. Produkte, Anlagen, Technologien) ab. Für den Betreiber einer Anlage stellt sich der Lebenszyklus anders dar als für den Hersteller (vgl. Sendler 2009, S. 6–7). Sind Objekt und Betrachter definiert, lassen sich spezifische Lebenszyklusmodelle entwickeln. Diese beinhalten eine Strukturierung des Lebenszyklus durch eine Aufgliederung in Phasen oder Schritte, denen typische Eigenschaften, Aufgaben oder Entscheidungen zugeordnet werden. Außerdem werden in manchen Modellen Aussagen zu Verläufen von monetären Größen wie beispielsweise den Lebenszykluskosten getroffen. Lebenszyklusmodelle eignen sich für die Beschreibung grundlegender Zusammenhänge und dienen Unternehmen als Entscheidungshilfe (vgl. Schnieder 2018, S. 27). Wer den gesamten LC beherrscht, kann aus ökonomischer und ökologischer Sicht das Optimum für seine Produkte oder Prozesse finden (vgl. Sendler 2009, S. 9–10).

In der Literatur gibt es eine viele Varianten, wie ein Lebenszyklusmodell dargestellt werden kann. Wesentliche Ansätze für das Ersatzteilmanagement werden in Kapitel 3.2 zusammengefasst und diskutiert.



### 3 State of the Art

Dieser Abschnitt liefert eine Übersicht zum aktuellen Stand der Forschung bezogen auf die Themenfelder Ersatzteil-Lebenszyklusbetrachtung (siehe Abschnitt 3.2) und Potenzialbewertung von Ersatzteilen hinsichtlich der additiven Fertigung (siehe Abschnitt 3.3) im Schienenfahrzeugbereich. Dazu werden Ansätze aus der Wissenschaft vorgestellt und diskutiert sowie Lücken der wissenschaftlichen Literatur herausgearbeitet. Weiters wird eine Übersicht über Klassifizierungsmerkmale von Ersatzteilen für die Potenzialbewertung vorgestellt (siehe Abschnitt 3.3). Diese orientiert sich an den für diese Arbeit gesichteten Literaturquellen und dem Fachwissen von Ersatzteilexperten. Das Kapitel wird mit der Zusammenfassung der aktuellen Forschung und theoretischen Ansätzen der behandelten Themenkomplexe geschlossen (siehe Abschnitt 3.4).

#### 3.1 Vorgehensweise der Literaturrecherche

Um den Stand der Forschung zur in Abschnitt 1.2 dargestellten Problemstellung zu ermitteln, wird eine Literaturrecherche durchgeführt. In Abbildung 12 ist der systematische Aufbau der Literaturrecherche abgebildet.

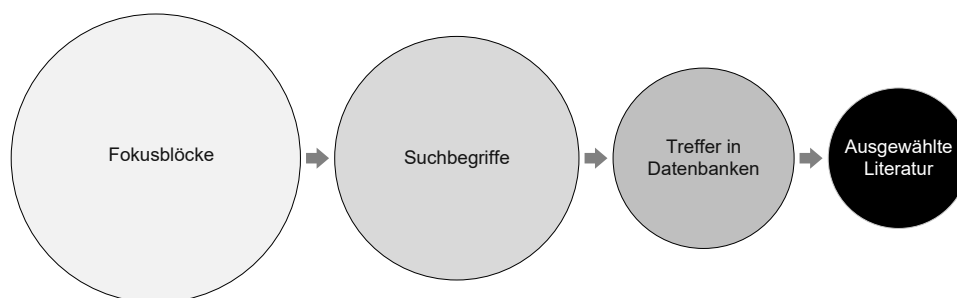


Abbildung 12: Aufbau der Literaturrecherche (eigene Darstellung)

Zu Beginn der Recherche werden aus den Forschungsfragen (siehe Abschnitt 1.3) und dem interdisziplinären Themenkomplex dieser Arbeit die drei voneinander abzugrenzenden Themenfelder und sogenannten Fokusblöcke „Ersatzteillebenszyklus“, „Ersatzteilbewertungsmodelle“ und „Ersatzteilmerkmale“ gebildet. Jedem Fokusblock können in weiterer Folge themenrelevante Suchbegriffe zur Darstellung des Wissensstands zugeordnet werden. Die definierten Suchbegriffe und Suchbegriffkombinationen sind der Tabelle 3 zu entnehmen.



Fokusblöcke		Suchbegriffe	Datenbanken	Zeitraum
Ersatzteil	Lebenszyklus	"Lebenszyklus" UND "Ersatzteil" "Lebenszyklus" UND "Ersatzteil" UND "Additive Fertigung" "Obsoleszenzmanagement" UND "Ersatzteil" UND "Lebenszyklus" "Lebenszyklus" UND "Schienenfahrzeugsektor" "Produktlebenszyklus" UND "Ersatzteil"	Google Scholar Science Direct	1960 - 2022
	Potentialbewertung	"Klassifizierung" UND "Ersatzteil" UND "Bewertung" "Ersatzteil" UND "Additive Fertigung" UND "Bewertung" "Automatisierung" UND "Klassifizierung" UND "Ersatzteil" "Bewertungsmethode" UND "Ersatzteil" UND "AM" "Bewertung" UND "Algorithmus" UND "Ersatzteil"	Springer Link Emerald Insight Elsevier Hanser eLibrary TU Wien Onlinebibliothek	
	Merkmale	"Ersatzteil" UND "Charakteristik" "Ersatzteil" UND "Klassifizierung" "Ersatzteil" UND "Merkmale" "Ersatzteil" UND "Merkmale" UND "Additive Fertigung"		

Tabelle 3: Methodik der Literaturanalyse (eigene Darstellung)

Die Basis der Literaturrecherche bilden die wissenschaftlichen Datenbanken (a) *Google Scholar*, (b) *Science Direct*, (c) *Springer Link*, (d) *Emerald Insight*, (e) *Elsevier*, (f) *Hanser eLibrary* sowie die (g) *TU Wien Onlinebibliothek*. Diese wurden mittels der angeführten Suchbegriffe hinsichtlich verfügbarer Literatur durchforstet. Sofern die identifizierten Publikationen nach einer ersten Sichtung von Titel, Zusammenfassung, Schlüsselwörtern und Anzahl der Aufrufe als geeignet erachtet wurden, konnten sie nach eingehender Prüfung auf Relevanz in den nachfolgenden Kapiteln aufgenommen werden. Neben der Betrachtung von deutsch- und englischsprachiger Literatur wurde der Publikationszeitraum auf den Zeitbereich von 1960 bis 2022 eingegrenzt.

### 3.2 Existierende Modelle von Lebenszyklusbetrachtungen im Ersatzteilmanagement

Das Produktlebenszyklusmodell wurde ursprünglich in den Wirtschaftswissenschaften im Bereich des Marketings entwickelt und lässt sich bis in die 1950er Jahre zurückverfolgen. Eines der bekanntesten Modelle stammt von Levitt (vgl. 1965). Dieses stellt erstmals den Zeitverlauf des Umsatzvolumens in definierten Marketingphasen dar. Im Laufe der Jahre wurde das Konzept der Lebenszyklusbetrachtung von anderen Forschungsdomänen aufgegriffen und gewann in diesen zunehmend an Bedeutung. Ende der 1960er Jahre initiierte das US-Verteidigungsministerium die ersten Lebenszykluskostenrechnungen und -bewertungen zur Senkung der staatlichen Beschaffungskosten von Waffensystemen (vgl. Gupta 1983). Unter anderem wurden die inkrementellen Gesamtkosten erstmals auf die Lebenszyklusphasen Entwicklung, Produktion, Nutzung und Entsorgung umgelegt. Mitte der 1980er-Jahre hat sich die Betrachtung der gesamten Lebensdauer eines einzelnen Produkts vom Entwurf über die Produktion, den Verkauf, die Nutzung, dem Service bis hin zur Entsorgung durchgesetzt. In weiterer Folge wurden immer mehr Erkenntnisse aus Lebenszyklusbetrachtungen gewonnen. Jovane et al. (vgl. 1993) führen in ihrem Konzept daher aus, dass jede durchlaufene Phase des

Lebenszyklus in der Konzeptionsphase berücksichtigt werden muss. Gegenwärtig werden Lebenszyklen neben der Lebenszykluskostenrechnung (englisches Pendant: Life Cycle Costing – LCC) vermehrt zur Nachhaltigkeitsbewertung in den Dimensionen „ökologisch“, „ökonomisch“ und „sozial“ herangezogen. In der aktuellen Literatur wird zwischen dem ursprünglichen Marketing- und dem später entstandenen Engineering-Lebenszyklus unterschieden (vgl. Cao und Folan 2012, S. 2–32). Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich den Lebenszyklus aus Sicht des Engineerings mit dem speziellen Fokus auf Ersatzteile.

Die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit Ersatzteillebenszyklen beschäftigen ist begrenzt. Ein Großteil der Modelle weist weiters Gemeinsamkeiten auf. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über zehn ausgewählte Werke zu diesem spezifischen Themenkomplex. In ersten drei Spalten sind die Autoren, der Jahrgang und der Inhalt der analysierten Arbeiten aufgelistet. Außerdem sind die von den Autoren behandelten Industriebereiche ersichtlich. Im rechten Block der Tabelle werden die Bereiche der Literaturanalyse „Fokus“, „Themenfeld“, „Perspektive“ und „LC-Charakteristik“ abgebildet. Deren Bewertung erfolgt nach der in der Abbildung angeführten Legende. Im Zuge der Analyse wird erfasst, ob die Lebenszyklusbetrachtungen auf Primärprodukte (a) und/oder Ersatzteile (b) beschränkt sind, in welchem fachlichen Kontext der Lebenszyklus untersucht wird (c-d) und welche Betrachtungsperspektive im Lebenszyklus (e-f) eingenommen wird. Außerdem wird auf ausgewählte Charakteristiken des Lebenszyklus (g-l) näher eingegangen. Spalte g („Entwicklungsverlauf“) zeigt an, inwieweit die vorgestellten Modelle die Entwicklung des Absatzes, des Verbrauchs/Bedarfs oder des Teileausfalls über den LC berücksichtigen. Außerdem werden die betrachteten Werke dahingehend untersucht, ob lebenszyklusrelevante Strategien (h) eingebettet und im spezielle AM-LC-Potenziale (i) abgeleitet werden. Bei den Spalten j bis l wird auf den Erfüllungsgrad der LC-Charakteristik eingegangen. Unter „Ganzheitlichkeit“ (j) wird verstanden, dass der gesamte Zyklus innerhalb der betrachteten Systemgrenzen liegt. Das Kriterium ist „vollständig erfüllt“, wenn vom Beginn bis zum Ende des Lebenszyklus jede Phase mitbetrachtet wird. Bei der „Granularität“ (k) wird der Detaillierungsgrad des Lebenszyklus bewertet. Je gröber die Phasen detailliert sind, desto weniger ist der Kreis gefüllt. Die Spalte l „Berücksichtigung Zeitverlauf“ beschreibt den Grad der Einordnung der LC-Phasen in konkrete Zeitabschnitte.

Legende:				Fokus		Themenfeld		Perspektive		LC-Charakteristik					
				a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)	j)	k)	l)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ nicht erfüllt</li> <li>◐ teilweise erfüllt</li> <li>● vollständig erfüllt</li> </ul> ✓ Enthalten * Nicht enthalten				Primärprodukt	Ersatzteil	Ersatzteilmanagement	Obsoleszenzmanagement	Kundensicht	Herstellersicht	Entwicklungsverlauf	Einbetten von Strategien	Identifizierung AM LC-Potenziale	Ganzheitlichkeit	Granularität	Berücksichtigung Zeitverlauf
Autor	Jahr	Inhalt	Branche												
Dombrowski et al.	2005	Lebenszyklusorientierte Kostenbetrachtung der Nachserienversorgung	Automobil/Luftfahrt	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	●	○	●
Carpentieri et al.	2007	Lebenszykluskostenrechnung und Teile-Klassifizierung	Fertigung (allgemein)	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	●	○	○
Barkawi et al.	2007	Geschäftsstrategien des Servicemanagements und der Ersatzteillogistik	Automobil/Maschinen & Anlagenbau	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	●	○	●
Dombrowski & Schulze	2008	Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement	Automobil	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	●	○	○
Geissbauer	2012	Industrielle Dienstleistungen im After-Service- und Ersatzteilbereich	Infrastruktur-/ Investitionsgüterbranche	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	○	○	○
Wagner	2012	Strategische Betrachtung der Ersatzteillogistik	Fertigung (allgemein)	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	●	○	●
VDI 2882	2018	Obsoleszenzmanagement Anlagenmanagement und Instandhaltung	Maschinen & Anlagenbau	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	●	○	●
Schnieder	2018	Strategisches Management von Fahrzeugflotten	Bahnwesen	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	●	○	●
Klug	2018	Logistikmanagement	Automobil	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	●	○	●
Poppe	2019	Geplante Obsoleszenz in der Produktentwicklung	Branchenübergreifend	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	●	○	●
Identifizierte Literatur	10	<b>Anzahl der übereinstimmenden Inhalte</b>		8	9	7	4	2	7	7	3	0			
		<b>relativ</b>		80%	90%	70%	40%	20%	70%	70%	30%	0%			

Tabelle 4: Wissenschaftliche Modelle zur LC-Betrachtung im EM und OM (eigene Darstellung)

Dombrowski et al. (vgl. 2005a) entwickeln ein Modell für ein lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement für die Nachserienversorgung von Elektronikkomponenten. Dieses verfolgt das Ziel dem Trend von verkürzten Serienzeiten bei gleichzeitig höher werdender technischer Lebensdauer von Primärprodukten entgegenzusteuern. Ziel ist es, den resultierenden Druck auf die kundenorientierte Ersatzteilversorgung zu reduzieren.

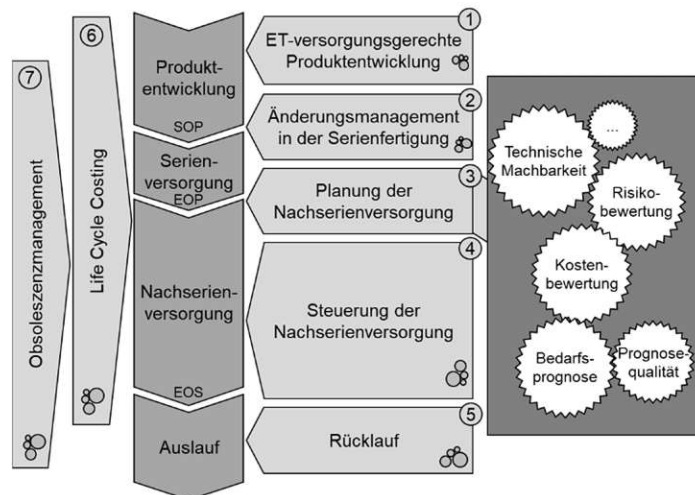


Abbildung 13: Modell eines lebenszyklusorientierten EM (vgl. Dombrowski et al. 2005a, S. 126)

Die Autoren definieren Prozessblöcke entlang des Lebenszyklus und unterteilen diese in zwei sich teilweise überschneidende Gruppen. Die erste Prozessgruppe dient der Zukunftsgestaltung für die spätere Ersatzteilversorgung. Die zweite Gruppe dient hauptsächlich der Bewältigung der Retrospektive. Durch den von Autoren vorgeschlagenen LCC-Ansatz können ausgehend von der Produktentwicklung Einsparungen in der Nachserienversorgung erzielt werden. Weiters verdeutlichen die Autoren grafisch die Herausforderungen aufeinanderfolgender oder teilweise parallel gefertigter Produktgenerationen und erörtern Charakteristika der einzelnen Phasen für die Entwicklung von Rahmenbedingungen im Verlauf der Produktlebenszyklen. Außerdem führen die Autoren aus, dass es in der Ersatzteilversorgung zu enormen Know-how-Verlusten durch einen über Jahre verzögerten Wissenstransfer kommen kann. In Anbetracht dieses Aspekts stellen die Autoren den notwendigen Wissenstransfer entlang des Produktlebenszyklus mit dem Schwerpunkt auf die Nachserienversorgung dar.

In ihrer Veröffentlichung eines lebenszyklusorientierten Kostenmodells für das Ersatzteilmanagement definieren Carpentieri et al. (vgl. 2007, S. 473) sechs aufeinanderfolgende Lebenszyklusphasen (Konzeption, Entwurf und Entwicklung, Herstellung, Inbetriebnahme, Einsatz und Wartung sowie Entsorgung) eines exemplarischen Bauteils über eine Zeitachse. Sie decken von der Konzeptionierung eines Teils bis zu dessen Entsorgung den gesamten Lebenszyklus grob ab. Auf die einzelnen Phasen wird in deren Kostenbewertung näher eingegangen.

Übergeordnetes Ziel deren Arbeit ist es, ausgehend vom Lebenszyklus auf die optimale Ersatzteilmenge zu schlussfolgern. Betriebskosten und Produktionsausfallkosten sollen mit dieser Herangehensweise minimiert werden. Nachteilig an ihrem entwickelten Lebenszyklus ist, dass dieser zu produktzentriert aufgebaut ist und weder die Perspektive des Herstellers noch des Kunden aufgreift (siehe Tabelle 4).

In der Monographie von Barkawi et al. (vgl. 2007) liegt der Fokus auf der Entwicklung von Geschäftsstrategien für das Servicemanagement und die Ersatzteillogistik im After-Sales-Bereich. Vergleichbar mit Dombrowski und Schulze (vgl. 2008) werden in ihrem Modell (siehe Abbildung 14) auf einem Zeitstrahl Punkte festgelegt. Neben den Zeitpunkten *Start of Production (SOP)*, *End of Production (EOP)* und *End of Delivery Obligation (EDO)* werden zusätzlich *End of Service (EOS)* und *End of Life (EOL)* definiert. Über den Zeitverlauf sind die Bestandsverläufe des Primärprodukts (PP) und der Ersatzteile (ET) aufgetragen. Bei den Bestandskurven unterscheiden die Autoren bei Ersatzteilen zwischen Schnelldrehern und Langsamdrehern. Außerdem stellen sie den Absatzverlauf des Primärprodukts dar. Barkawi et al. (vgl. 2007, S. 254) teilen den Lebenszyklus in drei Phasen ein. In der Einführungsphase steht die Erstausrüstung von Ersatzteilen zum Ausgleich möglicher Frühausfälle für das neu auf dem Markt erschienene Primärprodukt im Vordergrund. Die zweite Phase (Konsolidierungsphase) charakterisieren die Autoren durch einen konstanten Grundbestand an Primärprodukten mit höheren Verbrauchschwankungen in der Ersatzteilnachfrage. In der abschließenden Degenerationsphase wird ein starker Rückgang des Primärproduktbestands mit weiterhin hohem Ersatzteilbedarf verzeichnet. Auf Versorgungsstrategien des EM und das Thema Bauteilobsoleszenz wird von den Autoren nicht eingegangen.

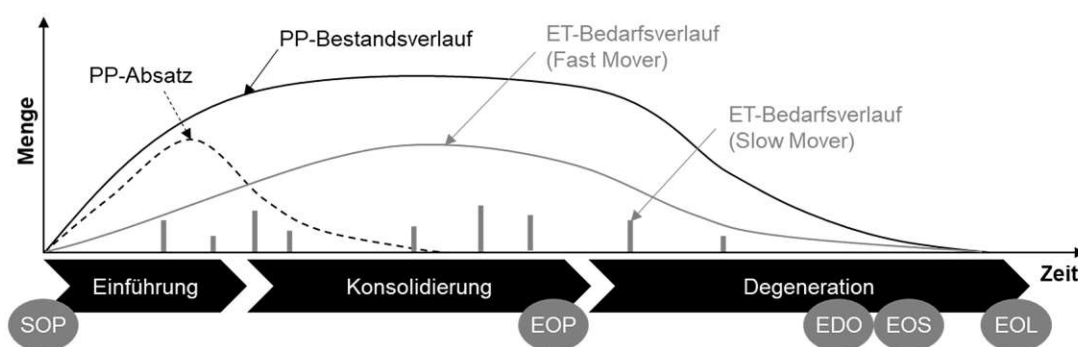


Abbildung 14: Schematische Bedarfszyklen entlang des Ersatzteilebenszyklus (vgl. Barkawi et al. 2007, S. 254)

Dombrowski und Schulze (vgl. 2008) beschäftigen sich in Ihrer Arbeit mit in langlebigen Primärprodukten verbauten innovationsstarken Bauteilen. Neben der Vorstellung einer Matrix zur Auswahl der richtigen Ersatzteilversorgungsstrategie, einer näheren Betrachtung des LCC von Ersatzteilen und dem Herausarbeiten zukünftiger Herausforderungen stellen die Autoren am Beispiel der Automobilbranche



den Lebenszyklus von Primärprodukten, Ausfall- und Verschleißteilen dar. Im Zuge dessen werden die drei Zeitpunkte *SOP*, *EOP* und *EDO* definiert und die Bedarfsverläufe im Zeitablauf aufgetragen. Die Stärke ihres Modells liegt vor allem auf der guten Übersichtlichkeit und der Thematisierung von Versorgungsstrategien. Ein wesentlicher Nachteil im Kontext der vorliegenden Arbeit ist der geringe Detaillierungsgrad (siehe Tabelle 4) und die sehr spezifische Ausrichtung ihrer Arbeit in der Automobilindustrie.

Geissbauer et al. (vgl. 2012) teilen den Lebenszyklus von Ersatzteilen in drei Phasen auf. Die Phasen werden anders als bei Barkawi et al. (vgl. 2007) aus Sicht der Serviceperspektive definiert und orientieren sich ebenfalls am Lebenszyklus des Primärproduktes. Als erstes erfolgt, bezugnehmend auf die Erörterungen von Geissbauer et al. (vgl. 2012), die sogenannte Anlaufphase. Den zweiten Lebenszyklusabschnitt bezeichnen die Autoren als Volumens- und Kommerzialisierungsphase, gefolgt von der *End of Life-Phase*. In ihrer Darstellung sind über den Zeitverlauf einerseits der Preis und andererseits die Absatzmenge abgebildet. Weiters werden Handlungspotenziale zur Auflösung oder Weiterverfolgung der Ersatzteillebenszyklus für den Kunden eingezeichnet. Neben dem Ersatzteillebenszyklus präsentierten Geissbauer et al. (vgl. 2012) einen siebenstufigen Produktlebenszyklus und erarbeiten Service-Strategien für Hersteller.

Ein dreistufiges Modell zur Entwicklung einer effizienten Ersatzteillogistikstrategie wird in der Literatur von Wagner et al. (vgl. 2012) vorgestellt. Auf Grundlage mehrerer Fallstudien mit Herstellern aus dem Maschinen- und Anlagenbau werden Schlüsselkomponenten einer geeigneten Ersatzteillogistikstrategie evaluiert. Im Zuge dessen erfolgt die Präsentation zweier unterschiedlicher Betrachtungsweisen des Produktlebenszyklus. Bei beiden Varianten werden dieselben Zeitpunkte wie in dem Werk von Barkawi et al. (vgl. 2007, S. 254) verwendet. Abbildung 15 zeigt die Einteilung des Produktlebenszyklus von Reparatur- und Verschleißteilen nach Wagner et al. (vgl. 2012, S. 82–85). Die Gliederung erfolgt in den drei Phasen *Forschung und Entwicklung*, *Produktion* und *Nutzung*. Auf der Ordinate ist das Verkaufsvolumen aufgetragen.

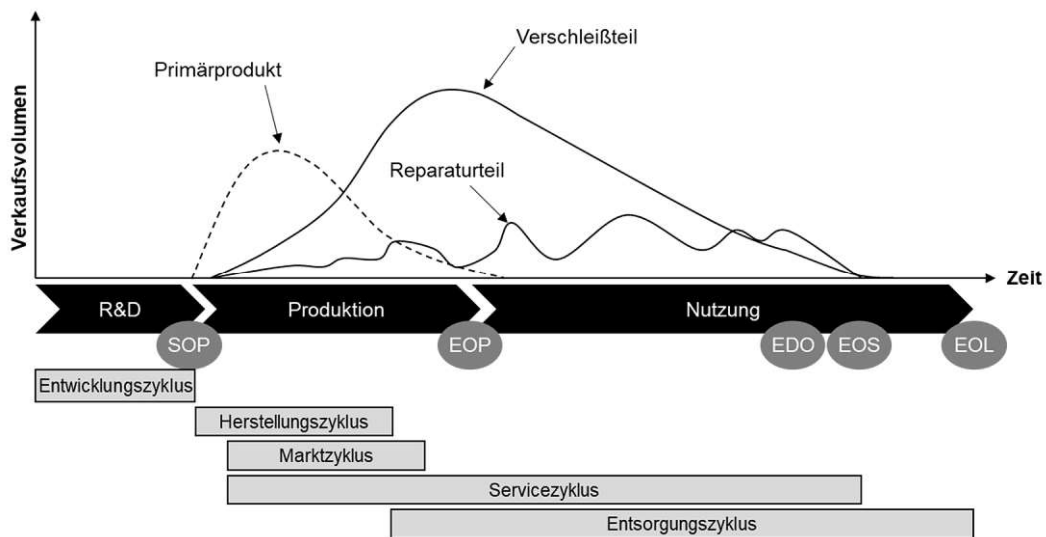


Abbildung 15: Produktlebenszyklusmodell von Ersatzteilen (vgl. Wagner et al. 2012, S. 82)

Diese Lebenszyklusperspektive (siehe Abbildung 15) bildet die Grundlage für die Planung und Ausrichtung von Ersatzteillogistikstrategien. Mithilfe der Praxiserfahrung der Referenzunternehmen in der von Wagner et al. (vgl. 2012) durchgeführten Fallstudie werden für jede Phase des Lebenszyklus mögliche Strategien diskutiert, um eine Ersatzteilversorgung gewährleisten zu können. Der Fokus der strategischen Ausrichtung liegt aufseiten der Hersteller.

In der VDI 2882 (vgl. VDI 2882:2018-05 2018) wird der von Schnieder (vgl. 2018, S. 222) dargestellte zeitliche Verzug des Informationsflusses bei Produktabkündigungen entlang der Supply Chain dargestellt. Außerdem wird auf die möglichen Strategien des OM detailliert eingegangen (siehe Abschnitt 2.2). In Abbildung 16 ist der Produktlebenszyklus von System/Anlage und deren Komponenten unter Berücksichtigung der Teileverfügbarkeit illustriert. Anzumerken ist, dass in der Norm der Zeitpunkt *EOS* zu *End of Service and Repair (EOSR)* abgewandelt wird.

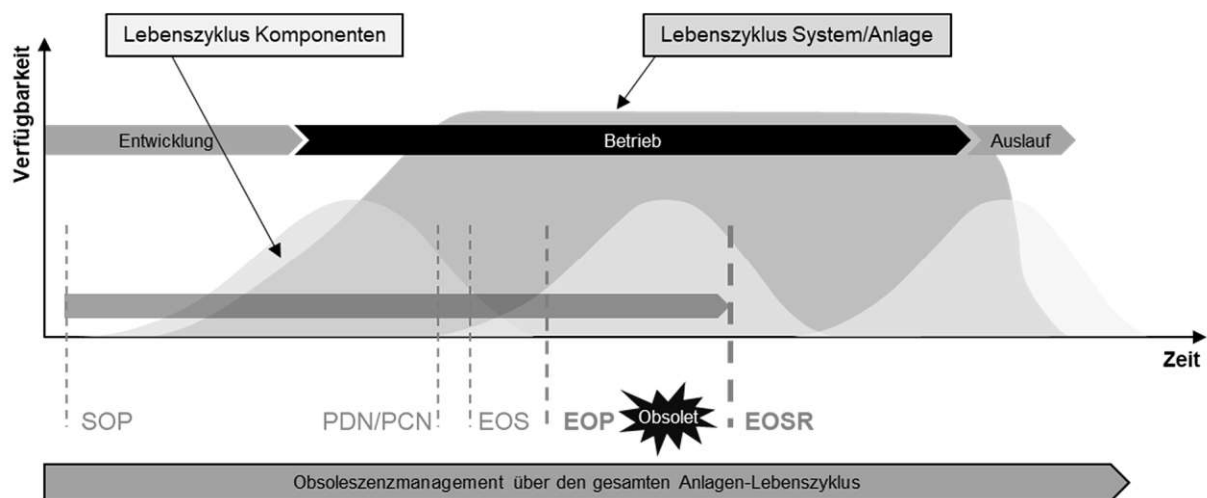


Abbildung 16: Anlagen- und Komponentenlebenszyklusmodell nach der Verfügbarkeit (vgl. VDI 2882:2018-05 2018)



Die Arbeit von Schnieder (vgl. 2018) zum Thema „*Strategisches Management von Fahrzeugflotten im öffentlichen Personenverkehr*“ beschäftigt sich neben dem Qualitätsmanagement, Kostenmanagement und Zulassungsmanagement unter anderem mit dem Lebenszyklus von Ersatzteilen im Rahmen des OM von Schienenfahrzeugbetreibern (SFB). In dieser Lebenszyklusbetrachtung wird sowohl die Perspektive des Herstellers als auch die des Betreibers miteinbezogen und über einem Zeitstrahl aufgetragen. Wie aus Abbildung 17 entnommen werden kann, legt sich der Autor auf vergleichbare Zeitpunkte, wie in den Werken von Barkawi et al. (vgl. 2007, S. 254), Dombrowski und Schulze (vgl. 2008, S. 442) und Wagner et al. (vgl. 2012, S. 82) definiert werden, fest.

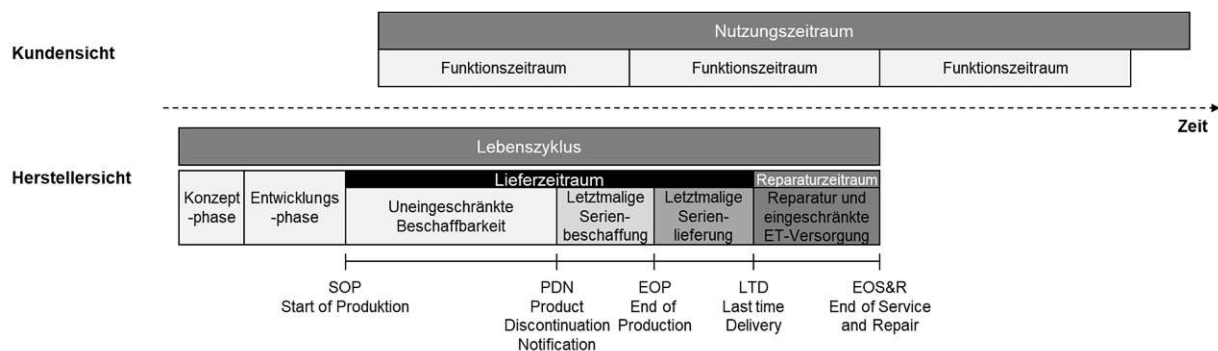


Abbildung 17: Lebenszyklusbetrachtung als Grundlage für das OM (vgl. Schnieder 2018, S. 222)

Die zeitliche Überlappung des Lebenszyklus aus Herstellersicht und der tatsächlichen Nutzungsdauer des SF verdeutlicht die Bedeutsamkeit eines praxistauglichen OM. Vorteil des Modells ist die ganzheitliche Betrachtung von Hersteller und Kunden. Leider wird auf Handlungsoptionen aus Sicht des EM unzureichend eingegangen (siehe Tabelle 4).

Aus der Perspektive von Automobilherstellern teilt Klug (vgl. 2018, S. 498) den Ersatzteilbedarf in die selben drei Lebenszyklusphasen wie Barkawi et al. (vgl. 2007, S. 254) ein. Nach der Degenerationsphase kommt es laut dem Autor zu einer Umstellung von Serienbezug zu Ersatzteilbezug und demzufolge sinken die Fertigungslosgrößen beim Hersteller um ein Vielfaches. Im Anschluss an die Beendigung des Produktlebenszyklus ist die Bevorratung von Ersatzteilen für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeuges vorzusehen, da aus rechtlichen Gründen Automobilhersteller verpflichtet sind, die Ersatzteilversorgung ihrer Fahrzeuge bis zehn Jahre nach Serienauslauf zu gewährleisten. Die größte Schwierigkeit sowohl für den Hersteller als auch den Betreiber liegt laut Klug (vgl. 2018, S. 498) in der Langfristigkeit des Planungshorizonts, die mit hohen Unsicherheiten einhergeht.

Poppe und Longmuß (vgl. 2019) greifen in ihrer systemkritischen Arbeit das kontroverse Themenfeld der „geplanten Obsoleszenz“ auf und evaluieren das Konfliktfeld zwischen Verbrauchern, Herstellern und Umweltschutz. Sie gehen auf die

Auswirkungen von verkürzten Marktlaufrzeiten im Bereich der Halbleitertechnologie ein und identifizierten eine branchenübergreifende Lebenszyklusdiskrepanz. Deren Modell ist in Abbildung 18 illustriert.

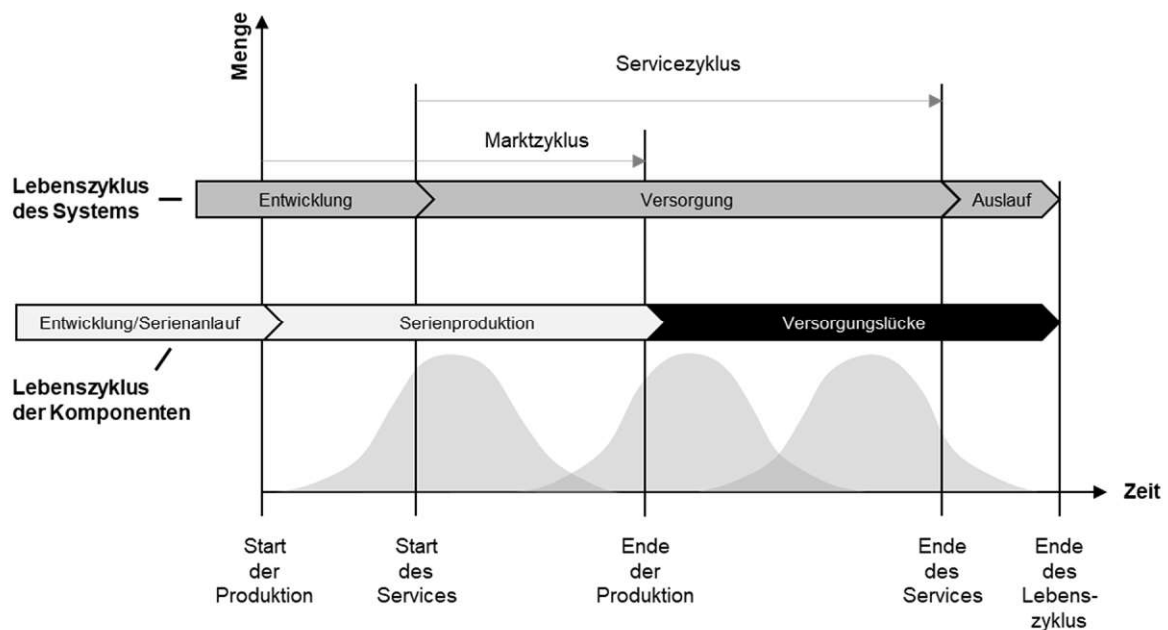


Abbildung 18: Generisches Lebenszyklusmodell für Systeme und Komponenten (vgl. Poppe und Longmuß 2019, S. 127)

Die Einteilung des Lebenszyklus erfolgt einerseits aus systemtechnischer und andererseits aus komponententechnischer Sicht und entspricht der in der Literatur gängigen Einteilung von Zeitpunkten entlang der Zeitachse. Zusätzlich wird der Lebenszyklus in Markt- und Servicezyklus eingeteilt. Auffallend ist die identifizierte Versorgungslücke nach dem Ende der Produktion ausgehend vom Periodenbedarf. Weiters führen die Autoren aus, dass selbst wenn Komponenten um Spezifikationen geändert werden, es in zulassungspflichtigen Bereichen wie dem Personennah- und Fernverkehr zu Problemen kommen kann.

### 3.3 Existierende Modelle zur Klassifizierung und Potenzialbewertung von Ersatzteilen für die additive Fertigung

In Abschnitt 3.3.1 wird der aktuelle Stand der Wissenschaft bezüglich der Bewertung und Identifizierung des Potenzials von Ersatzteilen für die additive Fertigung betrachtet. Grundlage dieser Bewertung liefern Modelle zur Klassifizierung und Selektion von Ersatzteilspektren. Auf diese wird in Abschnitt 3.3.1 näher eingegangen. Da es in der Praxis üblich ist, bei der AM-Bauteilbewertung und Ersatzteilklassifizierung mit Merkmalen und deren Ausprägungen zu arbeiten, werden

in Abschnitt 3.3.2 der aktuelle Stand der Forschung und Ansätze aus der Praxis gegenübergestellt.

### 3.3.1 Klassifizierung und AM Potenzialbewertung

Da wenige Forschungsarbeiten zur Potenzialbewertung der additiven Fertigung im Themenspektrum des Ersatzteilmanagements existieren, werden in diesem Abschnitt auch weitere relevante Ansätze aus der Literatur im Bereich AM-Bauteilbewertung aufgegriffen. Zu Beginn werden Vorgehensweisen zur Klassifizierung von Ersatzteilen präsentiert. Im weiteren Verlauf wird in Tabelle 5 auf ausgewählte AM-Bewertungsmodelle eingegangen.

Ein großer Anteil der Klassifizierungsmodelle beschäftigt sich mit dem Clustering von Ersatzteilen für die Optimierung der Materialdisposition. In der Literatur werden multikriterielle Klassifizierungsmethoden verwendet (vgl. Bacchetti und Sacconi 2012). Eindimensionale Klassifizierungen, wie die Einteilung nach einer ABC-Analyse (vgl. Gelders und van Looy 1978; vgl. Syntetos et al. 2009), gehören aufgrund der steigenden Komplexität im Ersatzteilwesen der Vergangenheit an. In der Literatur werden mathematische Modelle und multidimensionale Erweiterungen der ABC-Klassifizierung als wesentlich treffsicherer erachtet. Die Ansätze reichen von Matrixmodellen (vgl. Duchessi et al. 1988; vgl. Flores und Whybark 1989) über den Einsatz von gewichteter linearer Optimierung (vgl. Ramanathan 2006; vgl. Zhou und Fan 2007; vgl. Ng 2007), über die Verwendung künstlicher neuronaler Netze (vgl. Partovi und Anandarajan 2002) bis hin zu abstandsbasierenden Methoden die mit gewichteten euklidischen Distanzen (vgl. Chen et al. 2008) sowie der Fuzzy-Logik<sup>11</sup> arbeiten (vgl. Chu et al. 2008; vgl. Cakir und Canbolat 2008). Frandsen et al. (vgl. 2020) führen in ihrer Arbeit weitere Klassifizierungsverfahren wie beispielsweise den paarweisen Vergleich, Outranking, Kompromiss-Rankings und die regelbasierte Entscheidungsfindung an. Klassifizierungen nach den vorgestellten Methoden zur AM-Potenzialbewertung kommen in der Literatur selten vor.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche zur Klassifizierung und Potenzialbewertung von Bauteilen dargestellt. Zu diesem Zweck werden alle relevanten methodischen Ansätze aufgelistet und die jeweiligen Schwerpunkte identifiziert sowie nach der für die Potenzialbewertung bedeutsamen Kriterien abgegrenzt.

---

<sup>11</sup> Im Gegensatz zur binären Logik, bei welcher ein Zustand entweder mit 0 oder 1 beschrieben wird, ermöglicht die Fuzzy-Logik Werte dazwischen.

Legende			Inhalt		Klassifizierung					Bewertung							Daten		
			a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)	j)	k)	l)	m)	n)	o)	p)	q)
✓ Enthalten * Nicht enthalten			Ersatzteilmanagement	Potenzialbewertung AM	Einsatz von klassischen Analysen (ABC etc.)	Mathematische Modelle und Statistik	Literaturrecherche zur Festlegung von Merkmalen	Anzahl betrachteter Merkmale und Kriterien	Technische Bewertung der Teile	Ökonomische Bewertung der Teile	Ökologische Bewertung der Teile	Reihung der Teile nach Potenzial	Vergleich AM mit CM	Automatisierte Auswertung	Entwicklung einer Applikation	Berücksichtigung des Lebenszyklus	Schnittstelle zu ERP-Daten	Schnittstelle zu technischen Zeichnungen (2D- oder 3D-Format)	Manuell zusammengestellt
Autor	Jahr	Themenfeld	✗	✓	✗	✓	✗	7	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✓
Simkin und Wang	2014	Kosten-Nutzen-Analysen für Endfertigungsteile	✗	✓	✗	✗	✗	13	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Lindemann et al.	2015	Nachhaltige und wirtschaftliche Auswahl von Bauteilkandidaten für AM	✓	✓	✗	✓	✗	8	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Knofius et al.	2016	Auswahl von Ersatzteilen für die additive Fertigung	✗	✓	✗	✗	✗	8	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Burkhardt & Aurich	2017	Bauteilidentifikation in der additiven Fertigung	✗	✓	✗	✗	✗	8	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Rudolph	2018	Cloudbasierte Potenzialerschließung in der additiven Fertigung	✗	✓	✗	✗	✗	-	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Ilg	2019	Systematische Eignungsanalyse	✗	✓	✗	✗	✓	27	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Shepherd & Meisel	2019	Identifizierung von Teilen für AM	✗	✓	✗	✗	✓	17	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Schlögel et al.	2021	Entscheidungsverfahren additive Fertigung	✓	✓	✓	✗	✗	15	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Identifizierte Literaturquellen	8	Anzahl der übereinstimmenden Inhalte	2	8	1	2	2	5	8	1	2	4	3	2	2	2	1	6	
		relativ	25%	100%	13%	25%	25%	63%	100%	13%	25%	50%	38%	25%	25%	25%	13%	75%	

Tabelle 5: Wissenschaftliche Ansätze zur AM-Bewertung von Bauteilen (eigene Darstellung)

Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 5 für jede Spalte a bis q die Summe aller übereinstimmenden Inhalte gebildet und in Relation zur Anzahl der dargestellten Literaturquellen gesetzt. Auffällig ist in diesem Kontext, dass lediglich 25 Prozent der betrachteten wissenschaftlichen Arbeiten den Ersatzteilbereich (a) behandeln und sich der Rest ausschließlich mit der Potenzialbewertung von Bauteilen im Allgemeinen beschäftigt (b). Tabelle 5 verdeutlicht, dass für die Potenzialbewertung, die im Rahmen der Klassifizierung gängigen Analysen (c) und mathematischen Modelle (d) kaum zum Einsatz kommen. Von acht betrachteten Studien führen lediglich zwei Publikationen eine Literaturrecherche (e) zur Festlegung von Bewertungskriterien (Merkmale) durch. Die meisten Autoren haben sich bei der Auswahl von Kriterien und Merkmalen im Vorhinein an die in den Case Studies beteiligten Unternehmen gehalten oder diese willkürlich festgelegt. In Summe arbeitet die Hälfte der betrachteten Papers mit über zehn Merkmalen (f) zur Bewertung von Teilen. Bei näherer Betrachtung der Bewertungsmodelle ist festzustellen, dass sich 100 Prozent der Literatur mit der wirtschaftlichen (h), 63 Prozent mit der technischen (g) und 13 Prozent mit der ökologischen (i) Bewertung von Bauteilen beschäftigen. Ausschließlich in zwei Arbeiten werden die Teile gegeneinander gerankt und gereiht (j). Weiters beschäftigt sich die Hälfte der ausgewählten Literaturquellen mit dem Vergleich der additiven mit der konventionellen Fertigung (k). Dieser Vergleich findet anhand von Kostenaspekten statt. Lediglich drei Veröffentlichungen greifen einen automatisierten Bewertungsansatz auf (l). Bei Betrachtung von Spalte (m) fällt auf, dass lediglich in zwei wissenschaftlichen Arbeiten eine anwendungsbezogene App entwickelt wird. Außerdem ist ersichtlich, dass der gesamte Bauteil-Lebenszyklus (n) von einem Großteil der Modelle nicht aufgegriffen wird. Weiters werden in 75 Prozent der Arbeiten für die Bewertung Datenquellen manuell zusammengeführt (q) und keine automatisierten Datenschnittstellen zu Unternehmensdatenbanken implementiert (o). Ein direkter Zugriff auf technische Zeichnungen zur Informationsextraktion findet lediglich in einer Arbeit statt (p).

Simkin und Wang (vgl. 2014) ermitteln sieben herausfordernde Szenarien der Supply Chain, für die die additive Fertigung eine kosteneffiziente Lösung darstellen kann. Diese Szenarien sind „hohe Herstellkosten/Originalteilkosten“, „lange Durchlaufzeiten“, „hohe Lagerhaltungskosten“, „Lieferantenabhängigkeit“, „entfernte Standorte“, „hohe Import-/Exportkosten“ und „schlechte Bauteilfunktionalität“. Für Teile, die im Zuge eines oder mehrerer dieser Szenarien identifiziert werden, empfehlen Simkin und Wang (vgl. 2014, S. 1) eine detaillierte, quantitative Kosten-Nutzen-Analyse. Dazu entwickelten die Autoren mit dem Unternehmen *Senvol* einen Algorithmus. Dieser analysiert eine Reihe von Variablen entlang des Produktlebenszyklus und vergleicht AM-Kosten mit dem Status quo der konventionellen Fertigung. Die Autoren führen aus, dass es keine andere Möglichkeit gibt, als die gesamte Lieferkette und den Produktlebenszyklus eines Teiles zu bewerten, um es schließlich drucken zu lassen. Neben einer Vielzahl an Vorteilen

weist die betrachtete Arbeit Defizite in der technischen Bewertung von Bauteilen auf. Außerdem kann im vorgestellten Modell nicht automatisiert auf Unternehmensdatenbanken zugegriffen werden.

Eine weitere Methode zur Identifizierung druckbarer Bauteile liefern Lindemann et al. (vgl. 2015). In ihrer Arbeit beschreiben sie ein Workshop-Konzept mit mehreren Phasen. In diesen analysieren Konstrukteure und Experten Teile auf ihre Druck-Kompatibilität. Zu Beginn werden Teilnehmer der Workshops mit der additiven Fertigungstechnologie näher vertraut gemacht und der Prozess der Teileauswahl erläutert. In weiterer Folge werden potenzielle Teile von den Teilnehmern in der sogenannten Trade-off-Methodenmatrix (TOM) erfasst. Der Zweck der TOM ist ein Screening von Teilen hinsichtlich der Potenziale für die additive Fertigung. Im oberen Teil der Matrix werden die zu betrachtenden Einzelteile beschrieben. Typische Angaben sind eine Kurzbeschreibung der Funktion, typische Produktionsmengen, Produktionskosten, Abmessungen, die Masse des Teils sowie das aktuell verwendete Material. Die aus dem ersten Workshop vorgeschlagenen Teile werden während eines zweiten Workshops von AM-Experten bewertet. Während dieser Bewertungsphase werden die Vorschläge anhand der folgenden Designaspekte eingestuft: Größenbeschränkungen, Teileklassifizierung, Unterdrückung von Baugruppen, Nachbearbeitungsbedarf, bestehende Materialverwendung in der Industrie, Geometriebedingungen, Materialeigenschaften, Materialverbrauch und Bearbeitungszeit. Die drei geeignetsten Teile werden in einem abschließenden Workshop auf Materialverträglichkeit, Materialverbrauch, Bearbeitungszeit und wirtschaftliche Aspekte überprüft. Dieser Ansatz bietet eine strukturierte Methode, um die in Frage kommenden Teile herauszufiltern und die Hauptfunktionen eines Teils zu ermitteln. Nachteilig erweist sich im Modell von Lindemann et al. (vgl. 2015) der geringe Automatisierungsgrad (siehe Tabelle 5) des Bauteilscreenings.

Einen datengetriebenen Ansatz zur Potenzialbewertung von Ersatzteilen liefern Knofius et al. (vgl. 2016). Sie führen in ihrer Veröffentlichung aus, dass ein Bottom-Up-Ansatz lediglich bei einer geringen Teileanzahl zielführend ist, und es durch die individuelle Bewertung von Experten zu Verzerrungen kommen kann. Die Autoren haben aus diesem Grund einen Top-Down-Ansatz entwickelt, bei dem ein großes Teilespektrum betrachtet werden kann und eine Rangfolge abhängig vom Druck-Potenzial eines Teiles aus Sicht des Supply Chain Managements gebildet wird. Die Autoren legen im ersten Schritt eine Vorselektion mittels Go/No-Go-Attributen fest, um festzustellen, welche Ersatzteile den technologischen Anforderungen entsprechen. In weiterer Folge werden neben bedeutsamen identifizierten Ersatzteilattributen die Unternehmensziele über einen paarweisen Vergleich nach der Logik des analytischen Hierarchieprozesses (englisches Pendant: Analytic Hierarchy Process – AHP) berücksichtigt. Je nachdem, wie die Attribute mit den Unternehmenszielen übereinstimmen, erfolgt die Gewichtung der Ersatzteilattribute. Schließlich werden auf



Grundlage der Attributgewichte und -werte Durchschnittswerte für jedes Ersatzteil errechnet, und die Teile innerhalb des analysierten Ersatzteilsortiments eingestuft. Die entwickelte Methode ermöglicht es Unternehmen, die vielversprechendsten Ersatzteile priorisiert zu bewerten. Der Top-Down-Ansatz wird in einem Use Case durch den Einsatz einer Datenbank mit über 100.000 Ersatzteilen für die Servicelogistik validiert und lieferte mehr als 1.000 potenzielle druckbare Teile. Der große Vorteil dieses Modells liegt in der automatisierten Ausführung mit ERP-Anbindung. Nachteilig wirkt sich das Fehlen einer Applikation für den laufenden Betrieb aus. Außerdem werden technische Daten aus Zeichnungen und 3D-Modellen nicht in der Bewertung berücksichtigt (siehe Tabelle 5).

Ein Vorgehen zur Identifikation von geeigneten Bauteilen für das SLM-Verfahren wird in der Veröffentlichung von Burkhart und Aurich (vgl. 2017) vorgestellt. Die Autoren beschäftigen sich hauptsächlich damit, an Bauteilen Verbesserungspotenziale der additiven gegenüber der konventionellen Fertigung zu identifizieren und zu bewerten. Dazu wird eine Vorgehensweise entwickelt, bei der definierte Kriterien zur Analyse bewertet werden. Die Beurteilungen der Kriterien erfolgen in ihrem Vorgehensmodell manuell durch einen Mitarbeiter. Als Ergebnis der Analyse erhält der Anwender eine Abschätzung zur technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit für das Bauteil. Anzumerken ist, dass die Güte der Bewertung vom Wissenstand und der Erfahrung des Mitarbeiters abhängt. Das Vorgehen zur Bauteilidentifikation wird in der Arbeit von Burkhart und Aurich (vgl. 2017) am Beispiel eines zu fertigenden Spritzgusswerkzeugs validiert und eignet sich nicht für die automatisierte Bewertung von Ersatzteilspektren.

Die Arbeit von Rudolph (vgl. 2018) beschäftigt sich mit Methoden zur Potenzialerschließung von Bauteilen für die additive Fertigung über eine cloudbasierte Plattform. Die Methodik umfasst die Prüfung auf Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien, eine Angebots- und Vorkalkulation, eine Bewertung von Potenzialen durch Bauteiloptimierung und einen Kostenvergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren wie Zerspanung und Guss. Das Modell ermöglicht eine integrierte Bauteilsichtung und -selektion nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In deren Arbeit wird insbesondere das additive Fertigungsverfahren des selektiven Laserstahlschmelzens zur Herstellung metallischer Bauteile betrachtet. Darüber hinaus wird die Architektur des prototypisch implementierten Gesamtsystems der Webanwendung skizziert.

Ilg (vgl. 2019) präsentiert in seiner Monographie ein strukturiertes Vorgehensmodell zur Überprüfung der Eignung eines Produktes für die additive Fertigung. Kern und Ausgangspunkt seines Modells ist die Produkteignungsmatrix. Diese besteht aus den vier Themenfeldern „Technik und Entwicklung“, „Beschaffung“, „Produktion“ und „Distribution“. Die Themenfelder umfassen 28 Kriterien zu denen der Anwender Fragen über eine vierstufige Antwortskala von „trifft nicht zu“ bis „trifft zu“ bewertet.



Durch eine kumulierte Auswertung der Antworten mit Punktwerten liefert die Produkteignungsmatrix als Ergebnis ein Balkendiagramm zu den vier definierten Themenfeldern. Daraus ergibt sich eine Abschätzung über die Bauteileignung für die additive Fertigung. Ist die Eignung gegeben, wird ein paarweiser Vergleich in Verbindung mit einer Nutzwertanalyse, um das geeignetste Druckverfahren festzulegen, durchgeführt. In weiterer Folge wird ein geeignetes Material gewählt, Prototypen additiv gefertigt und eine qualitative, fertigungstechnische und wirtschaftliche Analyse durchgeführt. Können alle Ebenen der systematischen Eignungsanalyse durchlaufen werden, ist es nach Ilg (vgl. 2019, S. 81) sinnvoll, das betreffende Teil additiv zu fertigen. Ein Nachteil des Modells besteht darin, dass Ersatzteilexperten für jedes einzelne Teil die Eignungsanalyse durchführen müssen und das Modell für eine automatisierte datenbankgetriebene Auswertung nicht geeignet ist. Eine Klassifizierung von Teilespektren ist durch die 28 erhobenen Kriterien möglich, wird im Kontext des Ersatzteilmanagements aber nicht durchgeführt.

Shepherd und Meisel (vgl. 2019) beschäftigen sich in ihrer Arbeit wie Knofius et al. (vgl. 2016) mit einem Top-down-Ansatz. Die Autoren legen in ihrem Modell die drei Kategorien „hoher Einfluss auf die additive Fertigung“, „mittlerer Einfluss auf die additive Fertigung“ und „geringer Einfluss auf die additive Fertigung“ fest und ordnen diesen Bereichen konstruktionsrelevante Parameter zu. Ziel ist es, Teile aus einer Liste, die sich ohne Designänderungen für die additive Fertigung eignen, zu identifizieren. Dies erfolgt über mehrere Filterungsstufen. In der ersten Stufe filtern Shepherd und Meisel (vgl. 2019, S. 39–42) beispielsweise in ihrer durchgeführten Case Study im Bereich der Luft- und Raumfahrtbranche Normteile, kommerzielle Standardteile, Baugruppen, Teile mit ungünstigem Material, Belastungsbedingungen, Größenbedingungen und Kosten heraus (Kategorie eins). In Kombination mit zwei weiteren Filterungsstufen nach Kategorie zwei und drei, kann eine große Anzahl an Teilen in kurzer Zeit ausgeschlossen werden. Die Einteilung der Bauteile erfolgt in „druckbar“, „leicht veränderbar“, „nicht druckbar“ und „weitere Informationen erforderlich“. Für das Modell der Autoren sprechen der hohe Automatisierungsgrad und die effiziente Vorselektion über Filter. Als nachteilig erweist sich die geringe Implikationsmöglichkeit bei Unternehmen da für die Auswertung die Daten manuell zusammengetragen und teilweise extra erhoben werden müssen.

Schlögel et al. (vgl. 2021) kombinieren die klassische ABC-Analyse mit einer QRS-Analyse zur Vorklassifizierung von Ersatzteilen für AM oder CM. Bei der QRS-Analyse handelt sich um eine modifizierte XYZ-Analyse (siehe Abschnitt 2.1.3.6), die im Gegensatz zum Verbrauch mit der Lieferzeit arbeitet. Nach der ABC-QRS-Analyse wird eine Potenzialbewertung der selektierten Teile mithilfe unterschiedlicher Kriterien durchgeführt. Vergleichbar mit Ilg (vgl. 2019) wird die Ausprägung der Kriterien über eine Skala bewertet. Jedes Ersatzteil muss einzeln ausgewertet werden. Über einen

Punkteschlüssel wird festgelegt, welche Teile sich für AM eignen und das passende Verfahren gesucht.

### 3.3.2 Ersatzteilmerkmale zur Klassifizierung

Um Ersatzteile zu klassifizieren und zur Bewertung ihrer Eignung für AM bedarf es laut Frandsen et al. (vgl. 2020, S. 24) ausgewählter Kriterien. Daher werden in diesem Abschnitt die bedeutsamsten Merkmale, die für eine aussagekräftige Ersatzteilklassifizierung und -bewertung benötigt werden, aufbereitet und vorgestellt. Insgesamt wurden 74 Papers analysiert und aus diesen 59 unterschiedliche Merkmale abgeleitet. Ausgangspunkt sind die drei Literaturrecherchen von Frandsen et al. (vgl. 2020), Bacchetti und Saccani (vgl. 2012) und Roda et al. (vgl. 2014), die einen großen Teil der verfügbaren Literatur abdecken. Die darin enthaltenen Merkmale werden in einer Merkmalliste (siehe Tabelle 6) aufgenommen. Da es zwischen den Literaturrecherchen Überschneidungen gibt, wurden Mehrfacherfassungen für die Auswertung in der Merkmalliste entfernt. Im Zuge der weiteren Recherche wurden aktuellere und von den drei Autoren nicht betrachtete Quellen identifiziert. Tabelle 6 wird um diese erweitert. Abbildung 19 zeigt, wie die festgelegten Merkmale aus der Literatur extrahiert werden und welche Schritte notwendig sind, um Mehrfacherfassungen zu vermeiden. Die Literaturquellen der Ersatzteilmerkmale aus Tabelle 6 können dem Anhang (siehe Abschnitt 8) entnommen werden.

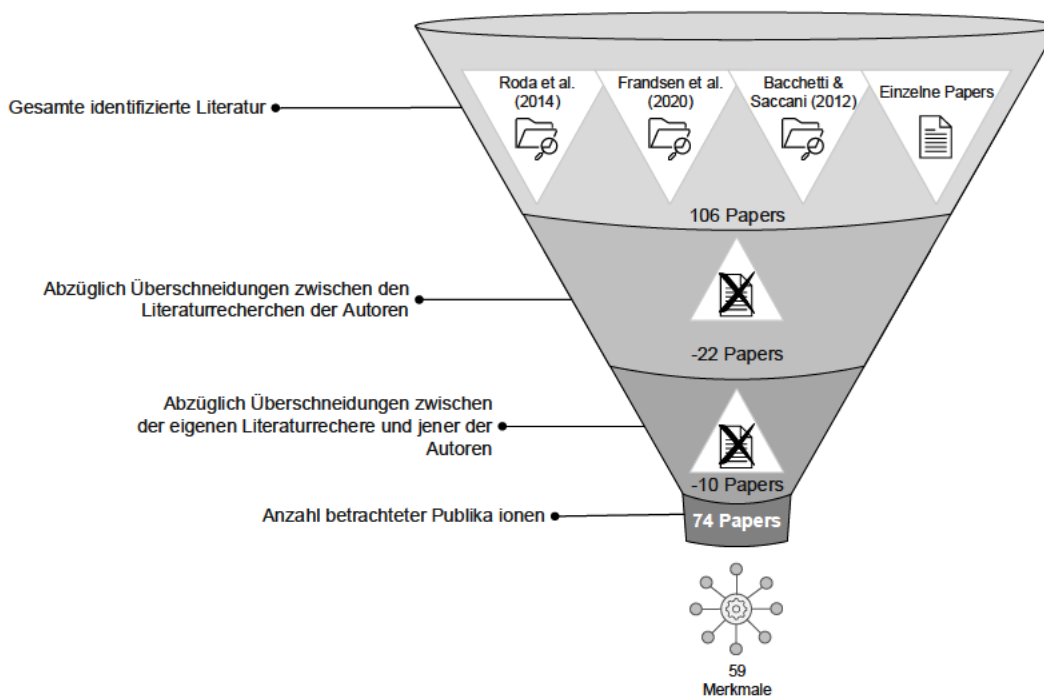


Abbildung 19: Ablauf der Literaturerhebung von Ersatzteilmerkmalen (eigene Darstellung)

Ausgehend von der gesichteten Literatur basierend auf dem in Abbildung 19 dargestellten Vorgehen konnte die in Tabelle 6 dargestellte Merkmalliste erstellt werden. Die Merkmale werden nach der Häufigkeit des Vorkommens geordnet.

Ersatzteil Merkmal	Anzahl der Erwähnungen in Publikationen	Expertenworkshop			Daten bei beiden SFB vorhanden
		Forschungs-institut	Lokaler SFB	Nationaler SFB	
Beschaffungszeit	48	✓	✓	✓	ja
Stückkosten (Beschaffungspreis, Herstellungskosten, Teilwert)	45	✓	✓	✓	ja
Kritikalität	38	✗	✗	✗	nein
Häufigkeit der benötigten Teile (Nachfrage/Bedarf/Verbrauch)	31	✗	✓	✓	ja
Annual Dollar Usage (Kosten x Verbrauch)	25	✗	✗	✗	ja
Stock-Out Kosten	15	✗	✗	✗	nein
Lebenszyklusphase	7	✗	✗	✗	nein
Ausfallwahrscheinlichkeit	7	✗	✗	✗	nein
Nachhaltigkeit	7	✗	✗	✗	nein
Liefer- und Lieferantenrisiko	7	✗	✗	✗	nein
Anzahl der Zulieferer	6	✗	✗	✓	teilweise
Wiederherstellbarkeit (Reparierbarkeit)	5	✗	✗	✗	nein
Lagerhaltungskosten	5	✗	✓	✓	ja
Anzahl verbauter Teile (in Umlauf/Nutzung)	4	✗	✗	✗	nein
Vorhersage (Nachfrage/Verbrauch/Bedarf)	4	✗	✗	✗	ja
Halbbarkeit (durchschnittliche Einsatzdauer)	4	✗	✗	✗	nein
Material/Werkstoff	4	✓	✓	✓	ja
Materialsubstitutionspotential	4	✓	✓	✓	nein
Kosten durch Ausfall	3	✗	✗	✗	nein
Platzbedarf im Lager	3	✗	✗	✗	ja
Produktionsmöglichkeit	3	✗	✗	✗	nein
Verfügbarkeit von Ersatz	3	✗	✗	✗	nein
Datenverfügbarkeit	3	✗	✗	✗	teilweise
Lagerbarkeit	3	✗	✗	✗	nein
Bauteilkomplexität	3	✓	✗	✗	nein
Bestand (Lager)	3	✗	✓	✓	ja
Bedarfs-/Verbrauchsregelmäßigkeit	2	✗	✗	✗	ja
Obsoleszenzrisiko	2	✗	✗	✗	nein
Fertigungsqualität	2	✗	✗	✗	ja
Gewichtsreduktionspotenzial	2	✓	✗	✗	nein
Funktionsintegrationspotenzial	2	✓	✗	✗	nein
Formänderungspotenzial	2	✓	✗	✗	nein
Nachbearbeitungsaufwand	2	✗	✓	✓	nein
Ausschussanteil (Materialverlust in der Fertigung)	2	✗	✗	✗	nein
Fehlmengenkosten bei Ausfall	1	✗	✗	✗	nein
Verkaufszyklusphase	1	✗	✗	✗	nein
Sicherheitsbestandskosten	1	✗	✗	✗	ja
Letztes Datum der Nutzung	1	✗	✗	✗	nein
Rechtskosten bei Nachbau	1	✗	✗	✓	nein
Verbleibende Nutzungsdauer	1	✗	✗	✗	nein
Aufbereitungskosten 3D-Modell	1	✗	✗	✗	nein
Verschrottungskosten	1	✗	✗	✗	nein
Komplexität der Fertigung	1	✓	✓	✓	nein
Verfügbarkeitsverpflichtung der Teile	1	✗	✗	✗	nein
Art der Wartung	1	✗	✗	✗	nein
Kosteneinsparungspotenzial	1	✓	✗	✗	nein
Frachtkosten in der Distribution	1	✗	✗	✗	nein
Zollkosten in der Distribution	1	✗	✗	✗	nein
Reparaturkosten	1	✗	✗	✗	nein
Sicherheitsrelevanz (Mensch und Umwelt)	1	✓	✓	✓	ja
Abmessungen (Dimensionen)	1	✓	✓	✓	ja
Teileart (Normteil, Standardteil, Baugruppe)	1	✓	✓	✓	ja
Bauteilbelastung	1	✓	✗	✗	nein
Bauteilermüdungstest notwendig	1	✗	✗	✗	nein
Oberflächengüte	1	✓	✓	✓	nein
Anzahl ähnlicher Teile im Umlauf	1	✗	✗	✗	nein
Schnittstellen zu anderen Bauteilen	1	✗	✗	✗	teilweise
Geometrische Einschränkungen für den 3D-Druck	1	✗	✗	✗	nein
Teileverbesserungsmöglichkeit	1	✓	✗	✗	nein

Tabelle 6: Merkmalliste (eigene Darstellung)

Die Abbildung 20 gibt einen Überblick über die 13 in der Literatur am häufigsten behandelten Merkmale und stellt deren relative Häufigkeiten bezogen auf die 59 erhobenen Merkmale aus Tabelle 6 im Kontext der untersuchten 74 wissenschaftlichen Werke dar.

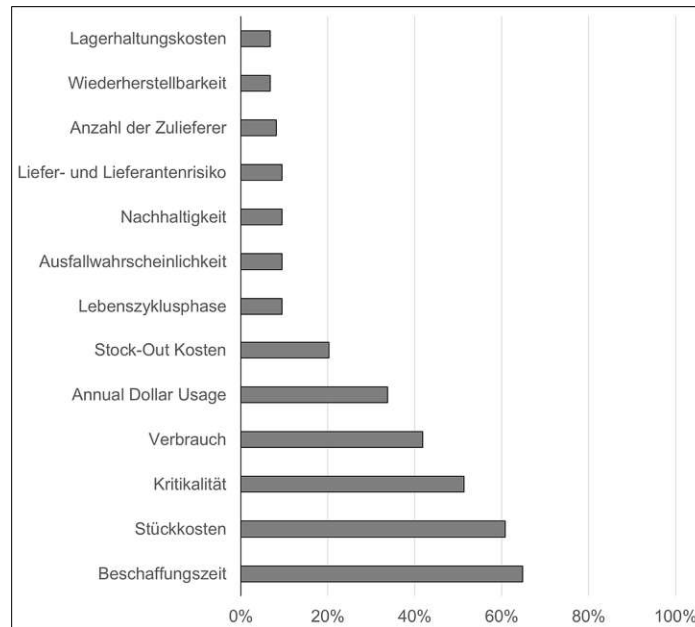


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der aus Sicht der in der Literatur wichtigsten Merkmale (eigene Darstellung)

Ergänzend zur Literaturbetrachtung wurde ein interaktiver Workshop mit Experten aus dem Schienenfahrzeug- und Ersatzteilbereich zum Thema Ersatzteilklassifizierung für die additive Fertigung durchgeführt (Expertenworkshop Merkmale, persönliche Korrespondenz, Wien, 02.11.2021). Beim beteiligten Forschungsinstitut handelt es sich um eines der führenden deutschen Institute für additive Fertigungstechnologien. Der regionale Schienenfahrzeugbetreiber beschäftigt ca. 8.700 Mitarbeiter, sein Schienenfahrzeugnetz erstreckt sich auf ein österreichisches Bundesland und er steht am Beginn der Einführung von AM im Unternehmen. Der nationale Betreiber hat AM teilweise in seine Ersatzteilversorgung integriert und beschäftigt rund 41.600 Mitarbeiter. Er wird in die Validierung des Bewertungsmodells miteinbezogen und in Abschnitt 6 näher vorgestellt. Im Zuge des Workshops konnten mithilfe des Expertengremiums die aus der Praxisperspektive wichtigsten Merkmale und Kriterien zur Teileauswahl für die additive Fertigung von Ersatzteilen ermittelt werden. Die Meinung der Experten wurde in Tabelle 6 mit den Anforderungen aus der Literatur abgeglichen. Außerdem wurde erhoben welche Merkmale sich aus den EDV-Systemen von Schienenfahrzeugbetreibern extrahieren lassen. Es stellte sich heraus, dass die Literatur einen umfassenden Überblick zu diesem Thema liefert. Anzumerken ist, dass es lediglich in der Nomenklatur Unterschiede gibt. In Tabelle 6 wird deutlich, dass es zwischen Literatur und Praxis bezogen auf die betrachteten Merkmale eine wesentliche Diskrepanz gibt. Lediglich fünf der von den Praktikern vorgeschlagenen

Merkmale lassen sich in Abbildung 20 wiederfinden. Bei den von den Schienenfahrzeugbetreibern vorgeschlagenen Merkmalen herrscht große Ähnlichkeit. Die beiden aus Sicht der Literatur bedeutsamsten Merkmale werden von allen drei Experten angeführt.

Weiters wurden in einem Expertengespräch zwei Tabellen zur Potenzialabschätzung von Ersatzteilen für die additive Fertigung erarbeitet (Bereichsleiter: Forschungsinstitut für Additive Produktionstechnologien, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021). In Tabelle 7 werden Kriterien aufgelistet, aus denen auf das wirtschaftliche Potenzial des Einsatzes der additiven Fertigung geschlossen werden kann.

Kriterien für das wirtschaftliche AM-Potenzial	Ausprägung
Wiederbeschaffungskosten	• Beschaffungspreis (€)
Wiederbeschaffungszeit	• Beschaffungszeit (Tage)
Bauteilvolumen	• Volumen (cm <sup>3</sup> )
Bauteiloberfläche	• Oberfläche (cm <sup>2</sup> )
Bauteildringlichkeit	• Gering bis hoch
Bauteilkomplexität	• Gering bis hoch
Wertsteigerung (Teil oder Gesamtsystem)	• Integralbauweise • Leichtbau • Funktionsintegration

Tabelle 7: Kriterien zur wirtschaftlichen Potenzialabschätzung (vgl. Bereichsleiter: Forschungsinstitut für Additive Produktionstechnologien, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021)

Tabelle 8 gibt die wichtigsten Aspekte zur Abschätzung der technischen Eignung eines Ersatzteils für die additive Fertigung aus Sicht des Experten wieder.

Kriterien für das technische AM-Potenzial	Ausprägung
Dimension des Bauteils	• Abmaße (mm)
Material des Bauteils	• Aluminiumlegierung • Anderes Metall • Hochtemperaturkunststoff • Kein Hochtemperaturkunststoff
Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit)	• Fein (Ra,max < 12,5 µm) • Mittel (12,5 µm < Ra,max < 30 µm) • Grob (30 µm < Ra,max)
Mechanische Belastung	• Gering bis hoch
Sicherheitsrelevanz des Bauteils im Schienenfahrzeug	• Ja/nein
Brandschutz nach DIN EN 45545	• Erforderlich/nicht erforderlich
Minimale Wandstärke	• Maß in mm
Minimale Spaltbreite	• Maß in mm

Tabelle 8: Kriterien zur technischen Potenzialabschätzung (vgl. Bereichsleiter: Forschungsinstitut für Additive Produktionstechnologien, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021)



### 3.4 Zusammenfassung der aktuellen Forschung und deren Defizite

Im Zuge der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass für den Schienenfahrzeugsektor, nach den in Tabelle 4 vorgestellten Betrachtungsebenen, kein zufriedenstellendes ET-Lebenszyklusmodell existiert und auf EM-Strategien entlang des Lebenszyklus nicht näher eingegangen wird. Weiters werden Lebenszykluspotenziale durch den Einsatz der additiven Fertigung nicht aufgegriffen. Außerdem beschränkt sich die Sicht der Modelle mehrheitlich auf die Perspektive des Herstellers. Eine Kombination von Ansätzen des OM und EM wird in den wenigsten Modellen dargestellt.

Im Fokusblock „Potenzialbewertung“ lässt sich schlussfolgern, dass konventionelle Klassifizierungsmethoden in der Potenzialbewertung geringe Anwendung finden. Weiters beschränkt sich die Ausrichtung der wissenschaftlichen Arbeiten auf die AM-Potenzialbewertung von Bauteilen in der Serienproduktion und nicht auf Ersatzteile. Beim Analysieren der Literatur stellt sich heraus, dass es lediglich vereinzelt Modelle zur automatisierten und datengetriebenen Bewertung gibt. Folglich konzentrieren sich ein Großteil der Autoren auf manuelle Teilebewertungen. In vielen Arbeiten können die Ersatzteilmerkmale nicht standardisiert über Schnittstellen zu Unternehmensdatenbanken bewertet werden. Außerdem lassen sich die Modelle nicht in einer Applikation realisieren. Weiters wird der Lebenszyklus bei der Bewertung nur selten aufgegriffen.

Bezüglich der in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Merkmale zur Klassifizierung von Ersatzteilen wird festgestellt, dass es deutliche Diskrepanzen zwischen Literatur und Praxis gibt. In der Literatur werden die ersten sechs Merkmale aus Tabelle 6 überrepräsentativ oft betrachtet. Ausgehend von der Häufigkeit des Vorkommens kann auf eine signifikante Relevanz für die Klassifizierung geschlossen werden. Merkmale, die von Experten aus der Praxis vorgeschlagen und in der Literatur nicht wesentlich behandelt werden, dürfen keinesfalls vernachlässigt werden. Besonders auffallend ist, dass teilweise die in der Literatur am häufigsten betrachteten Merkmale (z. B. Kritikalität) in der Praxis nicht berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich nach der DSRM (siehe dazu Tabelle 1) aus dem Stand der Forschung (*Schritt 2*) die identifizierte Forschungslücke (*Schritt 3*) feststellen:

Aktuell existieren in der Wissenschaft keine Lösungen, die eine lebenszyklusbezogene, standardisierte sowie automatisierte Bewertung von Ersatzteilen für AM beinhalten. Im Konkreten bedeutet dies, dass bisher keine Analyse des Ersatzteillebenszyklus für die Nutzung von AM durchgeführt wurde und die Potenzialbewertungsansätze aus der Literatur für große Ersatzteilspektren, insbesondere im Schienenfahrzeugbereich, zum Zeitpunkt dieser Untersuchung den Anforderungen der vorliegenden Arbeit nicht gerecht werden.

## 4 Einführung eines Lebenszyklusmodells für die AM-Nutzung im Schienenfahrzeugbereich

In Bezug auf die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Lebenszyklen wird in Abschnitt 4.1 ein Lebenszyklusmodell für Ersatzteile und langfristig genutzte Maschinen und Anlagen entwickelt. Im Besonderen werden Strategien des EM und OM aus Sicht von Anlagenbetreibern aufgegriffen und in die Lebenszyklusbetrachtung integriert. Neben dem Aufzeigen von Herausforderungen wird der Einsatz der additiven Fertigung für die Ersatzteilversorgung entlang des entwickelten Lebenszyklusmodells in Abschnitt 4.2 dargestellt. Das Modell wird am Beispiel des Schienenfahrzeugsektors vorgestellt. Es kann des Weiteren für vergleichbare Branchen herangezogen werden.

### 4.1 Entwicklung eines Lebenszyklusmodells im Schienenfahrzeugbereich

Zur Darstellung der im entwickelten Lebenszyklusmodell betrachteten Zyklen wird in Anlehnung an die Literatur (siehe Abschnitt 3.2) mit einer Zeitachse gearbeitet. Auf dieser Achse werden bedeutende Zeitpunkte abgebildet. Neben dem *SOP*, dem *EOP* und der *EDO* (vgl. Dombrowski und Schulze 2008, S. 442) wird nach Barkawi et al. (vgl. 2007, S. 254) und Wagner et al. (vgl. 2012, S. 81) der Zeitpunkt *EOS* aufgegriffen. Weiters wird das Modell um „End of Use“ (*EOU*) ergänzt. Auf die Bezeichnung *EOL* wird im Kontext des Modells verzichtet, da es vorkommen kann, dass Ersatzteile nach der Nutzung in anderen Primärprodukten weiterverwendet werden. Für das Schienenfahrzeug (SF) ist *EOU* mit *EOL* gleichzusetzen. Grau hinterlegte Zeitpunkte im Modell betreffen lediglich das Ersatzteil und schwarz hinterlegte ausschließlich das SF. Alle weiteren Zeitpunkte gelten für beide Objekte.

Zur besseren Übersicht wird das Lebenszyklusmodell durch eine Pool-Darstellung (Ersatzteil, Schienenfahrzeug) mit integrierten *Swimlanes*<sup>12</sup> visualisiert. Diese dienen zur Abgrenzung der beteiligten Stakeholder. In Abbildung 21 ist der LC des SF und in Abbildung 22 jener des ET abgebildet.

---

<sup>12</sup> Im Prozessmanagement übliche Darstellung bei mehreren Stakeholdern innerhalb einer Organisation.



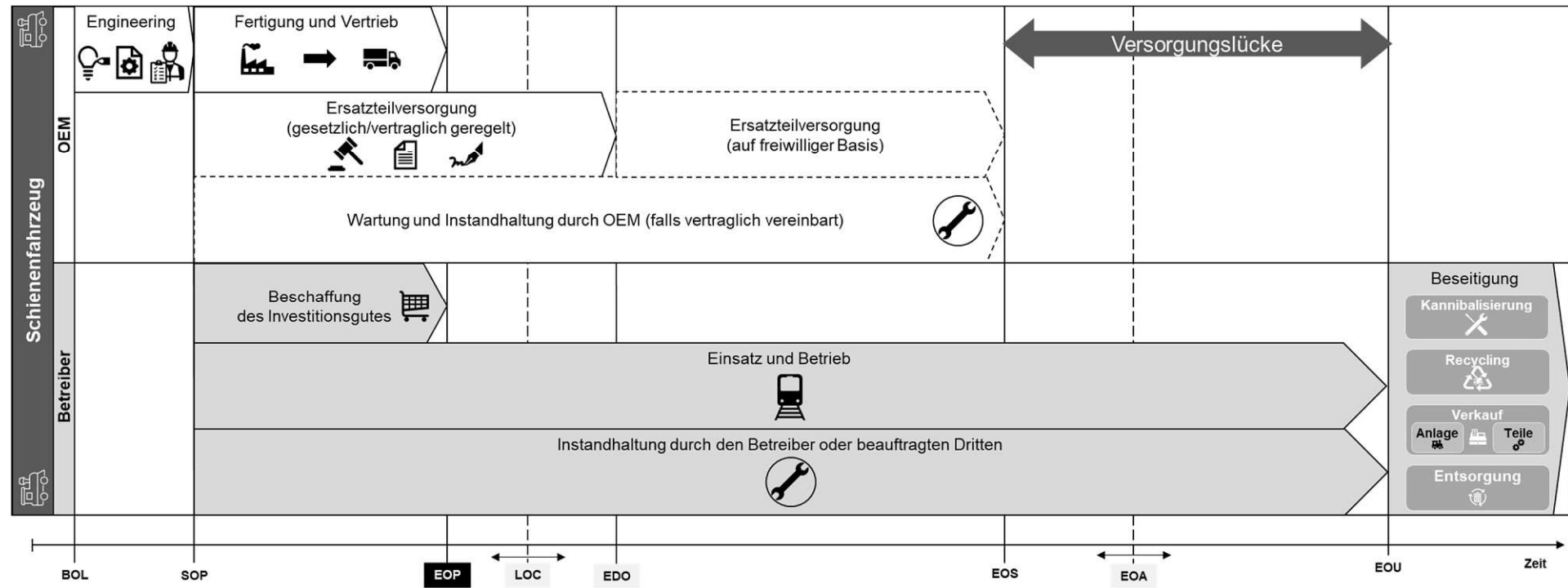


Abbildung 21: Lebenszyklus eines Schienenfahrzeuges(eigene Darstellung)<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Die Piktogramme stammen aus Microsoft Office und sind frei verwendbar.

Kriwet et al. (vgl. 1995, S. 16-17) und Carpentieri et al. (vgl. 2007, S. 473) legen mit ihren Werken den Grundstein für den in Abbildung 21 dargestellten Schienenfahrzeuglebenszyklus. Ausgehend von deren Arbeiten werden definierte LC-Phasen auf den Schienenfahrzeugsektor umgelegt und den Stakeholdern OEM und Betreiber zugeordnet. Andere Beteiligte wie beispielsweise Sublieferanten des OEM liefern für die Aussage des LC keinen Mehrwert und werden aus diesem Grund nicht gesondert berücksichtigt. Zur Reduzierung der Komplexität wird, wie in Dombrowski et al. (vgl. 2005a, S. 127–128) thematisiert, nicht auf nachfolgende Varianten des Schienenfahrzeuges eingegangen.

Der Lebenszyklus beginnt mit der Produktentwicklungsphase (zwischen *BOL* und *SOP*). In dieser durchläuft das Primärprodukt von der Ideenfindung bis zum Prototypenbau die Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Herstellers. Im Anschluss startet mit dem Zeitpunkt *SOP* die Serienfertigung des Schienenfahrzeuges. Die Fertigungsphase läuft bis zu *EOP*. Üblicherweise wird durch den OEM das Primärprodukt eine Zeit lang nach dem Produktionsende weiterverkauft. Im Maschinen- und Anlagenbau ist dies nicht der Fall. Folglich kann der Betreiber im Zeitraum von *SOP* und *EOP* das Fahrzeug erwerben und bis zum *EOU* nutzen. Während der gesamten Nutzungsdauer muss das Schienenfahrzeug instandgehalten werden. Dies geschieht durch den Betreiber selbst oder durch ein externes Unternehmen. Übernimmt der Hersteller die Instandhaltung, wird sie bis spätestens zum *EOS* durchgeführt. Die Ersatzteilversorgung durch den Hersteller wird bis zur *EDO* sichergestellt und hängt maßgeblich von gesetzlichen oder vertraglichen Bestimmungen ab. Nach dem Ende der Lieferverpflichtung ist es möglich, dass der Betreiber weiter vom OEM mit Ersatzteilen versorgt wird (vgl. Wagner et al. 2012, S. 83). Spätestens mit dem *EOS* endet diese freiwillige Ersatzteilversorgung durch den OEM und es kann zu Engpässen oder zur Obsoleszenz von Ersatzteilen kommen. In Abbildung 21 wird die vorherrschende Versorgungslücke ausgehend von einer freiwilligen Bereitstellung in der Auslaufphase (zwischen *EDO* und *EOS*) ersichtlich gemacht. Diese tritt im Schienenfahrzeugbereich häufig auf, da die Nutzungsdauer von Schienenfahrzeugen über 50 Jahre betragen kann (vgl. Dombrowski und Schulze 2008, S. 456). Folglich kommt es vor, dass die Lieferanten nicht mehr im Geschäft sind, das Teil nicht mehr anbieten oder nach Dombrowski et al. (vgl. 2005a, S. 128) das Know-how zur Fertigung des spezifischen Ersatzteils verloren gegangen ist. Ab dem Zeitpunkt *EOU* kann das SF, wie im Paper von Cao und Folan (vgl. 2012, S. 28–29) beschrieben, entsorgt oder recycelt werden. Eine wirtschaftlichere Alternative zur Verschrottung kann der Verkauf der gesamten Anlage oder deren Einzelteile sein. Die Kannibalisierung (siehe Abschnitt 2.1.4.1) von Teilen soll nach Schnieder (vgl. 2018, S. 228) in diesem Zusammenhang angedacht werden.

In Abbildung 22 ist ausgehend vom beschriebenen Lebenszyklus des SF die Lebenszyklusdarstellung des ET abgebildet.

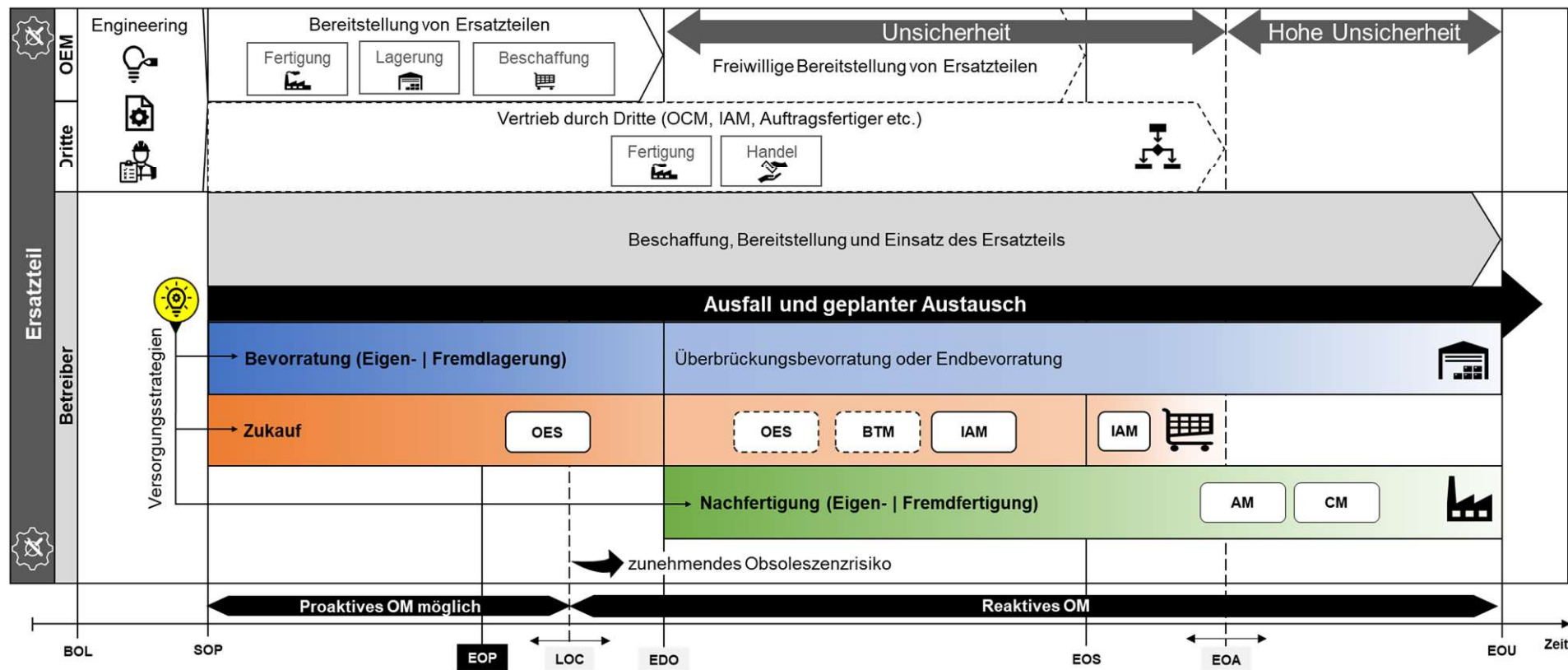


Abbildung 22: Lebenszyklusmodell eines Ersatzteiles (eigene Darstellung)<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Die Piktogramme stammen aus Microsoft Office und sind frei verwendbar.

Zur vereinfachten Darstellung wird in Abbildung 22 angenommen, dass der Entwicklungs- (*BOL*) und Produktionsstart (*SOP*) von Ersatzteil und Schienenfahrzeug zeitgleich erfolgt. In der Praxis gibt es einen zeitlichen Versatz, da Bauteile länger im Umlauf sein können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Teil in anderen Primärprodukten im Einsatz ist. Im Gegensatz zum Schienenfahrzeuglebenszyklus (siehe Abbildung 21) werden im Kontext des Ersatzteiles die drei Stakeholder Betreiber, OEM und Dritte betrachtet.

Der Lebenszyklus beginnt mit dem Engineering der Bauteile durch den OEM oder dessen Lieferanten. Nachdem die Teile erstmals im Schienenfahrzeug verbaut wurden, müssen bei Bedarf Ersatzteile bereitgestellt werden. Die Versorgung des Betreibers mit Ersatzteilen wird über auftragsbezogene Fertigung, Bevorratung oder OCM-Beschaffung durch den OEM abgewickelt. In manchen Fällen wird sie an Dritte ausgelagert. Alternativ können, wenn es die vertraglichen und angebotsseitigen Rahmenbedingungen erlauben, Ersatzteile von Drittanbietern oder Auftragsfertigern von Schienenfahrzeugbetreibern bezogen werden. In der Praxis geschieht dies ab der *EDO* und wird von den Bahnunternehmen nicht priorisiert. Aus Sicht des Betreibers werden ab *SOP* Ersatzteile beschafft, bereitgestellt und eingesetzt. Während der gesamten Einsatzdauer kommt es zu Ausfällen oder dem geplanten Austausch von Teilen in Abhängigkeit vom Ersatzteiltyp (siehe Abschnitt 2.1.1). Um die Handlungsoptionen des SFB für diesen Ersatzteilbedarf aufzuzeigen, werden mögliche Versorgungsstrategien in den Lebenszyklus (siehe Abbildung 21) eingebettet. Diese setzen sich aus den relevanten Ansätzen des EM (siehe Abschnitt 2.1) und des OM (siehe Abschnitt 2.2) zusammen und werden von Vertretern des Schienenfahrzeugsektors beglaubigt (Expertenworkshop Ersatzteilbeschaffung, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021).

Eine bei Verkehrsunternehmen weit verbreitete Ersatzteilstrategie ist die Bevorratung (siehe Abschnitt 2.1.4.2). Bis zum *EDO* wird sie bei hohem Verbrauch und langen Lieferzeiten für B- und C-Ersatzteile (siehe Abschnitt 2.1.3.5) eingesetzt. Nach der *EDO* ist es in der Praxis üblich, auf eine Endbevorratung umzustellen. Außerdem kann zum *EOA*, solange kein Lieferant oder Auftragsfertiger gefunden wird, von einer Überbrückungsbevorratung Gebrauch gemacht werden.

Der Zukauf (siehe Abschnitt 2.1.4.1) von Ersatzteilen für die Nachserienversorgung ist beim OEM oder OCM bis zur *EDO* jederzeit möglich. Die letzte Bestellmöglichkeit ist durch den LOC festgelegt. Andere Formen der An- und Abkündigungen durch den OEM (siehe Abschnitt 2.2.3.1) werden in diesem Lebenszyklusmodell nicht explizit aufgegriffen. Oftmals wird der Betreiber nach der *EDO* mit Ersatzteilen bis zu *EOS* weiterversorgt. In diesem Fall liegt der LOC nach der *EDO* und läutet das Ende der Versorgung mit dem *EOS* ein. Maßgeblich für die freiwillige Versorgung durch den OEM ist neben der Rentabilität die vorherrschende Geschäftsbeziehung. Sollte in

einem nachfolgenden Primärprodukt das Ersatzteil serienmäßig weiterverwendet werden, ist die Ersatzteilversorgung sichergestellt. Gibt es keine Rahmenverträge oder sind diese ausgelaufen, kann der Betreiber seinen Ersatzteilbedarf am IAM über Zukäufe decken (vgl. Expertenworkshop Ersatzteilbeschaffung, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021). Dort können im besten Fall Originalteile, Teile von Zulieferern des OEM mit eigenem Markenzeichen oder alternativ kompatible Teile bezogen werden. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist weiters die Verwendung von Altteilen in Betracht zu ziehen. Für diesen Ansatz spricht beispielsweise die Nutzung von Ersatzteilen aus kannibalisierten baugleichen Flotten (*EOU*).

Am Ende der Nachserienversorgung, dem sogenannten Auslauf (zwischen *EDO* und *EOS*) und im weiteren Lebenszyklus spielt die Strategie der Nachfertigung (siehe Abschnitt 2.1.4.3) bis zu *EOU* vor allem bei Angebotsknappheit eine wesentliche Rolle. Je nach Fertigungsmöglichkeiten und Kosten wird zwischen Eigen- und Fremdfertigung unterschieden. Abhängig von ersatzteilspezifischen Merkmalen (siehe Abschnitt 3.3.2) eignet sich AM oder CM besser für dieses Szenario.

Ausgehend von der VDI 2882 (vgl. VDI 2882:2018-05 2018) werden in Abbildung 22 die Zeitabschnitte von dem *SOP* bis zum *LOC* dem proaktiven OM (siehe Abschnitt 2.2.3.2) und ab dem *LOC* dem reaktiven OM (siehe Abschnitt 2.2.3.1) zugeordnet. Mit dem Einlangen des *LOC* (vor oder nach *EDO*) entsteht eine Unsicherheit für den SFB in der Ersatzteilversorgung. Tritt der Fall der *EOA* ein, wird von Bauteilobsoleszenz gesprochen. Aus dem Lebenszyklusmodell lässt sich folgern, dass je näher der Zeitpunkt des *EOU* kommt, das Obsoleszenzrisiko nach der *EDO* ansteigt. Bei der richtigen Auswahl und Abfolge der dargestellten Versorgungsstrategien kann unter Berücksichtigung spezifischer Ersatzteilcharakteristika (siehe Abschnitt 3.3.2) das Risiko kostenoptimal reduziert werden.

## 4.2 Erkenntnisse für die additive Fertigung

In diesem Abschnitt wird das in Kapitel 4.1 vorgestellte Lebenszyklusmodell ausgehend vom *BOL* bis zum *EOU* auf den möglichen Einsatz der additiven Fertigung zur Ersatzteilversorgung untersucht.

Bezugnehmend auf Wagner et al. (vgl. 2012, S. 82) werden 60 bis 95 Prozent der Lebenszykluskosten eines Produktes in der Entwicklungsphase festgelegt. Einen Ansatzpunkt für die Implementierung der additiven Fertigung in den Lebenszyklus von Ersatzteilen bietet folglich die Zeitspanne zwischen *BOL* und *SOP*.

Die spezifischen Anforderungen der additiven Fertigungsverfahren können in der Produktentwicklung (*Design for AM*) mitberücksichtigt werden. Konventionell gefertigte Serienteile können so ausgelegt werden, dass ein Druck als Ersatzteil ohne Redesign

möglich ist. Die Ersatzteilversorgung könnte sich so im Bereich der Auftragsfertigung hybridisieren. Je nach Bedarf und Wirtschaftlichkeit könnte bei diesem Ansatz zwischen CM und AM gewählt und gegen Ende des Lebenszyklus auf AM umgestellt werden. Im besten Fall ließen sich Ersatzteillager des OEM durch AM ablösen und Produktionskapazitäten stützen. Neben den Vorteilen für den Hersteller würde der Betreiber von einem geringerem Obsoleszenzrisiko profitieren. Im Falle der Versorgungsaufkündigung (EOS), hätte der SFB bei dem beschriebenen Szenario die Möglichkeit, Ersatzteile ohne Redesign, Nachkonstruktionen und aufwendigen Zulassungsverfahren selbst additiv anzufertigen. Damit der Hersteller Produktinformationen oder Know-how zur Verfügung stellt, muss dem beschriebenen Szenario ein rentables Geschäftsmodell zu Grunde liegen. Nach dem Abverkauf von Restbeständen des OEM könnten beispielsweise 3D-Modelle mitsamt den Nutzungsrechten an den SFB veräußert werden. Alternativ dazu ist die Einführung von Lizenzgebühren anzudenken. Als weitere Möglichkeit käme außerdem eine monetäre Abgabe pro additiv gefertigten Teil in Frage.

Betreiber und Lieferant müssen sich zum Zeitpunkt des Angebots einer Anlage Gedanken machen, wie der Betrieb und die Versorgung mit Ersatzteilen über die gesamte Nutzungsdauer sichergestellt werden können (vgl. VDI 2882:2018-05 2018, S. 2). Aus Sicht des SFB lohnt es sich beim Kauf eines Fahrzeugs die Pläne aller verbauten Komponenten zu erwerben. Ist die Deckung des Ersatzteilbedarfs auf den Beschaffungsmärkten nicht mehr gegeben (siehe Abschnitt 2.1.4.1), würde dies sowohl konventionelle als auch additive Nachfertigungen begünstigen. Sind keine Baupläne verfügbar, gibt es weiters die Möglichkeit, mittels spezieller Scanner 3D-Modelle von Ersatzteilen zu generieren (vgl. Cardeal et al. 2021, S. 212). Auf rechtliche Aspekte, die im Zuge von Nachfertigungen ohne vertragliche Regelung auftreten, wird in Abschnitt 6.8 näher eingegangen.

Der Zukauf von Ersatzteilen über Rahmenverträge ist im Schienenfahrzeugbereich üblich. Kommt es zum LOC, werden Ersatzteile, falls kein passender Substitutionslieferant zur Verfügung steht, im Zuge eines reaktionären OM endbevorratet. Die Endbevorratung ermöglicht bei Ausfällen von funktionskritischen Teilen eine Reduktion der Stillstandkosten. Sie ist bei vielen Teilen jedoch nicht notwendig und verursacht hohe Lagerhaltungskosten. Ein negatives Beispiel sind Dead Stocks. Da die konventionelle interne und externe Nachfertigung als Alternative bei geringem Bedarf aus wirtschaftlichen Aspekten oft nicht in Frage kommt, ist AM für SFB zur Teilebereitstellung interessant (vgl. Expertenworkshop Ersatzteilbeschaffung, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021). Abhängig von Kapazitäts- und Materialrestriktionen können AM-Auftragsfertiger in Betracht gezogen werden.



Für Teile, die von *EDO* bis *EOU* endbevorratet wurden, kann es für den Betreiber günstiger sein, diese zu verschrotten oder zu verkaufen und für die Ersatzteilversorgung auf AM umzusteigen.

Eine weitere Möglichkeit auf AM zurückzugreifen ergibt sich bei geplanten Instandhaltungen. Ersatzteile können durch AM kurz vor deren Bedarf gefertigt und so Lagerkosten gespart werden. Bei auftretenden Fehlteilen und damit einhergehenden Ersatzteilstehern können durch *Print-on-Demand* Lieferzeiten der konventionellen Beschaffung vermieden werden. In weiterer Folge können Ausfallkosten durch schnellere Reaktionszeiten reduziert werden. Es ist naheliegend, dass AM in Zukunft die Anzahl an Ersatzteilstehern reduzieren wird. Während der Nutzung des Schienenfahrzeuges kann *Print-on-Demand* „on Board“ oder an ausgewählten Haltestellen vor allem bei Teilen mit hoher Kritikalität angedacht werden. Für dieses Szenario ist aktuell einerseits die Technologie noch nicht weit genug fortgeschritten und andererseits steht die Anwendung der additiven Fertigung bei Bahnunternehmen noch an ihren Anfängen.

Nach der *EDO* ist der Betreiber bei geringem Lagerbestand stark vom OEM (bis *EOS*) oder anderen Lieferanten am IAM (bis *EOA*) abhängig. Vor allem wenn angebotsseitig eine Monopolstellung des Lieferanten vorherrscht, kann es durch Preisdiktion zu erheblichen Mehrkosten kommen. AM kann in diesem Fall zu mehr Autarkie des SFB führen. Im besten Fall kann auf unzuverlässige oder teure Zulieferer durch den Einsatz von AM verzichtet werden. Anzumerken ist, dass dies auch für CM gilt.

Abschließend lässt sich aus dem Lebenszyklusmodell folgern, dass es für den Anlagenbetreiber bedeutsam ist, ein proaktives OM anzustreben. Je früher im Lebenszyklus die Strategien der Nachserienversorgung festgelegt werden, desto besser ist für den SFB eine optimale Ersatzteilbereitstellung gewährleistet. In Bezug auf AM lässt sich schließen, dass diese in jeder Phase ab der Inbetriebnahme eines Schienenfahrzeuges für die Ersatzteilversorgung denkbar ist. Maßgebliche Entscheidungskriterien sind die Kosten sowie das Obsoleszenzrisiko.

Die zukünftige Herausforderung für Unternehmen besteht neben dem Schaffen eines kollektiven Bewusstseins für AM darin, geeignete Ersatzteile für die Nachserienversorgung mittels Screenings zu identifizieren. In Abschnitt 5 wird aus diesem Grund ein Modell zur teilautomatisierten Potenzialbewertung von Ersatzteilen vorgestellt, um die in diesem Kapitel identifizierten Handlungsfelder für SFB in die Praxis umsetzen zu können.



## 5 Entwicklung eines teilautomatisierten Potenzialbewertungsmodells

Bisher müssen im Schienenfahrzeugbereich Experten manuell Ersatzteile auf ihre Eignung für AM überprüfen. Bezüglich der Identifikation von Teilen sind sie auf Anregungen aus operativen Abteilungen angewiesen (siehe dazu Abbildung 31). Da in den meisten Unternehmen das Know-how der Mitarbeitenden hinsichtlich AM gering ist, stoßen die Fachkräfte selten auf geeignete Ersatzteile und große Potenziale bleiben unentdeckt. Aus diesem Grund bedarf es eines digitalisierten Bewertungsmodells, welches strukturiert und automatisiert Bauteile mit Potenzial für AM identifiziert. In diesem Kapitel wird solch ein Bewertungsmodell für den österreichischen Schienenfahrzeugsektor entwickelt.

### 5.1 Datenstruktur von Schienenfahrzeugbetreibern

Bevor das Bewertungsmodell aufgebaut werden kann, ist zu erheben, welche Informationen in den Datenbanken der österreichischen SFB vorliegen. Aus diesem Grund werden die digitalen Systeme der in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Flottenbetreiber untersucht.

Die Datenstruktur beider Unternehmen ist vergleichbar. Die wirtschaftlichen Daten sind im ERP-System SAP<sup>15</sup> hinterlegt. In SAP können Informationen zum Materialstamm, zum Bestand, zum Verbrauch sowie zu Materialbewegungen von Ersatzteilen in Form von Standardberichten abgerufen werden. In der tabellarischen Auswertung „MARA“ können beispielsweise Merkmale wie Länge, Breite, Höhe, Brutto- und Nettogewicht ermittelt werden. Die Tabelle „MARC“ beinhaltet Daten bezüglich Plan-Lieferzeit und Sicherheitsbestand für jedes angelegte Teil. Informationen über den aktuellen Bestand können der Tabelle „MBEW“ entnommen werden. Zur Erhebung spezifischer technischer Daten abseits des Materialstamms in SAP sind in beiden Referenzunternehmen eine Vielzahl von technischen Zeichnungen vorhanden. Diese liegen im Zeichnungsarchiv der *Technischen Dokumentation* als digitalisierte Handzeichnungen, 2D-Ableitungen und CAD-Modelle vor.

Jede technische Zeichnung hat eine Herstellernummer und eine interne unternehmensspezifische Zeichnungsnummer. Es ist möglich, die Material- mit der Zeichnungsnummer zu verknüpfen. Auffällig ist, dass der nationale Betreiber mit einer sprechenden (siehe Abbildung 23) und der lokale Betreiber mit einer teilsprechenden Materialnummer arbeitet.

---

<sup>15</sup> Programm zu Abwicklung sämtlicher Geschäftsprozesse eines Unternehmens.

# 1. 25. 61. 41. 31

<b>Kennziffer</b> 1 ... Wagen	<b>Hauptbaugruppe</b> Inneneinrichtung	<b>Unterbaugruppe</b> Sitz/Bett Gestelle	<b>Nebenbaugruppe</b> Abdeckungen	<b>Sortennummer</b> 26 - 32
----------------------------------	---	---	--------------------------------------	--------------------------------

Abbildung 23: Sprechende Materialnummer des nationalen Schienenfahrzeugbetreibers (eigene Darstellung)

Der nationale Betreiber kann den Einsatzbereich eines Bauteils anhand der Materialnummer detailliert bestimmen, da die Materialnummer aus einer Kennziffer, der Hauptbaugruppe, der Unterbaugruppe, der Nebenbaugruppe sowie einer Sortennummer besteht. Für den lokalen Bahnbetreiber gibt es keine Möglichkeit auf den Verbauungsort eines Teiles ohne Zeichnung rückzuschließen.

Nachfolgend ist eine Übersicht (siehe Abbildung 24) der zur Lösung der Problemstellung verfügbaren Datenquellen dargestellt. Eine Aussage über die Datenstruktur von Schienenfahrzeugbetreibern in anderen Ländern erlaubt die Erörterung nicht. Es ist anzunehmen, dass vergleichbare IT-Systeme im Einsatz sind. Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) kann keine Aussage getroffen werden.

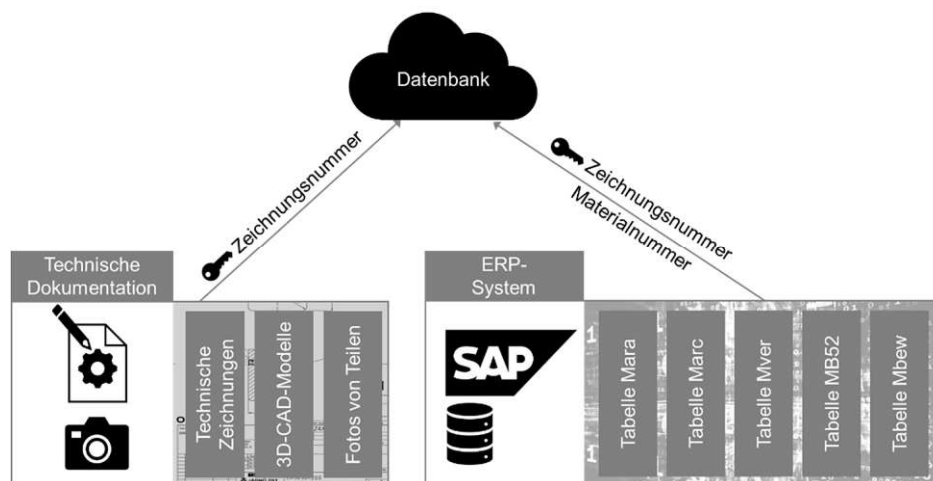


Abbildung 24: Herkunft der Daten zur Verknüpfung in einer Datenbank basierend auf den Erkenntnissen der beiden betrachteten Unternehmen (eigene Darstellung)

Da es für viele Ersatzteile keine CAD-Modelle gibt und lediglich Zeichnungen als 2D-Ableitungen vorliegen, können deren Informationen nicht automatisiert ausgelesen werden. Daher wird in dieser Arbeit nach Rücksprache und Plausibilisierung mit einem Experten (Gruppenleiter: Forschungsinstitut für Visual Computing, persönliche Korrespondenz, Wien, 23.09.2021) davon ausgegangen, dass über Bildverarbeitung und Mustererkennung sowie Text Mining die wesentlichen Parameter aus technischen Zeichnungen für eine Datenbank verfügbar gemacht werden können. Es wird in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass durch den beschriebenen Ansatz folgende technische Informationen extrahiert werden können und somit als Inputgrößen dienen:

- Dimensionen

- Oberfläche
- Material
- Art des Teils (Einzelteil, Normteil, Baugruppe)
- Oberflächenrauigkeit
- Allgemeintoleranzen
- Anzahl der Bohrungen und Gewinde

## 5.2 Anforderungen aus der Praxis

Um das Bewertungsmodell operativ einsetzen zu können, wurden in einem Workshop mit Vertretern österreichischer SFB die Anforderungen an das Bewertungsmodell herausgearbeitet. Im Zuge eines Brainstormings und einer anschließenden Diskussion ergeben sich folgende Anforderungen (siehe Tabelle 9).

Anforderungen aus der Praxis	
▪ Anzeigen warum Teil geeignet ist oder nicht	▪ Auf unterschiedliche Drucker ausgelegt
▪ Einsparungspotential (Herstellungskosten, Lagerkosten etc.) verdeutlichen	▪ Substitutionsmaterial vorschlagen
▪ Zeichnungen und Fotos interaktiv visualisieren	▪ Teile vergleichen
▪ Filterungsmöglichkeiten bereitstellen (z.B. Werkstoff, Verbrauch)	▪ Datenaktualisierungen und Upload neuer Daten möglich / SAP-Schnittstelle
▪ Datenqualität der Bewertung anzeigen	▪ Indikatoren für Eignung (wirtschaftlich, technisch....)
▪ Manuelle Bewertungsmöglichkeit	▪ Kennzeichnung von Teilen
▪ Vergleich mit konventioneller Beschaffung	▪ Standardisierte Bewertung

**Tabelle 9: Anforderungen aus der Praxis an die Realisierung des Bewertungsmodells (vgl. Expertenworkshop Anforderungen, persönliche Korrespondenz, Wien, 25.01.2022)**

Neben dem Erkennen von Einsparungspotenzialen und dem Bewerten von Teilen ist es den Praktikern wichtig, über Filter mit dem Bewertungsmodell interagieren zu können. Außerdem wird, vor allem wenn nicht alle entscheidungsrelevanten Daten zur Bewertung eines spezifischen Teils verfügbar sind, für die Möglichkeit einer ergänzenden manuellen Bewertung plädiert. Weiters soll das Ergebnis des Modells nachvollzogen werden können und die Bewertung standardisiert ablaufen.

## 5.3 Merkmale und Bewertungsbereiche

In diesem Abschnitt werden die für die Potenzialbewertung herangezogenen Ersatzteilmerkmale vorgestellt. Ausgangspunkt für die ausgewählten Merkmale in Tabelle 10 sind die Erhebungen aus Kapitel 3.3.2. Da nicht alle Merkmale von SFB

datenseitig vorliegen (siehe Abschnitt 5.1) und die explizite Forderung der Betreiber nach einer manuellen Eingriffsmöglichkeit besteht (siehe Abschnitt 5.2), wird die Bewertung teilautomatisiert aufgebaut (siehe Abschnitt 5.4). Aus diesem Grund wird in Tabelle 10 zwischen Merkmalen zur manuellen und zur automatisierten Auswertung unterschieden. Zu ergänzen ist, dass die Eingrenzungen sowie die Merkmale von Unternehmen zu Unternehmen variieren können.

Merkmale des Potenzialbewertungsmodells			
Auswertung			
	Manuell	Automatisiert	
Kritikalität	Nachbearbeitungskosten	Beschaffungszeit	Fertigungsgrad
Lebenszyklusphase	Ersatzteilsteher	Teilewert	Technische Informationen
Obsoleszenzrisiko	Qualitätsprüfkosten	Einsparungspotenzial	Werkstoff
Beschaffungsquellen	Enabler	Verbrauch	Nachbearbeitungsbedarf
Dringlichkeit	Nachbearbeitungsbedarf	Bauteilkomplexität	Fertigungskapazität
Kannibalisierungsmöglichkeit	Brandschutzanforderungen	Verbrauchsregelmäßigkeit	
Teilekompatibilität	Mechanische Belastung in Funktion	Mindestlosgröße	
Lagerfähigkeit Rohmaterial	3D-Modell verfügbar	Maximallosgröße	
Lagerfähigkeit ET	Werkstoff druckbar	Lagerreichweite	
Ausfallwahrscheinlichkeit	Anschaffungskosten Maschinen/Werkzeug	Dimensionen	
Patent- und Zulassungskosten	Redesignkosten	Oberflächengüte	
Nachkonstruktion		Sicherheitsrelevanz	

Tabelle 10: Merkmale zur Potenzialbewertung von Ersatzteilen (eigene Darstellung)

Außerdem werden Bauteil-Potenziale, die durch die additive Fertigung begünstigt werden, in Tabelle 11 festgehalten. Diese fließen unter dem Merkmal „Enabler“ in das Modell ein.

AM als Enabler
Leichtbau
Funktionsintegration
Materialsubstitution
Integralbauweise

Tabelle 11: Bauteiloptimierungsmöglichkeiten durch AM (eigene Darstellung)

Zur Potenzialbewertung werden aus den in Tabelle 10 angeführten 40 Merkmalen Bewertungsbereiche (siehe Abbildung 25) gebildet. Die Zuordnung zu diesen Bereichen ist Kapitel 5.4 zu entnehmen.

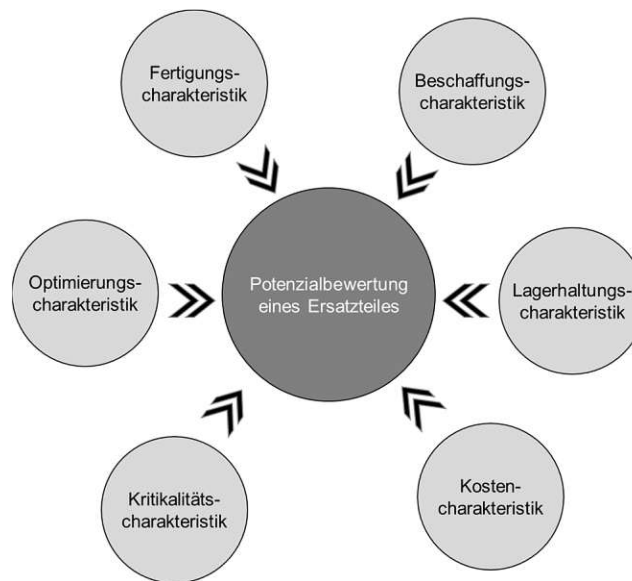


Abbildung 25: Bewertungsbereiche zur Potenzialbewertung (eigene Darstellung)

Kann zu jedem der sechs Bewertungsbereiche eine Aussage bezüglich Eignung für AM getroffen werden, lässt sich das Potenzial eines Ersatzteiles abschätzen. Aus technischer Sicht stellt sich die Frage, ob ein Bauteil mit verhältnismäßigem Aufwand druckbar ist und ob das Bauteil optimiert werden kann. Diese Evaluierung erfolgt in den Bereichen *Fertigungscharakteristik* und *Optimierungscharakteristik*. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es für Betreiber von Schienenfahrzeugen bedeutsam, welches Einsparungspotenzial sich durch die additive Fertigung realisieren lässt. Diese Betrachtungsweise wird in der *Kostencharakteristik* abgebildet. Weiters kann das Beschaffungsumfeld durch beispielsweise Abhängigkeiten von Lieferanten, Mindestbestellmengen und drohende Bauteilobsoleszenz die additive Fertigung attraktiv erscheinen lassen. Eine Aussage darüber wird in der *Beschaffungscharakteristik* getroffen. Außerdem spielt die *Kritikalitätscharakteristik* bezüglich Ausfallkosten bzw. sicherheitskritischen Teilen eine Rolle für die Teileauswahl. Einen weiteren wichtigen Entscheidungsparameter liefert die *Lagerhaltungscharakteristik*, da aus der bisherigen Lager- und Verbrauchssituation Erkenntnisse für den potenziellen Einsatz von AM als Versorgungsstrategie gewonnen werden können.

## 5.4 Bewertungsmodell

In diesem Kapitel wird ausgehend von den in Abschnitt 5.2 definierten Merkmalen und Bewertungsbereichen sowie den Anforderungen aus der Praxis ein Bewertungsmodell (siehe Abschnitt 5.4.1) entwickelt. Weiters wird auf die im Modell implementierte Methodik zur Kostenabschätzung näher eingegangen (siehe Abschnitt 5.4.2).



### 5.4.1 Aufbau des Bewertungsmodells

Die Potenzialbewertung von Ersatzteilen im Kontext der additiven Fertigung kann lediglich teilweise automatisiert durchgeführt werden. Der Grund liegt neben den in Abschnitt 5.3 erörterten Punkten in der Beurteilung der technischen Machbarkeit. In letzter Instanz bedarf es in der Praxis der Überprüfung durch einen Fachmann. Aus dieser Grundüberlegung leitet sich das nachfolgende Potenzialbewertungsmodell ab. Schematisch lässt sich der Aufbau wie folgt darstellen (siehe Abbildung 26).

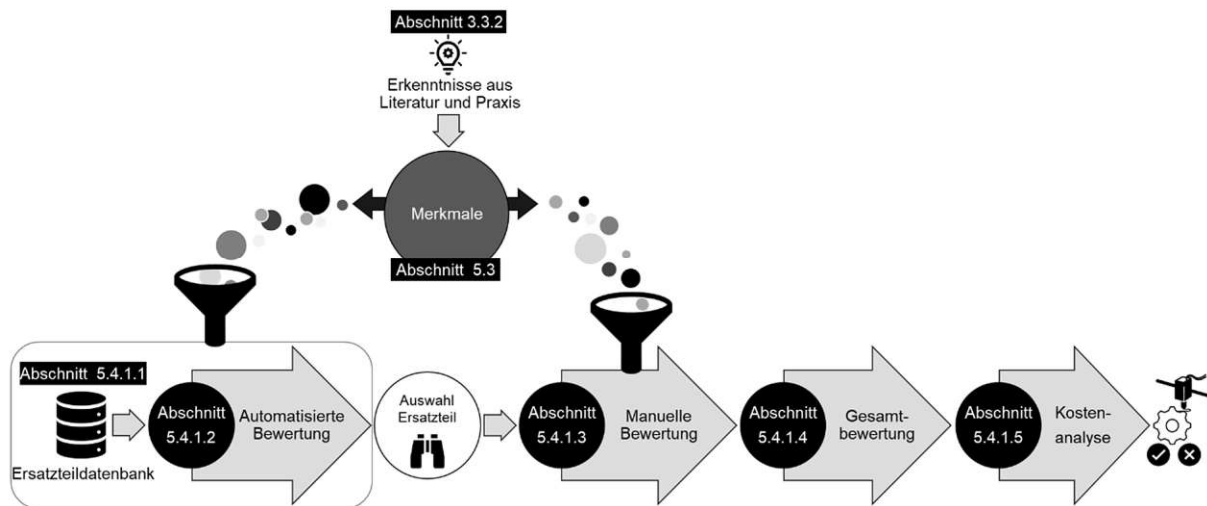


Abbildung 26: Aufbau des teilautomatisierten Bewertungsmodells (eigene Darstellung)

Zu Beginn ist es zweckmäßig, ausgehend von den verfügbaren Daten (siehe Abschnitt 5.1), Ersatzteile mit AM-Potenzial automatisiert zu identifizieren und grob zu bewerten. Folglich wird im ersten Schritt des Modells eine *Ersatzteildatenbank* (siehe Abschnitt 5.4.1.1) aufgebaut. Diese enthält alle Merkmale (siehe Abschnitt 5.3) die zur *Automatisierten Bewertung* und einer darauf aufbauenden Bildung einer Ersatzteil-Rangfolge (siehe Abschnitt 5.4.1.2) benötigt werden. Nach der Reihung der Teile wählt der Modellanwender das vielversprechendste Teil aus. Im Schritt *Manuelle Bewertung* ergänzt der Experte standardisiert über eine Programmschnittstelle Ausprägungen zu Merkmalen, die nicht in den Systemen der Schienenfahrzeugbetreiber hinterlegt sind (siehe Abschnitt 5.4.1.3). Aus diesen wird abermals eine Bewertung durchgeführt. Die anschließende *Gesamtbewertung* (siehe Abschnitt 5.4.1.4) kombiniert beide Bewertungsstufen. Sie liefert eine Aussage über die Eignung eines Teils für die additive Fertigung. Eine abschließende *Kostenanalyse* (siehe Abschnitt 5.4.1.5) für unterschiedliche Materialien, Druckgeschwindigkeiten, Lagerszenarien und Zeiträume ermöglicht letztinstanzlich die Entscheidung bezüglich der Umstellung der Ersatzteilversorgung für das betrachtete Teil auf AM (intern).



### 5.4.1.1 Ersatzteildatenbank

Um alle Daten (siehe Abbildung 24) zusammenzuführen, wird ein Workflow im „*Alteryx Designer*“<sup>16</sup> aufgebaut. Die Datenverknüpfung ist in Abbildung 27 abgebildet.

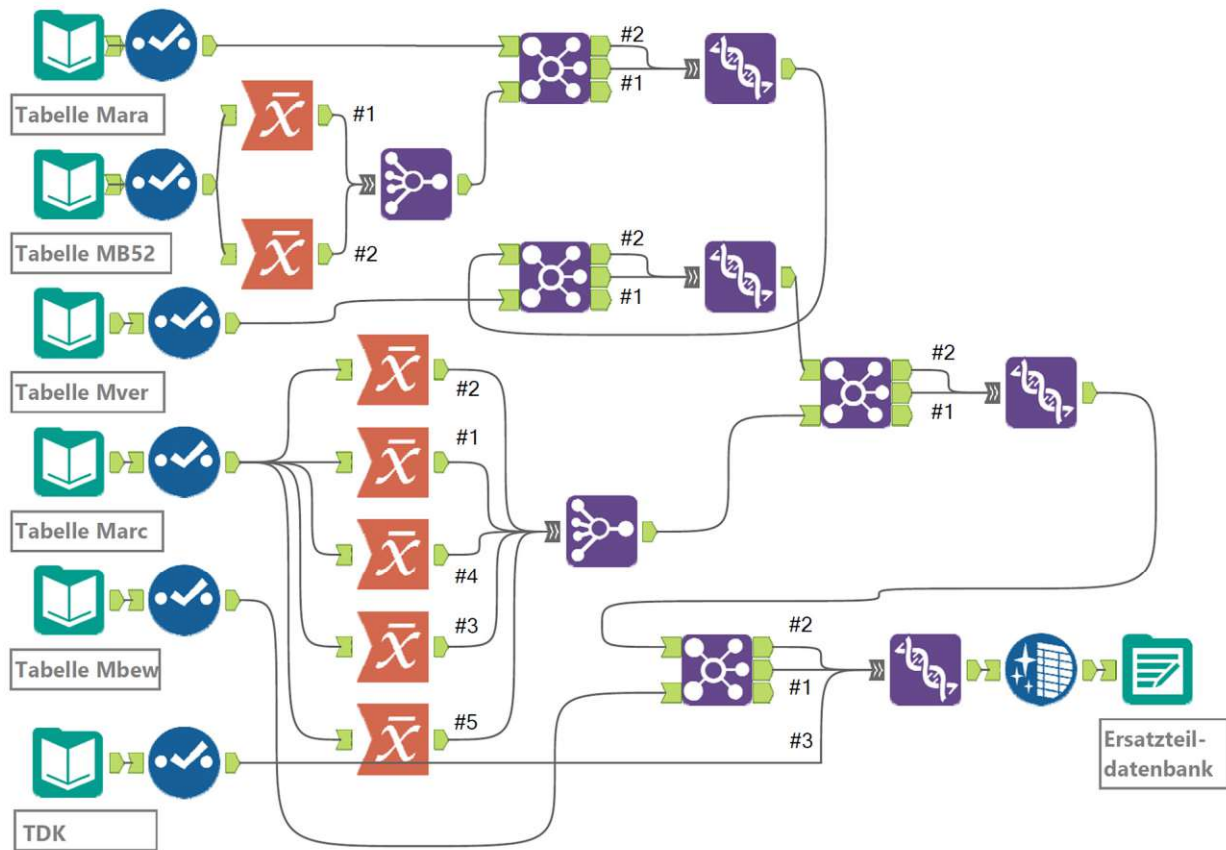


Abbildung 27: Auszug des schematischen Datenbankmodells in Alteryx (eigene Darstellung)

Durch den Workflow kann mit minimalen unternehmensabhängigen Anpassungen eine standardisierte Ersatzteildatenbank aufgebaut werden. Über Akkumulatoren, gerichtete und ungerichtete Verknüpfungen sowie Funktionen zur Datenbereinigung werden die in Abschnitt 5.1 erhobenen Datenquellen über die Materialnummer gekoppelt. Die in Abbildung 27 verwendeten Funktionen können über Erläuterungen oder Tutorials des Programmherstellers<sup>17</sup> nachvollzogen werden. Daher werden diese in der Arbeit nicht gesondert vorgestellt.

Zusätzlich zu den unternehmensspezifischen Daten werden über eine Material- und Druckerdatenbank dem Modell Parameter übermittelt.

### 5.4.1.2 Automatisierte Bewertung

Zur automatisierten Bewertung werden die in Abschnitt 5.3 definierten Merkmale herangezogen und in die Bewertungsbereiche (siehe Abbildung 25) eingeteilt. Weiters

<sup>16</sup> Programm zur Vereinfachung der Aufbereitung, des Zusammenführens und der Analyse von Daten.

<sup>17</sup> <https://www.alteryx.com/>

wird über die Abfrage von Prüfkriterien die Bewertung (siehe Formel 11 und Formel 12) durchgeführt. Anzumerken ist, dass aus Sicht der Experten pauschale Anforderungen an Ausprägungen von Merkmalen im Schienenfahrzeugbereich nicht das gewünschte Ergebnis erzielen (Expertenworkshop Anforderungen, persönliche Korrespondenz, Wien, 25.01.2022). Folglich ist zur Beurteilung mancher Prüfkriterien ein Grenzwert (GW) im Vorfeld über Filter durch den Nutzer einzustellen.

Tabelle 12 liefert eine Übersicht über den Zusammenhang zwischen Bewertungsbereichen, Merkmalen und Prüfkriterien. Die Prüfkriterien werden über einen Algorithmus (siehe Abbildung 28) vom Modell abgefragt.

Automatisierte Bewertung					
Bewertungsbereich	Merkmal	Ausprägung			
		Prüfkriterium	Spricht für AM	Spricht gegen AM	
SB_A <sub>1</sub>	Fertigungscharakteristik	Dimensionen	Bauraum groß genug?	True	False
		Werkstoff	Werkstoffgattung entspricht Fertigungseinheit?		
		Bauteilkomplexität	(Volumen ET/Volumen Bounding Box) < GW (User Input)?		
		Oberflächengüte	RA (Druckerspezifisch) < GW (Bauteilspezifisch)?		
		Technische Informationen	Technische Zeichnung und/oder Bild verfügbar?		
		Fertigungsgrad	Einzelteil oder Schweißbaugruppe?		
		Nachbearbeitungsbedarf	Allgemeintoleranz m, c oder v?		
		Fertigungskapazität	Anzahl Bohrungen/Gewinde/Form- und Lagetoleranzen < GW (User Input)?		
SB_A <sub>2</sub>	Beschaffungscharakteristik	Fertigungskapazität	Fertigungskapazität (User Input) => Durchschnittlicher Verbrauch	True	False
		Beschaffungszeit	Beschaffungszeit > GW (User Input)		
		Maximallosgröße	(Durchschnittlicher Verbrauch/Maximallosgröße) > 1		
		Mindestlosgröße	(Durchschnittlicher Verbrauch/Mindestlosgröße) < 1		
SB_A <sub>3</sub>	Lagerhaltungscharakteristik	Teilwert	Teilwert > GW (User Input)?	True	False
		Verbrauch	Verbrauch (Durchschnitt) > GW (User Input)?		
		Verbrauchsregelmäßigkeit	Variationskoeffizient > GW (User Input)?		
		Lagerreichweite	Lagerreichweite > GW (User Input)?		
SB_A <sub>4</sub>	Kostencharakteristik	Einsparungspotenzial	Einsparung > 0?		
SB_A <sub>5</sub>	Kritikalitätscharakteristik	Sicherheitsrelevanz	Unkritisches Teil?		
SB_A <sub>6</sub>	Optimierungscharakteristik				

Tabelle 12: Übersichtsdarstellung der Automatisierten Bewertung (eigene Darstellung)

Abhängig davon, ob die in der vierten Spalte von Tabelle 12 angeführten Prüfkriterien erfüllt („Spricht für AM“) oder nicht erfüllt („Spricht gegen AM“) sind, wird die Bewertung  $m_{ji}$  mit dem Wert null oder eins belegt (siehe Formel 11). Diese hat Einfluss auf den Score  $SB_{A_{xj}}$  für die einzelnen Bewertungsbereiche eines Ersatzteiles x. Über die Gewichtung  $f_{ji}$  kann innerhalb des Bewertungsbereichs  $m_{ji}$  gewichtet werden.

$$SB_{A_{xj}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} m_{ji} * f_{ji}}{\sum f_{ji}}$$

mit

$SB_{A_{xj}}$  ... Bereichsscore für das Ersatzteil x [-]

$m_{ji}$  ... Bewertung (true = 1; false = 0) [-]

$n_j$  ... Anzahl der Merkmale des Bereichs j [-]

$f_{ji}$  ... Merkmalgewichtung [-]

$i$  ... Merkmalindex [-]

$j$  ... Bereichsindex [-]

Formel 11: Berechnung der Bereichsbewertung eines Ersatzteils (eigene Darstellung)

Identisch zur Bewertung der Bereiche erfolgt die Ermittlung des Gesamtscores (siehe Formel 12). Dieser setzt sich aus den Bereichsbewertungen  $SB_{A_{xj}}$  und der benutzerspezifischen Gewichtung der Bereiche  $g_j$  zusammen und wird skaliert.

$$S_{A_x} = \frac{\sum_{j=1}^n SB_{A_{xj}} * g_j}{\sum g_j}$$

mit

$S_{A_x}$  ... Ersatzteilscore für das Teil x [-]

$g_j$  ... Gewichtung Bereich j [-]

$n$  ... Anzahl der Bereiche [-]

**Formel 12: Berechnung des Ersatzteilscores eines Teils (eigene Darstellung)**

Mit den Ersatzteilscores  $S_{A_x}$  aller Materialnummern wird im Anschluss an die Bewertung eine Rangfolge gebildet. Da sich Teile mit einem hohen Score eher für die additive Fertigung eignen, dienen diese als Ausgangspunkt für den in Abschnitt 5.4.1.3 vorgestellten manuellen Teil der Bewertung. Im nachfolgenden Ablaufdiagramm (siehe Abbildung 28) wird die Vorgehensweise und Umsetzung des Programmes zur automatisierten Potenzialbewertung vorgestellt. Zur anschaulichen Visualisierung der Informationsverarbeitungslogik werden die Richtlinien der DIN 66001 (vgl. DIN 66001-1:1983-12 1983, S. 2-20) berücksichtigt.

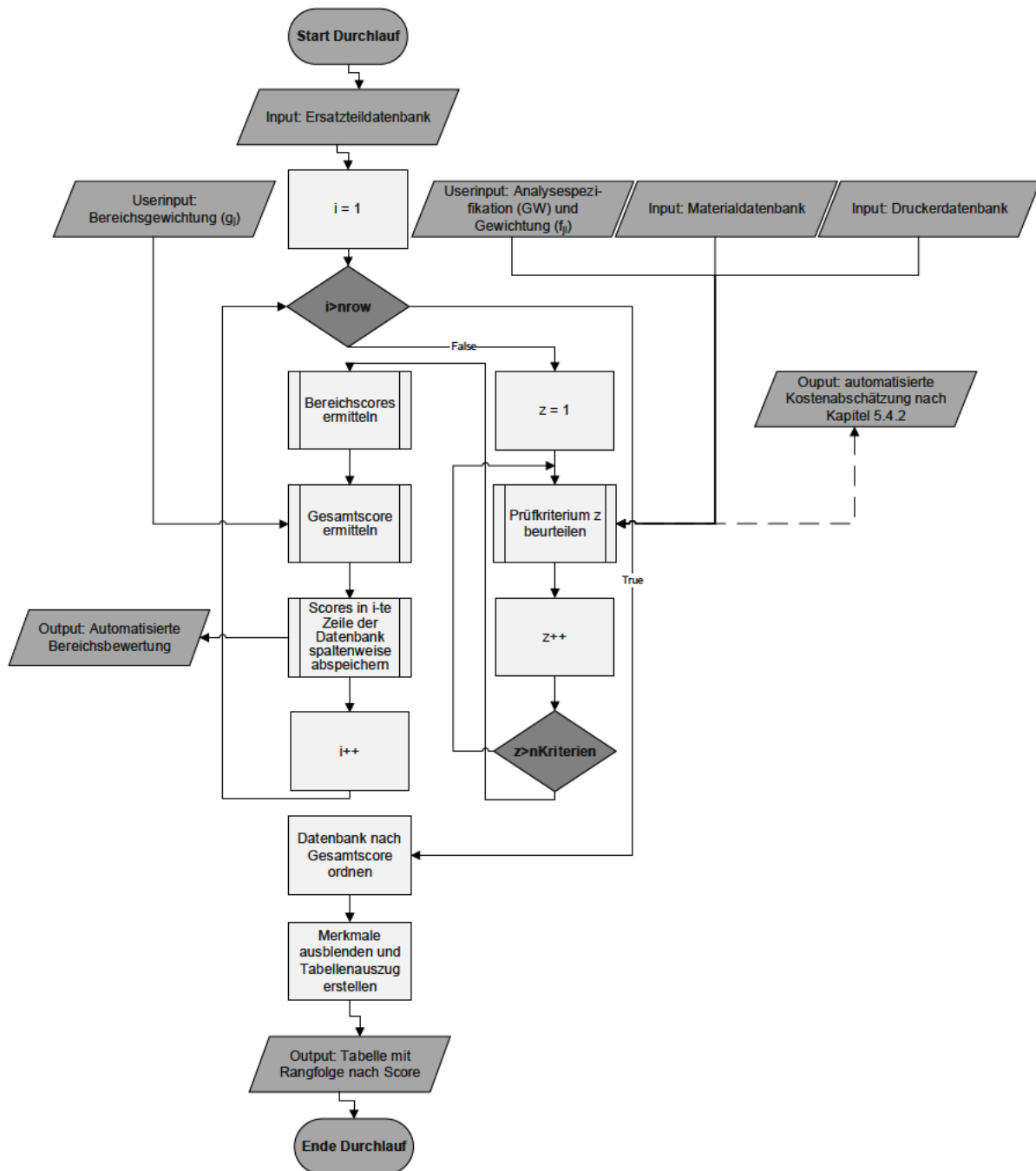


Abbildung 28: Programmablaufdiagramm entsprechend DIN 66001 zur automatisierten Bewertung und Rangfolgenbildung (eigene Darstellung)

Das Programm startet mit dem Zugriff auf die *Ersatzteildatenbank*. In dieser sind alle auswertungsrelevanten Merkmale für jedes Ersatzteil hinterlegt (siehe Abschnitt 5.1). Der Algorithmus durchläuft zeilenweise die Datenbank (Zählvariable  $i$ ) und analysiert jedes Ersatzteil. In der Analyse werden im Unterprogramm „Prüfkriterium  $z$  beurteilen“ die Bewertungen mit  $m_{ji}$  (Zählvariable  $z$ ) durchgeführt und im Anschluss nach Formel 11 die Bereichsbewertungen errechnet und abgespeichert. Das Ergebnis ist eine nach dem Gesamtscore absteigend geordnete Liste von Materialnummern. Neben den Nummern werden weiters  $S_{A_x}$  und die einzelnen  $SB_{A_{xj}}$  sowie das geschätzte Einsparungspotenzial (siehe Abschnitt 5.4.2) angezeigt.

### 5.4.1.3 Manuelle Bewertung

In Anlehnung an die manuellen Bewertungsansätze von Schlögel et al. (2021) und Ilg (2019) wird in diesem Kapitel eine Methodik zur manuellen Teilebewertung entwickelt. Ausgangspunkt sind die in Abschnitt 5.3 ausgewählten Ersatzteilmerkmale. Diese werden den Bewertungsbereichen aus Abbildung 25 zugeordnet. Die Tabelle 13 liefert eine Übersicht zu den Bewertungsbereichen, den verwendeten Merkmalen und deren möglichen Ausprägungen. Die Bewertung erfolgt für ein über die Rangfolge (siehe Abschnitt 5.4.1.2) ausgewähltes Ersatzteil.

Manuelle Teilebewertung						
Bewertungs- bereich	Merkmal	Ausprägung				
SB_M <sub>x1</sub>	Fertigungs- charakteristik	Nachbearbeitungsbedarf	keine (3)	gering (2)	mittel (1)	hoch (0)
		Brandschutzanforderungen	nicht zu berücksichtigen (1)	zu berücksichtigen (0)		
		Mechanische Belastung in Funktion	keine (3)	gering (2)	mittlere (1)	hohe (0)
		3D-Modell verfügbar	nein (0)	ja über OEM/OCM (1)	ja (2)	
		Werkstoff druckbar	nein (0)	ja mit Substitution (1)	ja (1)	
		Nachkonstruktion	nicht relevant	nicht möglich (0)	möglich (1)	
SB_M <sub>x2</sub>	Beschaffungs- charakteristik	Lebenszyklusphase	X < EDO   LOC (0)	EDO < X < EOS (1)	EOS < X < EOA (2)	X > EOA (3)
		Obsoleszenzrisiko	gering (0)	mittel (1)	hoch (2)	
		Beschaffungsquellen	<= 1 (2)	2 (1)	> 2 (0)	
		Dringlichkeit	gering (0)	mittel (1)	hoch (2)	
		Ersatzteilsteher	ja (1)	nein (0)		
		Kannibalisierungsmöglichkeit	nicht relevant	nein (1)	ja (0)	
		Teilekompatibilität	nicht relevant	nein (1)	ja (0)	
SB_M <sub>x3</sub>	Lagerhaltungs- charakteristik	Lagerfähigkeit Rohmaterial	nicht gegeben (0)	gegeben (1)		
		Lagerfähigkeit ET	nicht gegeben (1)	gegeben (0)		
SB_M <sub>x4</sub>	Kosten- charakteristik	Qualitätsprüfungskosten	Input Schätzwert (pro Jahr)			
		Redesingkosten	Input Schätzwert (einmalig)			
		Patent- und Zulassungskosten	Input Schätzwert (einmalig)			
		Anschaffungskosten Maschinen/Werkzeug	Input Schätzwert (einmalig)			
		Nachbearbeitungskosten	Input Schätzwert (pro Stück)			
SB_M <sub>x5</sub>	Kritikalitäts- charakteristik	Ausfallwahrscheinlichkeit	gering (2)	mittel (1)	hoch (0)	
		Kritikalität	unkritisch (2)	kritisch (1)	sehr kritisch (0)	
SB_M <sub>x6</sub>	Optimierungs- charakteristik	Enabler - Leichtbau	nicht möglich (0)	möglich (1)		
		Enabler - Funktionsintegration	nicht möglich (0)	möglich (1)		
		Enabler - Materialsubstitution	nicht möglich (0)	möglich (1)		
		Enabler - Integralbauweise	nicht möglich (0)	möglich (1)		

Tabelle 13: Übersichtsdarstellung der manuellen Bewertung (eigene Darstellung)

Je nach Ausprägung eines Merkmales wird der Wert  $m_{jk}$  vergeben. Dieser Wert ist merkmals- und unternehmensspezifisch anzupassen und in Tabelle 13 schematisch dargestellt (Zahl in Klammer). Je höher der Wert, desto mehr spricht die Ausprägung des Merkmals für die additive Fertigung. Um zwischen den Merkmalen keine Übergewichtung zu generieren, wird  $m_{jk}$  mit dem Höchstwert der möglichen Merkmalsausprägung  $m_{jk\_höchst}$  skaliert. Die Bereichsbewertung  $SB_{M_{xj}}$  ergibt sich wie in Formel 13 beschrieben.

$$SB_{M_{xj}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} (m_{jk} / m_{jk\_höchst})}{n_j}$$

mit

$SB_{M_{xj}}$ ... Bereichsscore [-]	$m_{jk}$ ... Bewertung (z.B. NULL - 3) [-]
$k$ ... Merkmalindex [-]	$m_{jk\_höchst}$ ... Höchstwert Ausprägungsbewertung [-]

Formel 13: Berechnung der manuellen Bereichsbewertung für ein Ersatzteil (eigene Darstellung)



Ist kein Punktwert für  $m_{jk}$  zu vergeben („nicht relevant“) wird  $n_j$  reduziert. Für die *Kostencharakteristik* ergibt sich  $m_{jk}$  über das ermittelte Einsparungspotenzial (siehe Abschnitt 5.4.2). In diesem werden die numerischen Eingaben von  $SB_{M_{x4}}$  berücksichtigt.  $m_{jk}$  erhält den Wert eins, wenn das Einsparungspotenzial größer null ist. Ausgehend von der vorgestellten Potenzialbewertungslogik lässt sich der Programmablaufplan wie folgt darstellen (siehe Abbildung 29).

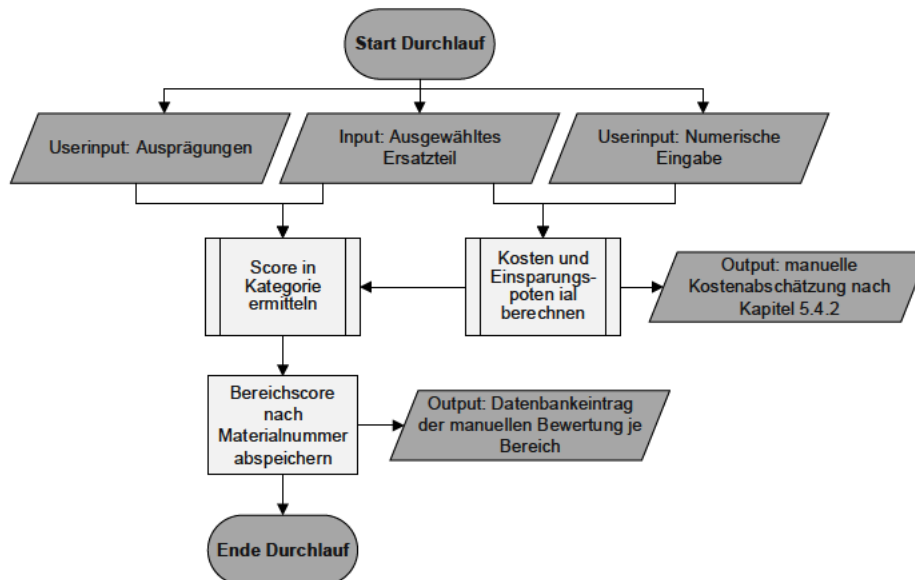


Abbildung 29: Programmablaufdiagramm der manuellen Teilebewertung entsprechend DIN 66001 (eigene Darstellung)

Zu Beginn beurteilt der User für ein im vorgelagerten Schritt (siehe Abschnitt 5.4.1.2) ausgewähltes Ersatzteil die Ausprägungen der Merkmale (siehe Tabelle 13). Diese Inputs gehen in das Programm ein. Danach wird für jeden Bewertungsbereich ein Score ermittelt und der Ersatzteildatenbank übergeben.

#### 5.4.1.4 Gesamtbewertung

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 5.4.1.2 und Abschnitt 5.4.1.3 dargestellten Bewertungsansätze verknüpft. Da dieselben Bewertungsbereiche (siehe Abbildung 25) verwendet werden, kann der Gesamtscore  $SB_{xj}$  nach der Formel 14 ermittelt werden.

$$SB_{xj} = \frac{SB_{Axj} * n_{jA} + SB_{Mxj} * n_{jM}}{n_{jA} + n_{jM}}$$

mit

$SB_{xj}$  ... Bereichsscore gesamt [-]

$n_{jM}$  ... Anzahl der Merkmale von j der manuellen Bewertung [-]

$n_{jA}$  ... Anzahl der Merkmale von j der automatisierten Bewertung [-]

Formel 14: Berechnung der kombinierten Bereichsbewertung eines Ersatzteiles (eigene Darstellung)



Die Abbildung 30 verdeutlicht den Ablauf des Programmes zur kombinierten Bewertung eines Ersatzteiles.

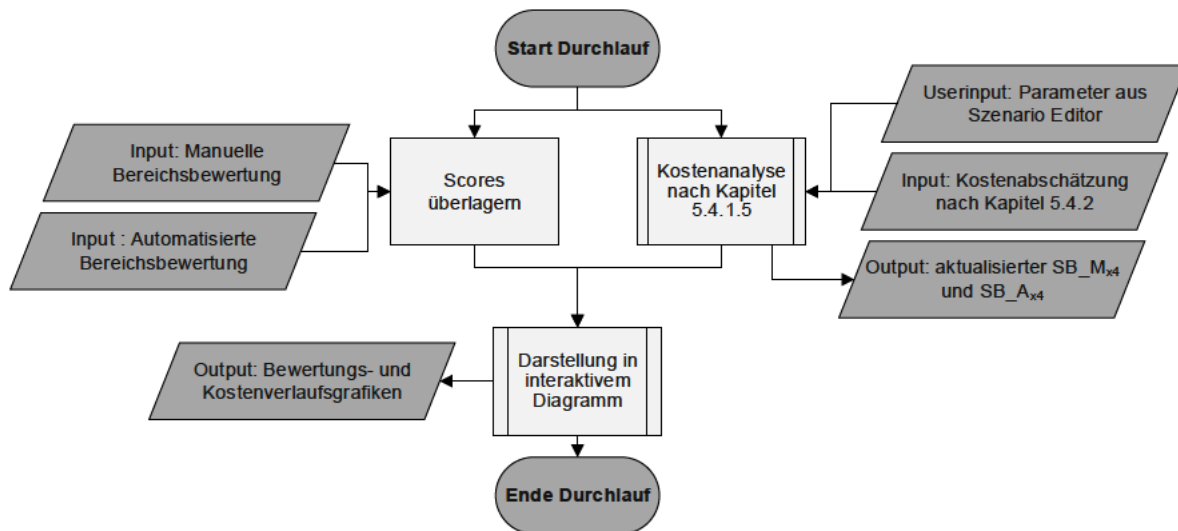


Abbildung 30: Programmablaufdiagramm zur Darstellung der gesamten Bereichsbewertungen nach DIN 66001 (eigene Darstellung)

Parallel zur Kostenanalyse (siehe Kapitel 5.4.1.5) werden die Scores der Bewertungsbereiche nach Formel 14 überlagert. Je höher der Score in den einzelnen Bereichen, desto besser eignet sich ein Teil für die additive Fertigung. Der Wert 1 ist aufgrund der Skalierung der Teilbewertungen die Maximalbewertung von  $SB_{xj}$ . Auf einen Gesamtscore wird aufgrund der fehlenden Aussagekraft verzichtet. Zur Analyse der Ergebnisse ist es bedeutsam, die prozentuelle Aufteilung der manuellen und automatisierten Bewertung an der Gesamtbewertung transparent darzustellen. Die Darstellungen erfolgen als interaktive Grafiken in Form von gruppenbasierten und gestapelten Balkendiagrammen.

#### 5.4.1.5 Kostenanalyse

Die Kostenanalyse ermöglicht es, über einen *Szenario Editor* ersatzteilspezifisch und standardisiert Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der AM zu treffen. Neben der Betrachtung auf Stückkostenebene werden die kumulierten Gesamtkosten visualisiert und das Einsparungspotenzial dargestellt. Außerdem ermöglicht der *Szenario Editor* in Abhängigkeit von der Lebenszyklusphase eines Ersatzteils (siehe dazu Abbildung 22) den Kostenvergleich zwischen den in Abschnitt 4.2 erörterten AM-Einsatzgebieten und konventionellen ET-Versorgungsstrategien.

Über den Editor können folgende Größen gesteuert werden:

- Betrachtungszeitraum
- Konventionelle Lagerhaltungsstrategie inkl. Umstieg auf Endbevorratung
- Lagerhaltungsstrategie bei AM
- Verwendetes Material

- Reduzierung von Ausfällen durch Redesign/Materialsubstitution
- Schichthöhe des Druckes
- Bauraumanordnung der Teile im Drucker

Die Berechnungen erfolgen nach den in Abschnitt 5.4.2 vorgestellten Formeln. Werden durch den Szenario Editor Standardeinstellungen geändert, hat dies unmittelbaren Einfluss auf die *Kostencharakteristik* (automatisiert und manuell) und verändert infolgedessen den Bereichsscore in der Gesamtbewertung.

## 5.4.2 Algorithmus zur Kostenberechnung

Zur Erhebung der *Kostencharakteristik* für die *Automatisierte Bewertung* (siehe Abschnitt 5.4.1.2) werden die in Abschnitt 2.3.4 vorgestellten Berechnungen von  $K_{AM}$  herangezogen. Diese werden auf Stückkostenebene mit Beschaffungskosten aus der Datenbank verglichen. Der Betrachtungshorizont beträgt 5 Jahre, um Verzerrungen durch stückzahlunabhängige Kosten wie beispielsweise den Designkosten abzumindern. Anzumerken ist, dass Pre-Processing- und Post-Processing-Kosten lediglich eingeschränkt automatisiert berücksichtigt werden können. Die Designkosten und Vorbereitungskosten aus Kapitel 2.3.5 können auf Grundlage von empirischen Versuchen abgeschätzt werden. Bei den Post-Processing-Kosten lassen sich durchschnittliche Nachbereitungskosten ermitteln. Die Nachbearbeitungskosten variieren stärker als die Nachbereitungskosten und hängen von unterschiedlichen Parametern ab. Sie können nur durch Experten festgelegt werden. Daher werden diese Kosten erst bei der Durchführung der *Manuellen Bewertung* in  $K_{AM}$  berücksichtigt. Bei dieser wird die zur Rangfolgenbildung beschriebene Kostenermittlung durch Expertenschätzungen präzisiert (siehe Tabelle 13). Unter anderem werden ergänzend zu  $K_{AM}$  die Kosten  $K_{Re}$ ,  $K_A$ ,  $K_{PZ}$  und  $K_Q$  vom Algorithmus berücksichtigt (siehe dazu Formel 15). Im Zuge der Kostenanalyse kann über den *Szenario Editor* (siehe Abschnitt 5.4.1.5) die erwartete Änderung des Lagerbestandes bei AM durch  $\alpha_{BAM}$  in die Berechnung integriert werden. Zwischenzeitliche Lagerkosten für additiv gefertigte Teile werden über in den Raumkosten  $K_R$  (siehe Formel 8) enthaltenen Zwischenlagerplätzen mitberücksichtigt. Die Stückkosten  $K_x$  ergeben sich wie in Formel 15 angeführt:

$$K_x = K_{AM} + \frac{K_{Re} + K_A + K_{PZ} + (K_Q \times J) + (B \times J \times EKP \times LKS \times \alpha_{BAM})}{J \times V}$$

mit

 $K_x$  ... Stückkosten AM Teil x [€/Stk.] $B$  ... Durchschnittlicher Lagerbestand [Stk./a] $K_{Re}$  ... Redesignkosten [€] $EKP$  ... Einkaufspreis [€/Stk.] $K_A$  ... Anschaffungskosten Maschinen und Werkzeug [€] $LKS$  ... Lagerkostensatz [%] $K_{PZ}$  ... Patent- und Zulassungskosten [€] $\alpha_{BAM}$  ... Bestandsänderung bei AM [%] $K_Q$  ... Qualitätsprüfungskosten [€/a] $V$  ... Durchschnittlicher jährlicher Verbrauch [Stk./a] $J$  ... Anzahl der Jahre [a]**Formel 15: Berechnung der Stückkosten eines Ersatzteiles (eigene Darstellung)**

Zur Ermittlung der *Kostencharakteristik* bei der manuellen Bewertung werden die Stückkosten  $K_x$  mit  $KB_x$  entlang eines fünfjährigen Zeithorizonts (Standardeinstellung) verglichen.  $KB_x$  enthält neben den Beschaffungskosten für ein Teil x die Lagerkosten des durchschnittlichen Bestandes bezogen auf den Jahresverbrauch (siehe Formel 16). In diesem Fall kann wie in Formel 15 über den *Szenario Editor* im Anschluss an die manuelle Bewertung teilespezifisch Einfluss auf die Berechnung genommen werden.

$$KB_x = EKP + \frac{B \times EKP \times LKS}{V} \times \alpha_B$$

mit

 $KB_x$  ... Beschaffungskosten Teil x [€/Stk.] $\alpha_B$  ... Bestandsänderung [%]**Formel 16: Berechnung der Stückkosten der konventionellen Beschaffung (eigene Darstellung)**

Mengenrabatte werden in der Berechnung von  $KB_x$  nicht berücksichtigt, da diese in den durchschnittlichen Bestellpreisen im SAP enthalten sind. Weiters werden Mindestbestellmengen in den Auswertungen der *Beschaffungscharakteristik* untersucht und in Formel 16 nicht aufgegriffen.

Wird bei der Kostenanalyse von einer Endbevorratung ausgegangen, lassen sich die durchschnittlichen Stückkosten abhängig vom Zeitraum mit der Formel 17 berechnen.

$$KEB_x = EKP + \frac{EKP \times LKS \times J}{2}$$

mit

 $KEB_x$  ... Durchschnittliche Kosten Teil x bei Endbevorratung [€/Stk.]**Formel 17: Berechnung der durchschnittlichen Stückkosten der Endbevorratung (eigene Darstellung)**

Für die *Kostencharakteristik* wird das Szenario der Endbevorratung nicht standardmäßig betrachtet.

Die Herangehensweise zur Evaluierung des Einsparungspotenzials ist Formel 18 zu entnehmen. Je nach Auswahl im *Szenario Editor* ist entweder  $KB_x$  oder  $KEB_x$  für die Rechenoperation heranzuziehen.

$$EP_x = (K_x(J) - KB_x) \times V \times J$$

mit

$EP_x$ ... Einsparungspotenzial Teil x [€]

**Formel 18: Berechnung des Einsparungspotenzials (eigene Darstellung)**

Das Einsparungspotenzial  $EP_x$  ist bei hohen anfänglichen Kosten von der Anzahl der betrachteten Perioden abhängig. Weiters hat die geplante Lagerhaltungsstrategie in Form von Bestandsänderungen oder einer Endbevorratung direkte Auswirkungen auf  $EP_x$ .

## 6 Anwendung des Bewertungsmodells

### 6.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das entwickelte teilautomatisierte Potenzialbewertungsmodell (siehe Abschnitt 5) wird in einem Fallbeispiel mit einem österreichischen Schienenfahrzeugbetreiber in der Praxis evaluiert. Zu diesem Zweck wird das Bewertungsmodell in Form einer R-Shiny<sup>18</sup> Applikation entsprechend der in Abschnitt 5.4.1 vorgestellten Programmablaufpläne realisiert.

Das in R-Shiny umgesetzte Artefakt liefert als Output folgende Erkenntnisse:

- AM-Eignung von ET aus wirtschaftlicher und technischer Sicht
- Ranking von Ersatzteilen nach deren AM-Potenzial
- Kostentransparenz zwischen ET-Versorgungsstrategien
- Visualisierung von Einsparungspotenzialen

Der am Use Case beteiligte SFB hat über 100.000 unterschiedliche ersatzteilbedürftige Teile in seiner Fahrzeugflotte im Umlauf und führt Instandhaltungsarbeiten selbst durch. Über die Jahre ist die Teileanzahl signifikant gestiegen, da Züge unterschiedlicher Hersteller und Generationen eingesetzt werden. Infolgedessen sind die Lagerbestände des SFB gewachsen und das Risiko einer Bauteilobsoleszenz ist dadurch stark angestiegen. Außerdem kommt es durch fehlende Teile zu kostenintensiven Ersatzteilsteuern. Die Ersatzteilbereitstellung erfolgt über konventionelle Beschaffungsmethoden. Bisher werden lediglich 71 unterschiedliche ET für die Instandhaltung mittels AM gefertigt. Über 80 Prozent dieser additiv gefertigten und in Zügen verbauten Teil stammen von Auftragsfertigern. Die Evaluierung von potenziellen Teilen für AM erfolgt aktuell über einen Bottom-Up-Ansatz und explorative Datenanalysen. Es gibt folglich keine strukturierte und einheitliche Vorgehensweise zur Teileidentifikation. Der aktuelle Identifikationsprozess für AM im EM ist nachfolgend in Abbildung 31 dargestellt.

Für die Evaluierung des Bewertungsmodells nach DSRM-Schritt 5 (siehe dazu Tabelle 1) werden das Ersatzteilspektrum definiert (Abschnitt 6.2), Druckversuche durchgeführt (Abschnitt 6.3) sowie Modellparameter (Abschnitt 6.4) erhoben. Außerdem erfolgt der Aufbau einer Ersatzteildatenbank (Abschnitt 6.5) und die Vorstellung der entwickelten Applikation (Abschnitt 6.6). In Kapitel 6.7 werden die Ergebnisse des Fallbeispiels präsentiert. Zum Ende des Kapitels wird auf die Restriktionen sowie Rahmenbedingungen (Abschnitt 6.8) des Bewertungsmodells eingegangen.

<sup>18</sup> Shiny ist ein Open-Source-Paket der Programmiersprache R für die Erstellung von interaktiven Webapplikationen.

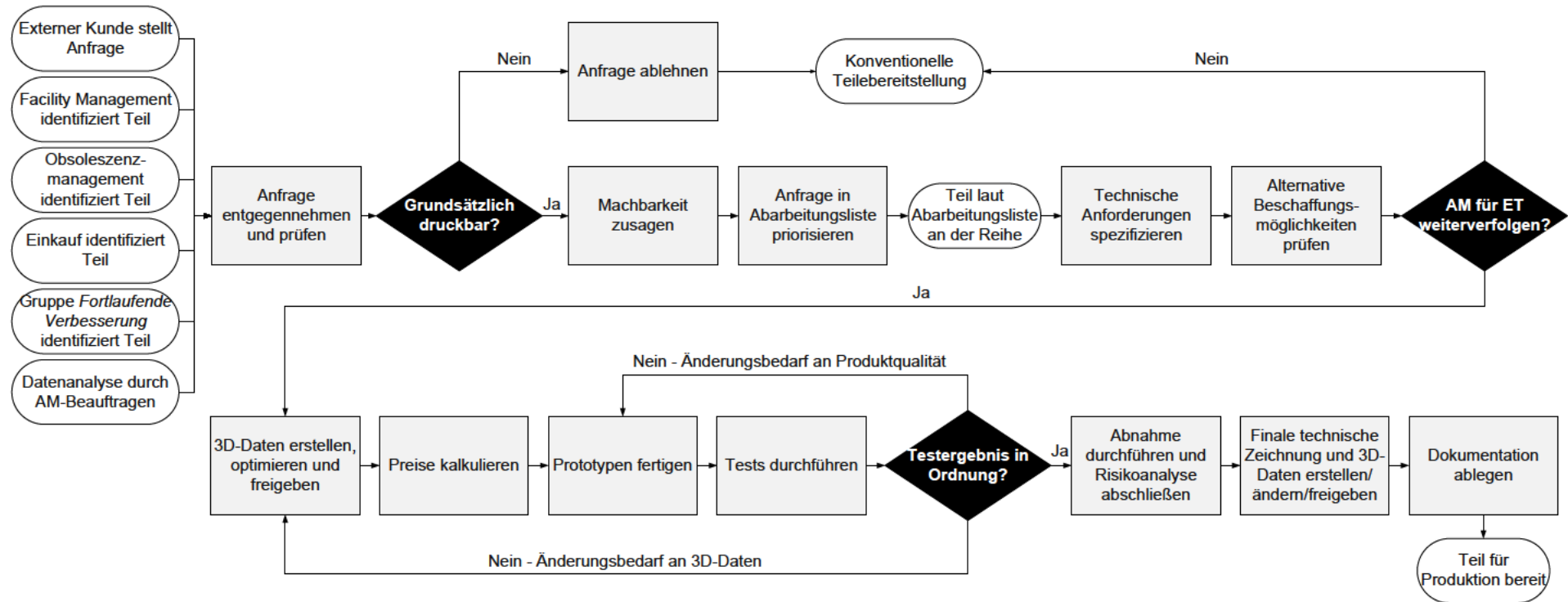


Abbildung 31: Aktueller Identifikationsprozess für AM aus Sicht der AM-Abteilung des Anwendungsunternehmens (eigene Darstellung)



## 6.2 Ersatzteilspektrum des Fallbeispiels

Als Untersuchungsrahmen des Fallbeispiels wird ein heterogenes Ersatzteilspektrum festgelegt. Es werden sowohl Kunststoff- als auch Metallteile mit unterschiedlichen Lager-, Beschaffungs- und Einsatzzyklen definiert. Das Anwendungsunternehmen stellt dazu die in Tabelle 14 dargestellten fünf Teile zur Verfügung. Ergänzend zu ausgewählten Merkmalen wird für jedes Teil die Einschätzung eines Experten hinsichtlich AM-Eignung festgehalten. Der Experte berücksichtigt neben der technischen Machbarkeit auch wirtschaftliche Aspekte.

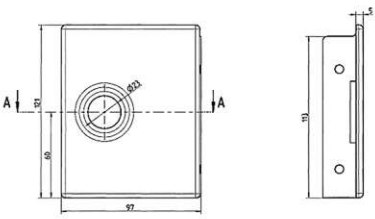
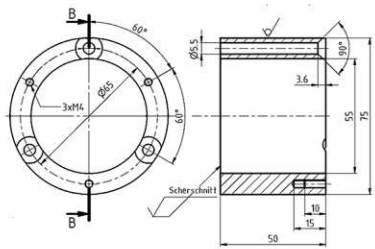
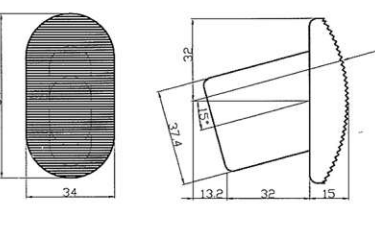
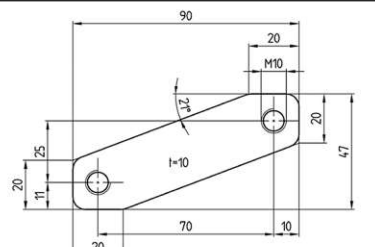
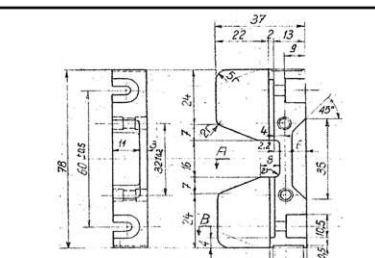
Teil 1	Materialnummer	12123XXXX	
	Beschreibung	Steckdosenklappe	
	Volumen	72390 mm <sup>3</sup>	
	Werkstoff	GFK SMC	
	Verbrauch	4 Stk./a	
	Bezugspreis	231,36 €/Stk.	
	Bestand	14 Stk.	
Variationskoeffizient	3,23		
Druckbar	Ja		
Teil 2	Materialnummer	46552XXXX	
	Beschreibung	Gehäuse für Taster	
	Volumen	97972 mm <sup>3</sup>	
	Werkstoff	AlMgSi1 F31	
	Verbrauch	48 Stk./a	
	Bezugspreis	60,3 €/Stk.	
	Bestand	42 Stk.	
Variationskoeffizient	1,54		
Druckbar	Nein		
Teil 3	Materialnummer	12587XXXX	
	Beschreibung	Bettleiterfuß	
	Volumen	36049 mm <sup>3</sup>	
	Werkstoff	Gummi (Details fehlen)	
	Verbrauch	55 Stk./a	
	Bezugspreis	38,5 €/Stk.	
	Bestand	200 Stk.	
Variationskoeffizient	3,69		
Druckbar	Ja		
Teil 4	Materialnummer	83916XXXX	
	Beschreibung	Gewindeplatte Düse	
	Volumen	20445 mm <sup>3</sup>	
	Werkstoff	S355J2G3	
	Verbrauch	5 Stk./a	
	Bezugspreis	169 €/Stk.	
	Bestand	7 Stk.	
Variationskoeffizient	3,65		
Druckbar	Nein		
Teil 5	Materialnummer	46116XXXX	
	Beschreibung	Hilfsschalter Steuerblock	
	Volumen	20202 mm <sup>3</sup>	
	Werkstoff	unbekannt	
	Verbrauch	8 Stk./a	
	Bezugspreis	502 €/Stk.	
	Bestand	47 Stk.	
Variationskoeffizient	1,76		
Druckbar	Nein		

Tabelle 14: Ersatzteilspektrum im Fallbeispiel (eigene Darstellung)

### 6.3 Empirische Druckversuche

Im folgenden Abschnitt wird auf empirische Druckversuche zur Evaluierung des Bewertungsmodells eingegangen.

Das *teilautomatisierte Potenzialbewertungsmodell* zieht zur Bewertung, wie im Programmablaufdiagramm in Abbildung 28 dargestellt, spezifische Parameter aus einer Druckerdatenbank heran. Für die *Fertigungscharakteristik* werden beispielsweise die Größe des Bauraums sowie fertigbare Toleranzen der additiven Fertigungseinheit benötigt. In Bezug auf die *Kostencharakteristik* benötigt das Modell weiters die durchschnittliche Aufbaurrate zur Ermittlung der Fertigungskosten (siehe dazu Formel 6).

Da den Betreibern von 3D-Druckern in der Regel nicht alle für das in Abschnitt 5.4 entwickelte Potenzialbewertungsmodell benötigten Parameter bekannt sind, müssen für jede in der *Druckerdatenbank* befindlichen AM-Anlage fehlende Parameter empirisch erhoben werden. Im Zuge des Fallbeispiels wird dies exemplarisch an einem vordefinierten Drucker illustriert.

Sowohl zur Versuchsdurchführung als auch im Fallbeispiel wird der Drucker *Stratasys F170* aus der F123-Serie des Unternehmens *Stratasys Ltd.* verwendet. Es handelt sich um einen FDM-Drucker (siehe Abschnitt 2.3.3) für industrielle Anwendungen. Die Anlage ist für den Druck von Elastomeren ausgelegt und bietet sich mit einem Bauraum von 254 x 254 x 254 Millimetern (XYZ-Abmessungen) zur Herstellung von Ersatzteilen an. Der *F170* arbeitet bei komplexen Teilen mit Stützmaterial und ist mit einer zweiten Materialspele ausgestattet. Die Abbildung 32 fasst die wichtigsten technischen Informationen zusammen.

Technische Produktdaten F170		
Größe	1626 mm × 864 mm × 711 mm	
Gewicht	227 kg (inkl. Material)	
Geräuschspezifikation	bis 46 dB (Betrieb) 35 dB (Leerlauf)	
Schichtstärke	0,127 mm 0,178 mm	0,254 mm 0,33 mm
Materialien	PLA ABS-M30 ABS-CF10 ASA	PC-ABS ABS-ESD7™ Diran™ 410MF07ire FDM™ TPU 92A
Genauigkeit	±0,002 mm/mm	±0,200 mm/mm
Betriebsumgebung	T: 15 - 30 °C, rF: 30 - 70 % (Betrieb) T: 0 - 35 °C, rF: 20 - 90 % (Lagerung)	
Strombedarf	100-132 V/ 15 A 200-240 V/ 7 A	50/60 Hz
Software	GrabCAD Print	



Abbildung 32: Produktdaten *Stratasys F170* (vgl. *Stratasys Printer Catalog 2022*)

Dem Produktblatt in Abbildung 32 können für die *Fertigungscharakteristik* alle wichtigen Informationen entnommen werden. Da für die *Kostencharakteristik* wesentliche Parameter wie die Aufbaurrate, der Materialbedarf sowie die Auswirkung

der Bauraumanordnung nicht vorhanden sind, werden drei Versuche durchgeführt. Deren Ziel ist es, anhand des Materials ABS-M30 Zusammenhänge zwischen den Druckparametern und Bauteileigenschaften zu erheben. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird die Fertigungseinheit wie folgt einheitlich eingestellt:

- Füllstil: Voll
- Erste Schicht: Supportmaterial
- Minimale Körperdicke: Geringster Wert
- Einfüllwinkel: 45°
- Bauteilanordnung: Automatisch
- Sonstige Parameter: Standardeinstellungen

Alle Messdaten zu den in diesem Kapitel vorgestellten Versuchsergebnissen sind im Anhang (siehe Abschnitt 8.2) vollständig dokumentiert.

### 6.3.1 Versuch 1: Ermittlung der Aufbaurate und des Materialbedarfs mittels Menger-Schwämmen

Lachmayer und Lippert (vgl. 2017, S. 63–67) weisen in ihrem Sammelwerk nach, dass über die Ähnlichkeitskennzahl von Menger-Schwämmen (siehe Abschnitt 2.3.4) der Materialverbrauch und die Fertigungszeit von Bauteilen, mit einer Genauigkeit von zwei bis zehn Prozent Abweichung, vorhergesagt werden können. Bei der Durchführung des ersten Versuches werden aus diesem Grund Menger-Schwämme mit einer Seitenlänge von 100 Millimetern (bis  $n = 4$ ) herangezogen. Diese werden in verschiedenen Schichthöhen additiv gefertigt und die Messergebnisse aufgezeichnet.

Bei der Analyse des ersten Versuchs lässt sich feststellen, dass mit wachsender Ähnlichkeitskennzahl  $K$  die Aufbaurate  $\vartheta$  in allen betrachteten Schichthöhen  $h$  abnimmt (siehe Abbildung 33). Weiters ist ersichtlich, dass sich mit zunehmenden  $K$  die Sprunghöhen von  $\vartheta$  zwischen den Messpunkten reduzieren. Die Steigung flacht ab. Die Kurve konvergiert möglicherweise gegen die Druckgeschwindigkeit des Supportmaterials. Dies ist auf den immer größer werdenden relativen Anteil des Supportmaterials zurückzuführen (siehe dazu Abbildung 34), da für die verwendeten Materialien unterschiedliche Druckgeschwindigkeiten (bzw. Aushärtezeiten) erreicht werden.

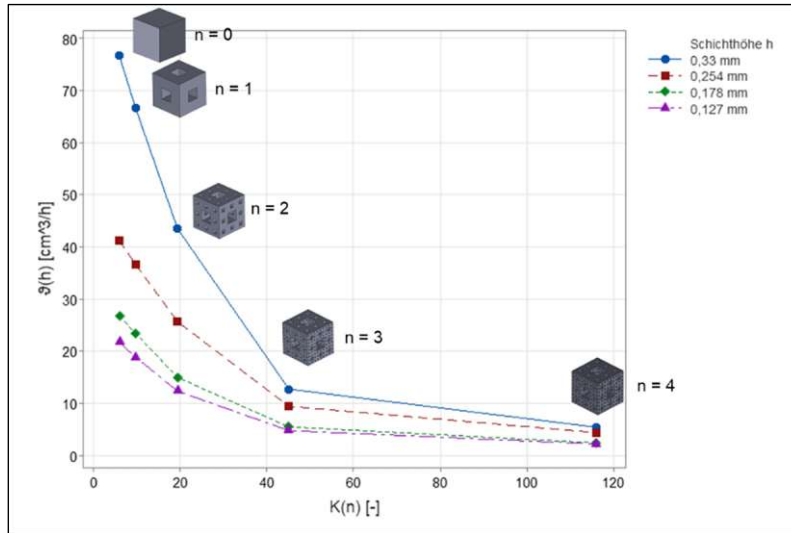


Abbildung 33: Empirische Ergebnisse Versuch 1;  $\vartheta$  über  $K(n)$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

In Abbildung 34 sind die empirischen Werte des relativen Supportmaterialanteils  $S$  über  $K$  dargestellt. Mit zunehmendem  $K$  steigt  $S$  annähernd linear. Auffällig ist, dass bei einem Menger-Schwamm mit Iterationsstufe vier die ca. 2,6-fache Masse an Stützmaterial im Verhältnis zum Ausgangsmaterial für das Bauteil benötigt wird. Dieser Umstand ist möglicherweise auf die proportional steigende Anzahl überhängender Kanten zurückzuführen.

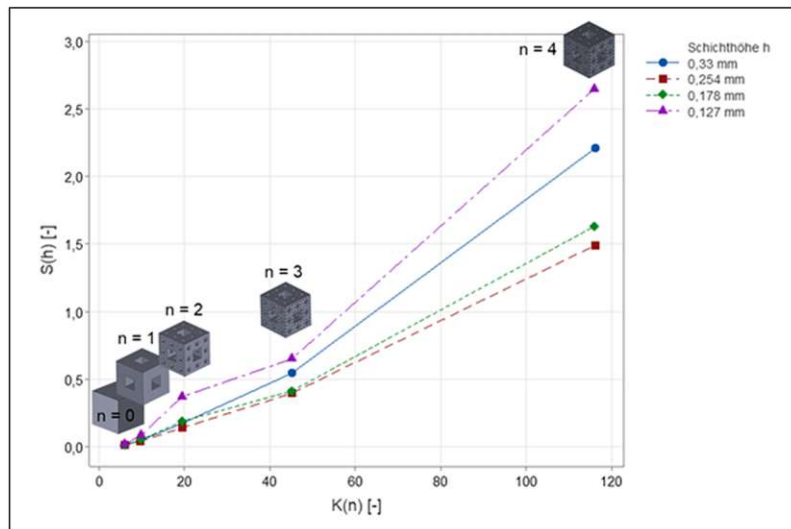


Abbildung 34: Empirische Ergebnisse Versuch 1;  $S$  über  $K(n)$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

### 6.3.2 Versuch 2: Ermittlung der Aufbaurrate und des Materialverbrauchs anhand ausgewählter Ersatzteile

Die Versuchsdurchführung in Abschnitt 6.3.1 baut auf den Erkenntnissen von Lachmayer und Lippert (vgl. 2017, S. 63–67) auf. Da die Autoren eine kleine Stichprobe und ein anderes AM-Verfahren zur Belegung ihrer These verwenden, wird im Zuge der vorliegenden Arbeit überprüft, ob von den Verläufen  $\vartheta$  und  $S$  über  $K$  der Menger-Schwämme tatsächlich auf die Druckparameter von ET geschlossen werden kann. Folglich werden in diesem Versuch zehn zufällig ausgewählte ET des Anwendungsunternehmens herangezogen und der erste Versuch mit diesen wiederholt.

Tabelle 15 liefert eine Übersicht der betrachteten Teile. Neben der Volumenkomplexität  $C_V$ <sup>19</sup> und der Oberflächenkomplexität  $C_O$ <sup>20</sup> ist die Ähnlichkeitskennzahl  $K$  der Teile dargestellt (siehe Abschnitt 2.3.4). Da die betrachteten Teile als 2D-Ableitungen vorliegen, werden sie mit einem CAD-Programm vor dem Druck nachkonstruiert. Dieser Zeitaufwand ist in der zweiten Spalte festgehalten. Die geometrische Form der Ersatzteile kann dem Anhang (siehe Kapitel 8.2) entnommen werden.

Teil	Nachkonstruktionszeit [min]	Bauteilvolumen [mm <sup>3</sup> ]	Oberfläche [mm <sup>2</sup> ]	$C_V$ [-]	$C_O$ [-]	$K$ [-]
1	17	10 014,89	6 173,03	0,89	2,75	13,29
2	20	123 411,22	44 926,91	0,26	3,75	18,12
3	32	47 491,65	17 562,07	0,17	2,77	13,39
4	81	497 653,56	125 972,49	0,48	4,15	20,06
5	90	451,34	1 931,01	0,05	6,79	32,82
6	65	313 152,87	51 840,51	0,19	2,32	11,24
7	46	44 497,73	34 809,13	0,17	5,73	27,72
8	77	100 540,42	20 750,61	0,17	1,98	9,60
9	62	42 970,83	17 579,23	0,14	2,96	14,33
10	42	700 591,73	87 213,85	0,43	2,29	11,06

Tabelle 15: Versuch 2; verwendete Ersatzteile (eigene Darstellung)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse des zweiten Versuchs. Es stellt sich heraus, dass in der Praxis sehr niedrige  $K$ -Werte ( $K < 35$ ) vorkommen. Verglichen mit Abbildung 33 kommt es bei Abbildung 35 zu stärkeren Schwankungen von  $\vartheta$ . Weiters lässt sich ähnlich wie bei den Menger-Schwämmen eine Abnahme von  $\vartheta$  bei steigendem  $K$  feststellen. Dies ist möglicherweise auf den hohen Einfluss der Bauteiloberfläche auf  $K$  (siehe dazu Tabelle 15) und in weiterer Folge auf einen steigenden Stützmaterialbedarf (siehe Abbildung 37) zurückzuführen.

<sup>19</sup>  $C_V = \frac{\text{Volumen Bauteil}}{\text{Volumen Boundingbox}}$   
<sup>20</sup>  $C_O = \frac{\text{Oberfläche Bauteil}}{\text{Oberfläche Kugel}}$



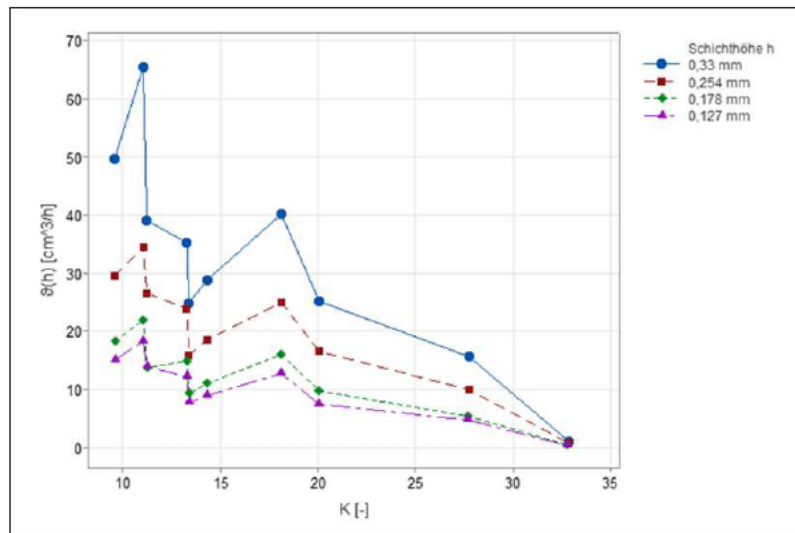


Abbildung 35: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $\vartheta$  über  $K(n)$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

Zur besseren Übersicht werden für eine Schichthöhe von 0,33 Millimetern die Verläufe von  $\vartheta$  über  $K$  der ersten beiden Versuche in Abbildung 36 dargestellt. Die blaue Linie im Diagramm verbindet die Messergebnisse der Menger-Schwämme. Der rote Linienzug steht für die Messergebnisse der ET aus Tabelle 15.

Die Druckgeschwindigkeit der ET liegt deutlich unter jener der Menger-Schwämme. Bis auf die in Abbildung 36 markierten Datenpunkte unterschieden sich die Messverläufe beider Gruppen bei gleichem  $K$ .

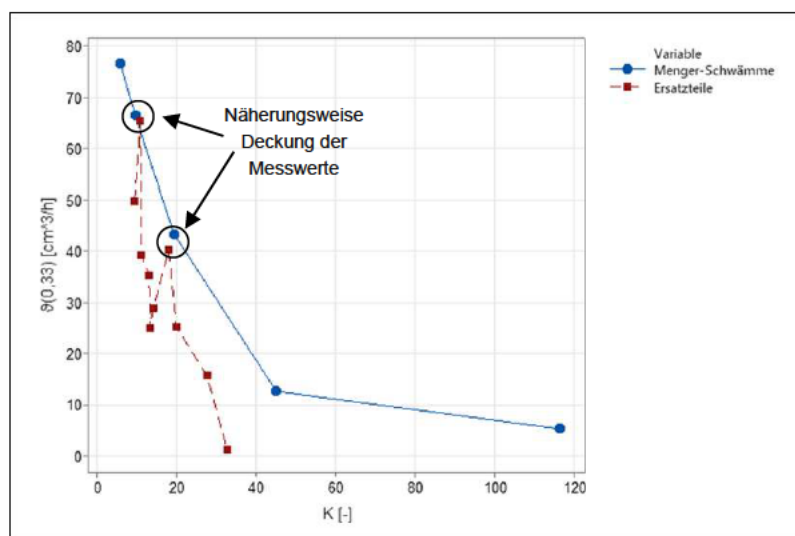


Abbildung 36: Vergleich Versuch 1 und 2;  $\vartheta(0,33)$  über  $K(n)$  (eigene Darstellung)

In Abbildung 37 wird  $S$  über  $K$  visualisiert. Auffällig ist, dass  $S$  mit zunehmenden  $K$  ansteigt. Der in Abbildung 34 dargestellte, annähernd linear steigende Zusammenhang von  $S$  und  $K$  kann bei diesem Versuch nicht nachgewiesen werden. Es kommt zu einer stärkeren Streuung der Messwerte. Dies ist möglicherweise auf den größeren Umfang an Messpunkten zurückzuführen.



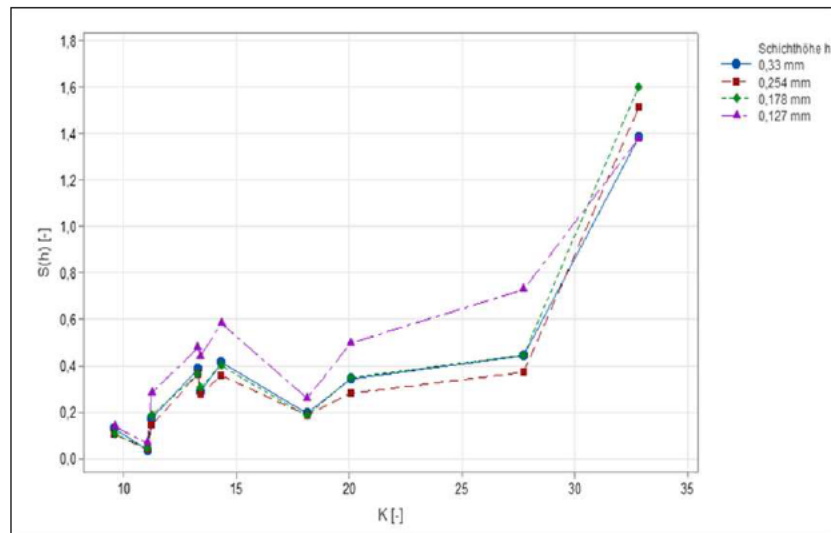


Abbildung 37: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $S$  über  $K(n)$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

Um Abbildung 34 und Abbildung 37 besser vergleichen zu können, werden für eine Schichthöhe von 0,33 Millimeter die Verläufe von  $S$  über  $K$  in Abbildung 38 zusammengefasst. Lediglich bei drei Messpunkten deckt sich die Verbindungslinie der ET-Gruppe annähernd mit der von den Menger-Schwamm-Messwerten aufgespannten Kurve. Auffallend ist der Ausreißer des Messergebnisses von Teil 5. Dieser ist vermutlich auf die im Vergleich zu den anderen Teilen signifikant höhere Komplexität des Bauteils zurückzuführen (siehe dazu Tabelle 15).

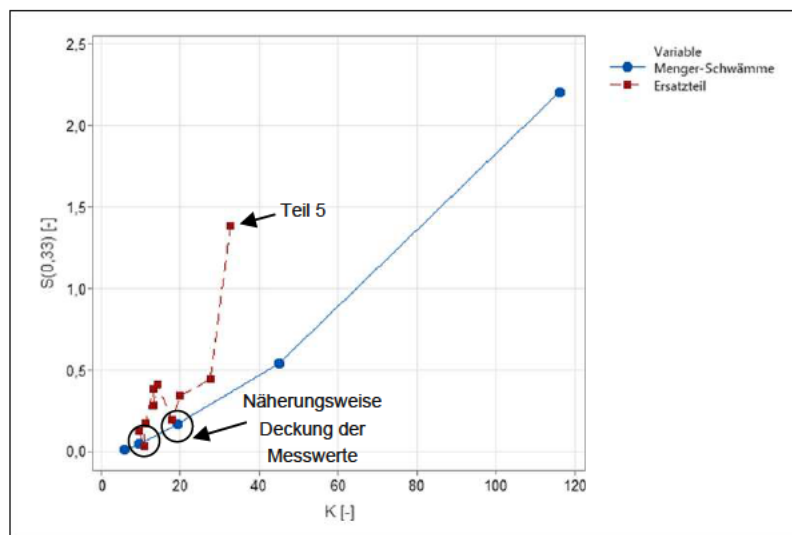


Abbildung 38: Vergleich Versuch 1 und 2;  $S(0,33)$  über  $K(n)$  (eigene Darstellung)

Aufgrund der Diskrepanz der Versuche kann gefolgert werden, dass in diesem Fallbeispiel die Erkenntnisse von Lachmayer und Lippert (vgl. 2017, S. 63–67) nicht herangezogen werden können. Folglich wird im weiteren Verlauf des Fallbeispiels nicht von Menger-Schwämmen, sondern ausgehend von den Teilen aus Tabelle 15 auf die Druckparameter von anderen ET geschlossen.

Der Zusammenhang von  $\vartheta$  und  $S$  wird ergänzend zur Kontrollvariable  $K$  mit den in Abschnitt 2.3.4 angeführten Ansätzen der Bauteilkomplexität weiter untersucht.

Die Entwicklung von  $\vartheta$  über  $C_O$  ist in Abbildung 39 dargestellt. Mit zunehmender Oberflächenkomplexität sinkt bei den betrachteten Schichthöhen die Aufbaurrate. Der Verlauf von  $\vartheta$  ähnelt sehr stark der Verbindungslinie der Messpunkte in Abbildung 35. Dies ist möglicherweise auf den Einfluss der Bauteiloberfläche zurückzuführen, da sowohl  $C_O$  als auch  $K$  von der Oberfläche abhängen. Auffallend ist, dass scheinbar die Verläufe von  $\vartheta$  in allen Schichthöhen beim letzten Messpunkt in Abbildung 39 knapp über null zusammenlaufen. Beim Prüfen der Fertigungszeit (siehe dazu Abschnitt 8.2) des betroffenen *Teil 5* wird deutlich, dass lediglich die Skalierung der Ordinate in Kombination mit den kleinen Aufbauraten zu dieser Verzerrung führt. Die Unterschiede des Teils von  $\vartheta$  in Abhängigkeit von  $h$  zeigt keine Auffälligkeit gegenüber den anderen ET aus Tabelle 15.

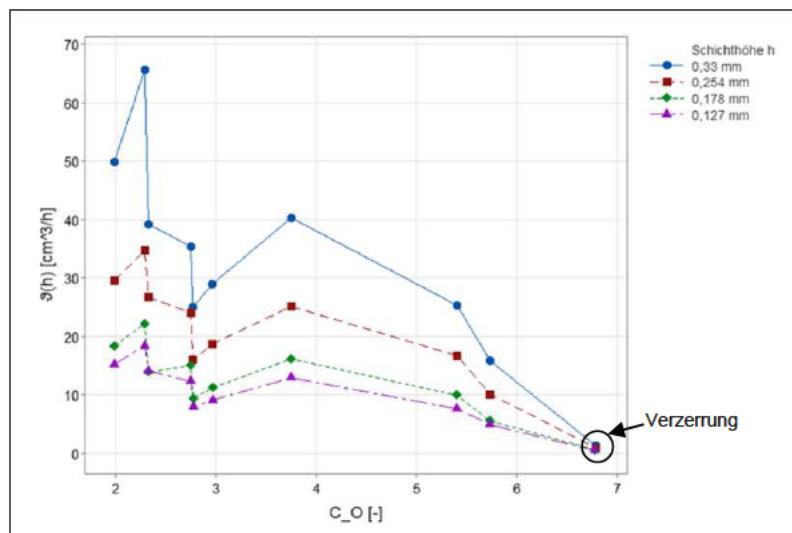


Abbildung 39: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $\vartheta$  über  $C_O$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

In der Abbildung 40 wird gezeigt, wie mit steigender Oberflächenkomplexität der relative Anteil an Supportmaterial zunimmt. Auch in diesem Fall ähneln sich die Kurven der Kovariablen  $C_O$  und  $K$  (siehe Abbildung 37).

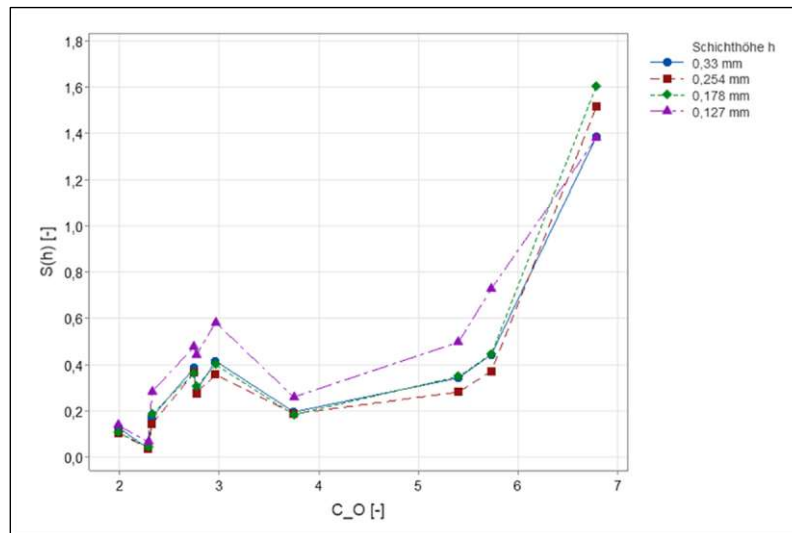


Abbildung 40: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $S$  über  $C_O$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

Weiters wird  $\vartheta$  und  $S$  in Abhängigkeit der Kontrollvariable  $C_V$  untersucht. Die Messwerte (siehe Kapitel 8.2) weisen eine hohe Varianz auf und liefern keine empirische Aussagekraft.

### 6.3.3 Versuch 3: Ermittlung der Auswirkung von Mehrfachanordnungen im Bauraum

In der dritten Versuchsdurchführung wird die Auswirkung von Mehrfachanordnungen im Bauraum auf die Druckzeit analysiert. Anzumerken ist, dass beim FDM-Verfahren lediglich die Fläche der Druckunterlage ausgenutzt werden kann. Bei anderen AM-Verfahren können Teile übereinander im Bauraum angeordnet werden. Für die Versuchsdurchführung wird ein Würfel verwendet und die Druckfläche maximal ausgenutzt (siehe Abbildung 41).

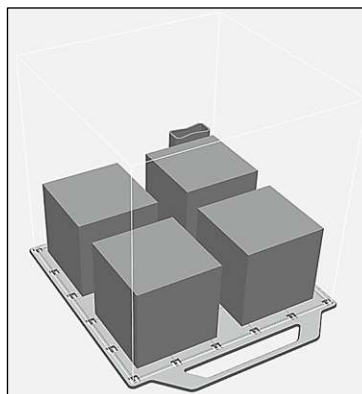


Abbildung 41: Aufbau Versuchsreihe 3; Mehrfachanordnung im Bauraum (eigene Darstellung)

In der Abbildung 42 ist der relative Abfall der Aufbaurrate  $diff_{\vartheta}$  für die vier Schichthöhen  $h$  des Druckers dargestellt. Im Durchschnitt kann durch maximale Besetzung des Bauraums ca. 2,6 Prozent der Fertigungszeit eingespart werden.

Anzumerken ist, dass die Zeitersparnis hauptsächlich auf die Reduzierung der vom Druckkopf gefahrenen Höhenkoordinate zurückzuführen ist und nicht auf die Anzahl der angeordneten Bauteile.

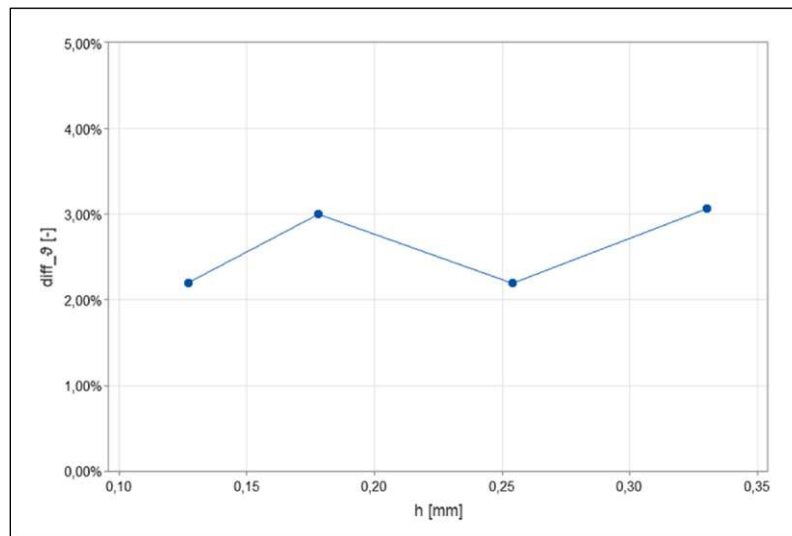


Abbildung 42: Empirische Ergebnisse Versuch 3; Zeitgewinn durch maximale Bauraumanordnung (eigene Darstellung)

## 6.4 Modellparameter für das Fallbeispiel

Um das Bewertungsmodell beim Anwendungsunternehmen anwenden zu können, müssen eine Reihe von Variablen definiert werden. Die Rangfolgenbildung der *Automatisierten Bewertung* benötigt keine unternehmensspezifischen Anpassungen, da das Ranking durch den Nutzer über Grenzwerte gesteuert werden kann (siehe Abschnitt 5.4.1.2). Für die *Manuelle Bewertung* werden nach Rücksprache mit dem Unternehmen die in Tabelle 13 definierten Punktwerte für die möglichen Merkmalsausprägungen übernommen. Lediglich für den Algorithmus zur Ermittlung der AM-Kosten müssen eine Reihe an Variablen definiert werden (siehe Abschnitt 5.4.2). Diese hängen maßgeblich von der Fertigungseinheit ab. Für die Durchführung des Fallbeispiels wird der in Kapitel 6.3 vorgestellte Drucker *Stratasys F170* herangezogen.

Über den marktüblichen Kaufpreis lassen sich die Anschaffungskosten  $K_{AN}$  des Druckers bestimmen. Die Abschreibungsdauer des Druckers  $T_{AFA}$  beträgt bezugnehmend auf das *Bundesministerium für Finanzen* (kurz BMF) zehn Jahre (vgl. BMF 2022). Die jährliche Nutzungsdauer der Anlage wird mit  $T = 365 d$ ,  $WT = 104 d$ ,  $FT = 10 d$  und  $BS = 12 h$  berechnet (siehe Formel 19).

$$T_n = (T - WT - FT) \times BS$$

mit

$T$ ... Tage im Jahr [d/a]

$FT$ ... Feiertage [d/a]

$WT$ ... Tage am Wochenende [d/a]

$BS$ ... Betriebsstunden [h/d]

**Formel 19: Berechnung der jährlichen Anlagennutzungsdauer (eigene Darstellung)**

Zur Ermittlung der Abschreibung für Anlagen (AFA) aus Tabelle 20 wird die nachfolgende Formel herangezogen (siehe Formel 20).

$$K_{AFA} = \frac{K_{AN}}{T_n}$$

mit

$K_{AN}$  ..... Anschaffungskosten Drucker [€]

**Formel 20: Berechnung der jährlichen AFA (eigene Darstellung)**

Mithilfe des durchschnittlich gebundenen Kapitals können die Kosten der kalkulatorischen Zinsen ermittelt werden. Die Berechnung von  $K_z$  erfolgt nach der Formel 21.

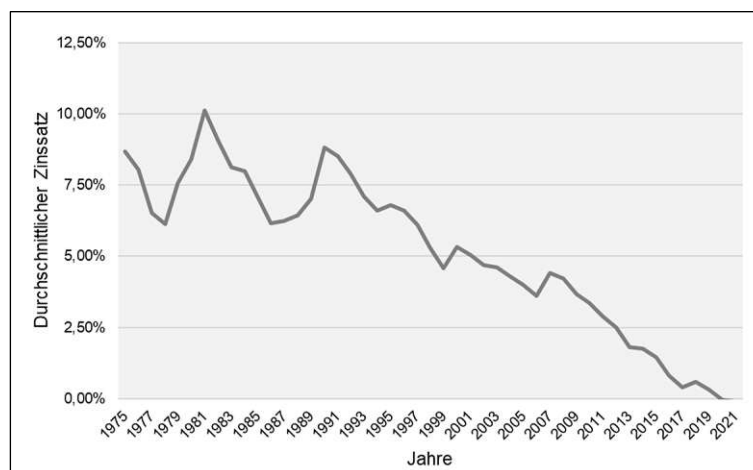
$$K_z = \frac{K_{AN}}{2} \times z$$

mit

$z$  ... Kapitalmarktzins [-]

**Formel 21: Berechnung der kalkulatorischen Zinsen (eigene Darstellung)**

Für  $z$  ergeben sich für den Zeitraum von 1975 bis 2021 (siehe Abbildung 43) die in diesem Fallbeispiel verwendeten durchschnittlichen 5,47 Prozent.



**Abbildung 43: Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland (vgl. Statista Zinsentwicklung 2022)**

Die Kosten der Instandhaltung ( $K_I$ ) setzen sich aus jährlichen Wartungsaufwendungen (zwei Prozent des Anschaffungswerts der Maschine) sowie dem jährlichen Austausch des Druckkopfes (1.069 Euro) zusammen. Für  $K_B$  fallen etwa 50 Euro pro Jahr an, da

beim FDM-Druck wenige Betriebsmittel im Einsatz sind. Der tägliche Austausch der Druckplattform (10 Euro) bei intensiver Nutzung schlägt sich mit 2.510 Euro jährlich zu Buche ( $K_W$ ). In der Kostenberechnung werden neben dem Platzbedarf der Fertigungseinheit Pufferflächen für additiv gefertigte Teile berücksichtigt. Für diese wird beim Anwendungsunternehmen eine Fläche von 20 Quadratmeter zur Verfügung gestellt. Die Berechnung von  $K_R$  erfolgt durch den vom Anwendungsunternehmen bereitgestellten Kostensatz  $k_{Raum}$  mit 0,85 €/m<sup>2</sup>/d. Zur Ermittlung der Stromkosten pro Kilowattstunde wird die Abbildung 44 herangezogen. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang die aktuell hohe Volatilität am Energiemarkt. Diese wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

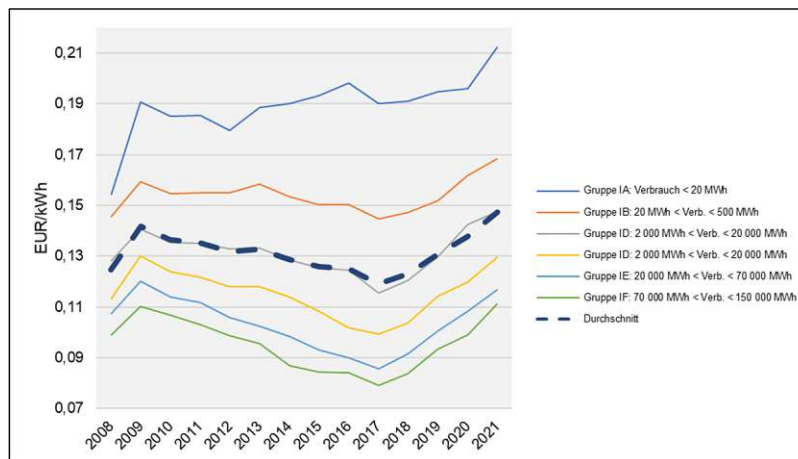


Abbildung 44: Strompreisentwicklung für die Industrie (Eigene Darstellung in Anlehnung an Eurostat 2022)

Für gängige Kunststoffe werden Filament-Preise zur Festlegung der möglichen Materialkosten erhoben. Es werden auch Polymere aufgegriffen, die nicht mit dem im Fallbeispiel genutzten Drucker gefertigt werden können, aber für den Schienenfahrzeugbereich wichtig sind.

Material	Preis [€/kg]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Durchschnittspreis [€/cm <sup>3</sup> ]
ABS	24 - 80	1,04	0,054
Nylon	38 - 140	1,14	0,101
ASA	36 - 45	1,07	0,043
Carbon (+PP/PA/ASA etc.)	61 - 199	1-1,24	0,146
Ultem	220 - 480	1,31	0,459
PLA	18 - 54	1,24	0,045
PVC	45 - 59	1,4	0,073
PVDF	200 - 300	1,78	0,445
TPU	40 - 200	1,22	0,146
ABS-M30	131 - 184	1,05	0,165
ABS-CF10	210 - 302	1,09	0,279
<b>Durchschnitt</b>			<b>0,178</b>

Tabelle 16: Filament-Preise gängiger Kunststoffe (Eigene Darstellung in Anlehnung an Filamentworld 2022)



Im Zuge der automatisierten Bewertung werden im Fallbeispiel durchschnittliche Materialkosten für Kunststoff herangezogen. Das Potenzial der additiven Fertigung wird erst bei konstruktiver Änderung und Materialsubstitution vollständig ausgeschöpft (Managing Director: AM-Dienstleister, persönliche Korrespondenz, Wien, 09.09.2021). Außerdem kann nicht jedes Ausgangsmaterial additiv gefertigt werden. Dieser Umstand wird erst bei der manuellen Bewertung mit den Kosten des Druckmaterials im *Szenario Editor* berücksichtigt.

Bezüglich der Personalkosten wird für  $KP_{Arbeiter}$  der durchschnittliche Stundensatz eines Produktionsmitarbeiters (vgl. Stepstone 2022a) und für  $KP_{Angestellter}$  der eines Konstrukteurs (vgl. Stepstone 2022b) herangezogen.

Abseits der Festlegung von Kostenparametern wird aus den Erkenntnissen aus Abschnitt 6.3 über Regressionsmodelle der Bedarf an Stützmaterial, abhängig von der Schichthöhe, als Funktion dargestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch, wie die Regressionsgleichungen (siehe Tabelle 17) zu interpretieren sind. Die Regressionsfunktionen werden nach dem höchsten Korrelationskoeffizienten festgelegt. Für die Gleichung von  $S$  wird eine polynomiale Regression durchgeführt.  $S$  wird, ausgehend von den empirischen Versuchen, bevorzugt mit  $C_O$  beschrieben. Anzumerken ist, dass die Gleichungen nur für das Material ABS-M30 gelten. Im Fallbeispiel wird angenommen, dass die Gleichungen näherungsweise für andere Kunststoffe herangezogen werden können.

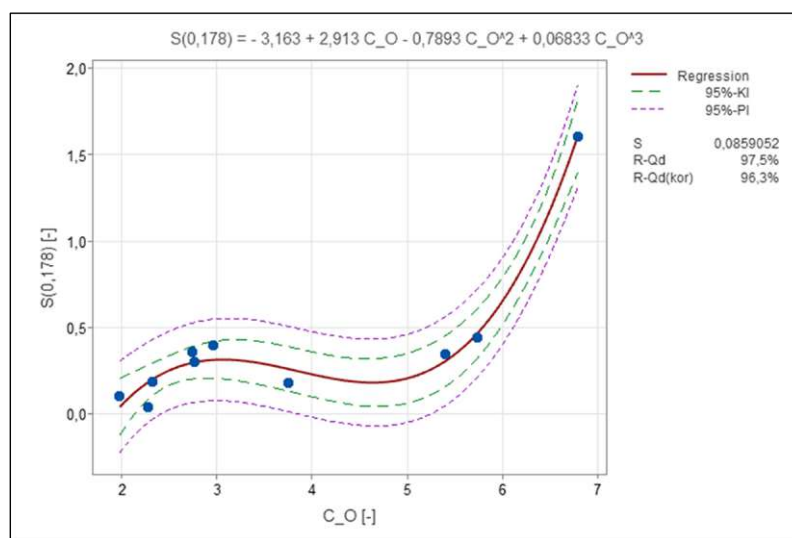


Abbildung 45: Polynomiale Regression von  $S$  über  $C_O$  für  $h = 0,178$  mm (eigene Darstellung)

Die Tabelle 17 liefert eine Übersicht der im Modell verwendeten Regressionsgleichungen.

Schichthöhe [mm]	Regressionsgleichung
0,330	$s = -2,769 + 2,542 \cdot C_{\text{O}} - 0,6789 \cdot C_{\text{O}}^2 + 0,05816 \cdot C_{\text{O}}^3$
0,254	$s = -3,230 + 2,958 \cdot C_{\text{O}} - 0,8011 \cdot C_{\text{O}}^2 + 0,06898 \cdot C_{\text{O}}^3$
0,178	$s = -3,163 + 2,913 \cdot C_{\text{O}} - 0,7893 \cdot C_{\text{O}}^2 + 0,06833 \cdot C_{\text{O}}^3$
0,127	$s = -2,615 + 2,364 \cdot C_{\text{O}} - 0,5995 \cdot C_{\text{O}}^2 + 0,04988 \cdot C_{\text{O}}^3$

Tabelle 17: Regressionsgleichungen zur Schätzung von  $s$  (eigene Darstellung)

Zur Ermittlung von  $\vartheta$  werden für die unterschiedlichen Schichthöhen des Druckers Durchschnittswerte gebildet, da alle für die empirisch erhobenen Werte getesteten Regressionsmodelle zu niedrige Korrelationskoeffizienten aufweisen. In Tabelle 18 sind die im Bewertungsmodell verwendeten Werte für  $\vartheta$  zusammengefasst.

Schichthöhe [mm]	$\vartheta$ Aufbaurrate [ $\text{cm}^3/\text{h}$ ]
0,330	32,65
0,254	20,23
0,178	12,19
0,127	10,26

Tabelle 18: Durchschnittliche Aufbaurrate  $\vartheta$  (eigene Darstellung)

Werden im *Szenario Editor* (siehe Abschnitt 5.4.1.5) Mehrfachanordnungen festgelegt, wird die durchschnittliche Aufbaurrate um 2,6 Prozent reduziert (siehe Abschnitt 6.3). Für die Designzeit ( $t_D$ ) lässt sich der Durchschnitt aus Tabelle 15 mit 53,2 Minuten heranziehen, falls die Notwendigkeit besteht ein Teil nachzuzeichnen. In diesem Kontext muss darauf hingewiesen werden, dass es bei sehr speziellen Bauteilen mit abweichender Komplexität zu potenziellen Abweichungen kommt. Diese können über das Modell nicht abgebildet werden. Die Vorbereitungszeit  $t_v$  für den Druck wird empirisch mit zehn Minuten erhoben. Aufheizzeiten werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass der Drucker voll ausgelastet ist. Zur Abschätzung der für den Druck benötigten Leistung wird auf Angaben des Druckerherstellers zurückgegriffen (siehe Tabelle 19).

Material	Leistungsverbrauch [W]		
	Bauvorgang	Leerlauf	Standby
ABS	650	510	10
PLA	150	10	
ASA	650	510	
TPU	650	510	
Durchschnitt	525	385	10

Tabelle 19: Leistungsverbräuche des F170-Druckers (vgl. Stratasys Printer Catalog 2022)

In der Tabelle 20 sind alle kalkulatorischen Werte zusammengefasst. Es wird zwischen Inputs und errechneten Werten unterschieden.

Kalkulatorische Werte							
Inputs			Errechnete Werte				
Parameter	Bezeichnung	Wert	Einheit	Parameter	Bezeichnung	Wert	Einheit
$K_{AN}$	Anschaffungskosten	15 000,00	€	$K_{AFA}$	Kosten der kalkulatorischen Abschreibung	1 500,00	€/a
$T_{AFA}$	Abschreibungsdauer	10,00	a	$K_Z$	Kosten der kalkulatorischen Zinsen	300,00	€/a
T	Tage im Jahr	365,00	d/a	$K_W$	Werkzeugkosten	2 510,00	€/a
WT	Tage am Wochenende	104,00	d/a	$K_R$	Raumkosten	6 205,00	€/a
FT	Feiertage	10,00	d/a	$K_I$	Instandhaltungskosten	1 369,00	€/a
BS	Betriebsstunden	12,00	h/d	$K_B$	Betriebsstoffkosten	50,00	€/a
$T_n$	Nutzungsdauer	3 012,00	h/a	S(h)	relativer Supportmaterialanteil	siehe Tabelle 17	-
Z	Kapitalmarktzins	5,47	%	$\vartheta(h)$	Aufbaurate	siehe Tabelle 18	cm <sup>3</sup> /h
$K_{Raum}$	Raumkostensatz	0,85	€/m <sup>2</sup> /d				
$P_E$	Strompreis	0,14	€/kWh				
$E_{V\_Avg}$	Ø Energieverbrauch	0,53	kW				
$P_{M\_Avg}$	Ø Preis Rohmaterial	0,18	€/cm <sup>3</sup>				
$P_S$	Preis Supportmaterial	0,18	€/cm <sup>3</sup>				
$KP_{Arbeiter}$	Personalkosten Arbeiter	19,72	€/h				
$KP_{Angestellter}$	Personalkosten Angestellter	28,45	€/h				
$t_D$	Designzeit	53,20	min				
$t_V$	Vorbereitungszeit	10,00	min				
$t_N$	Nachbereitungszeit	10,00	min				
LKS	Lagerkostensatz	17,00	%				

Tabelle 20: Modellparameter des Fallbeispiels (eigene Darstellung)

Anzumerken ist, dass die Aussagekraft der in Abschnitt 6.3 durchgeführten Versuche aufgrund des Stichprobenumfangs begrenzt ist. In der Fallstudie wird dennoch darauf zurückgegriffen, da gezeigt werden soll, wie das Modell in der Praxis eingesetzt werden kann. Wird das Modell in den Betrieb von SFB implementiert, müssen umfangreichere Parameterstudien durchgeführt werden. Neben unterschiedlichen Druckern bedarf es der Analyse unterschiedlicher Materialien für das Bewertungsmodell. Außerdem ist es vor der Einführung in Unternehmen wesentlich, die in diesem Kapitel getätigten Annahmen weiter zu präzisieren.

## 6.5 Erstellung einer Ersatzteildatenbank

Über das in Abschnitt 5.4.1.1 vorgestellte Datenmodell können die standardisierten SAP-Berichte des Ersatzteilspektrums zusammengefügt werden. Lediglich die Materialnummer muss über eine Funktion (siehe Abbildung 46, grünes Sechseck) angepasst werden, da die Ersatzteilnummer in der Tabelle „Marc“ aus dem System des Anwendungsunternehmens mit führenden Nullen ausgegeben wird.

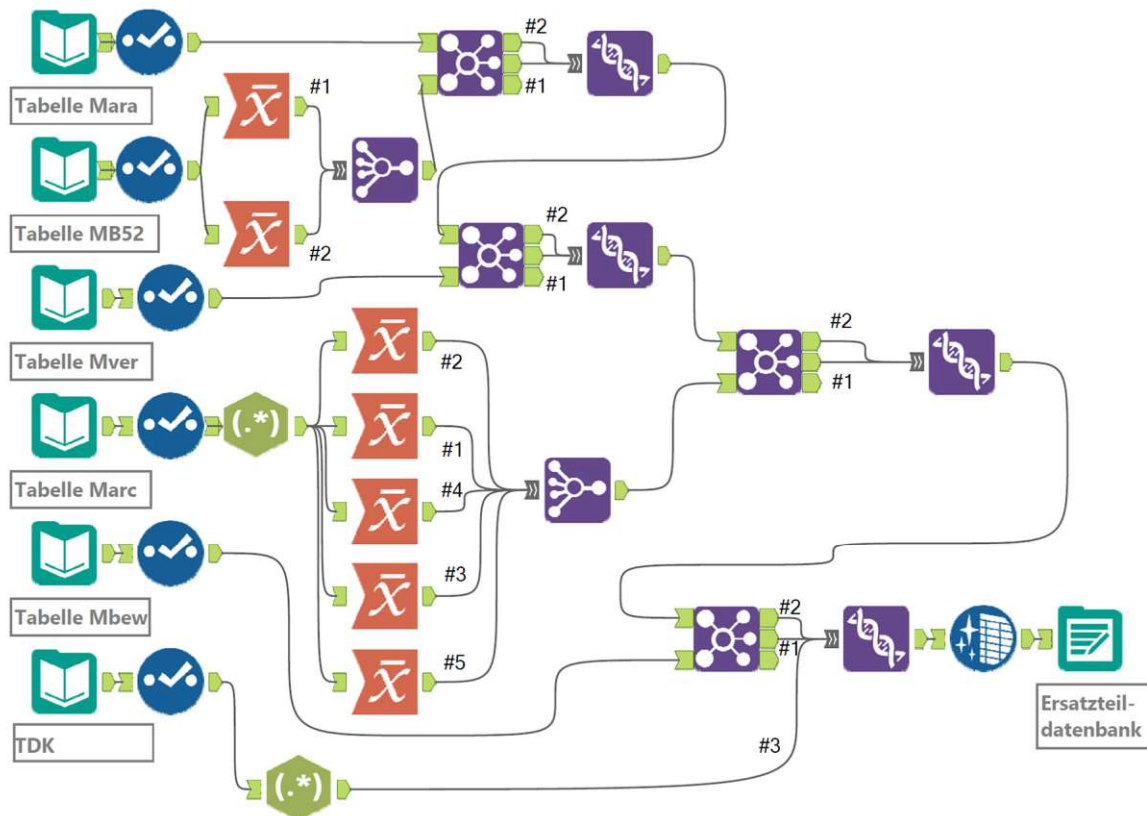


Abbildung 46: Datenverknüpfung mit realen Daten für den Use Case (eigene Darstellung)

Die Datenstruktur der *Technischen Dokumentation* wird für das Fallbeispiel in Anlehnung an die Erläuterungen aus Kapitel 5.1 mithilfe von technischen Zeichnungen und 3D-Modellen manuell aufgebaut.

## 6.6 Erstellung einer Applikation

In diesem Abschnitt wird die Realisierung des in Kapitel 5.4 entwickelten Bewertungsmodells vorgestellt.

Um die Applikation benutzerfreundlich zu gestalten, wird zur Erstellung der Ein- und Ausgabemasken die DIN EN ISO 9241-12 (vgl. DIN EN ISO 9241-12:2000-8 2000, S. 7-20) herangezogen. Zur Informationsdarstellung orientiert sich die Applikation an der DIN EN ISO 9241-14 (vgl. DIN EN ISO 9241-14:2000-12 2000, S. 7-15) zur Gestaltung von Menüs für den Mensch-Rechner-Dialog.

Die technische Umsetzung basiert auf der Programmiersprache R sowie der Erweiterung Shiny und erfolgt in der Open Source Software *RStudio*<sup>21</sup>. Außerdem wird auf nachfolgende R-Packages zurückgegriffen:

- |              |             |               |
|--------------|-------------|---------------|
| ▪ data.table | ▪ dygraphs  | ▪ lattice     |
| ▪ tidyverse  | ▪ plotly    | ▪ rgl         |
| ▪ dplyr      | ▪ rbokeh    | ▪ magick      |
| ▪ lubridate  | ▪ scales    | ▪ fontawesome |
| ▪ fmsb       | ▪ gridExtra | ▪ DT          |
| ▪ shinyBS    | ▪ ggplot2   | ▪ readxl      |

Bei der R-Programmierung mittels Shiny wird, um die Applikation echtzeitfähig zu gestalten, zwischen Benutzeroberfläche (englisches Pendant: User Interface – UI) und Server unterschieden (siehe Abbildung 47). Über das UI wird die grafische Oberfläche inklusive der Eingabemaske aufgebaut. Der R-Server<sup>22</sup> übernimmt alle Berechnungen im Hintergrund. Er erhält vom UI Eingaben des Benutzers (inputs) und gibt Berechnungsergebnisse (outputs) zurück.

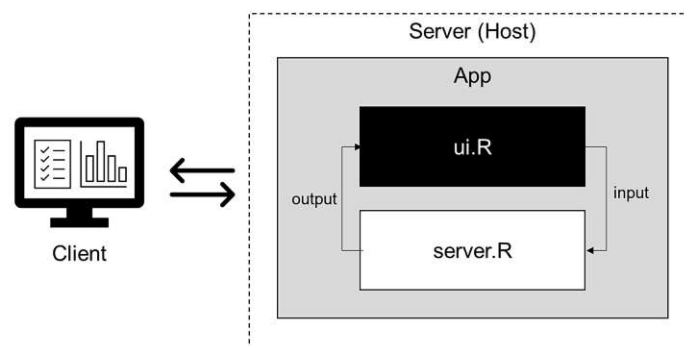


Abbildung 47: Aufbau der R-Shiny-Applikation (eigene Darstellung)

Zur grafischen Aufbereitung des UI wird ergänzend auf die Webdesignsprachen *HyperText Markup Language*<sup>23</sup> (HTML) und *Cascading Style Sheets*<sup>24</sup> (CSS) zurückgegriffen. Die Applikation und die in Abschnitt 6.5 aufgebaute Ersatzteildatenbank läuft für das Fallbeispiel auf einem lokalen Server (Host). Sie kann auch ohne Einschränkungen über einen Webserver betrieben werden.

Die Umsetzung des Bewertungsmodells erfolgt nach den vorgestellten Diagrammablaufplänen und beinhaltet die erörterten Algorithmen (siehe Abschnitt 5.4.1). Für die *Automatisierte Bewertung* (Abschnitt 5.4.1.2), die *Manuelle Bewertung* (Abschnitt 5.4.1.3) und die *Gesamtbewertung* (Abschnitt 5.4.1.4) werden eigene Registerkarten (1) in der Applikation angelegt (Abbildung 48).

<sup>21</sup> <https://www.rstudio.com/>

<sup>22</sup> Nicht zu verwechseln mit dem Server in einem Netzwerk.

<sup>23</sup> Programmiersprache zur Strukturierung von Websites.

<sup>24</sup> Gestaltungs- und Formatierungssprache zur Verbesserung des Designs von HTML-Dokumenten.



In der Abbildung 48 ist die Benutzeroberfläche der *Automatisierten Bewertung* dargestellt. Auf der linken Seite (2) kann der Anwender den Drucker für die Analyse und Vorselektionen des Ersatzteilspektrums auswählen. Darunter (3) lassen sich vom Nutzer die Gewichtungen der in Kapitel 5.3 definierten Bewertungsbereiche festlegen. Außerdem können Grenzwerte zur Bewertung entsprechend den Erläuterungen aus Kapitel 5.4.1.2 gesetzt werden. Auf der rechten Seite der Registerkarte (4) sind die Ergebnisse der Bewertung tabellarisch dargestellt. Die Teile werden, basierend auf ihrer AM-Eignung, absteigend gereiht. Außerdem wird für jedes analysierte Teil der numerische Wert von  $S_{A_x}$  sowie alle dazugehörigen  $SB_{A_{xj}}$  angezeigt. Auf der rechten Seite der Tabelle ist eine erste Abschätzung des Einsparungspotenzials ersichtlich.

Die Abbildung 49 zeigt die Umsetzung der *Manuellen Bewertung*. Auf der linken Seite (5) des Menüs lässt sich das in (4) ausgewählte Ersatzteil durch einen Experten bewerten. Entsprechend der Tabelle 13 können die Merkmalsausprägung des Teils festgelegt und Kostenabschätzungen getroffen werden. Rechts neben der Eingabemaske (6) wird außerdem – als Hilfestellung zur Bewertung – die Zeichnung eingeblendet.

Die Registerkarte *Gesamtbewertung und Kostenanalyse* ist in Abbildung 50 abgebildet. Neben einer Übersicht der Stück- und Gesamtkostenebene findet sich der *Szenario Editor* aus Abschnitt 5.4.1.5 wieder (7). Auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche (8) wird die Gesamtbewertung in Form der Bewertungsbereichen visualisiert. Außerdem können über „Übersicht der Bereichscores“ alle  $SB_{A_{xj}}$  sowie  $SB_{M_{xj}}$  näher betrachtet und verglichen werden.



Potenzialbewertung AM Ersatzteile
Automatisierte Teilbewertung
Manuelle Teilbewertung
Gesamtbewertung und Kostenanalyse

#### Additive Fertigungseinheit auswählen

Stratasys F170

---

#### Vorselektion einstellen

Material: Kunststoff

Sicherheitskritische Materialien: berücksichtigen

### Rangfolge nach Potenzial

Copy CSV Excel

Search:

Nummer	Bewertung	Fertigungscharakteristik	Beschaffungscharakteristik	Lagerhaltungscharakteristik	Kostencharakteristik	Kritikalitätscharakteristik	Optimierungscharakteristik	Einsparungspotenzial [€/5€]	
1	12123XXXX	0	0,67	1	0,75	1	1	0	6254,69
2	12587XXXX	0	0,67	1	0,75	1	1	0	11456,85
3	46552XXXX	0	0,56	1	0,75	1	1	0	6093,19
4	83916XXXX	0	0,56	1	0,75	1	1	0	4570,41
5	46116XXXX	0	0,56	1	0,75	1	1	0	37537,8

#### Gewichtung der Bewertungsbereiche festlegen

Fertigungscharakteristik: 0-100

Beschaffungscharakteristik: 0-100

Lagerhaltungscharakteristik: 0-100

Kostencharakteristik: 0-100

Kritikalitätscharakteristik: 0-100

Optimierungscharakteristik: 0-100

#### Grenzwerte für die Bewertung definieren

Bauteilkomplexität: 0-1

Anzahl Nachbearbeitungsschritte: 0-20

Fertigungskapazität: 0-251.89h

Beschaffungszeit: 0-120 d

Teilewert: 0-600 €

Verbrauch: 0-180 kg/a

Lagerreichweite: 0-100 d

Variationskoeffizient: 0-1

Abbildung 48: Benutzeroberfläche der *Automatisierten Bewertung* (eigene Darstellung)



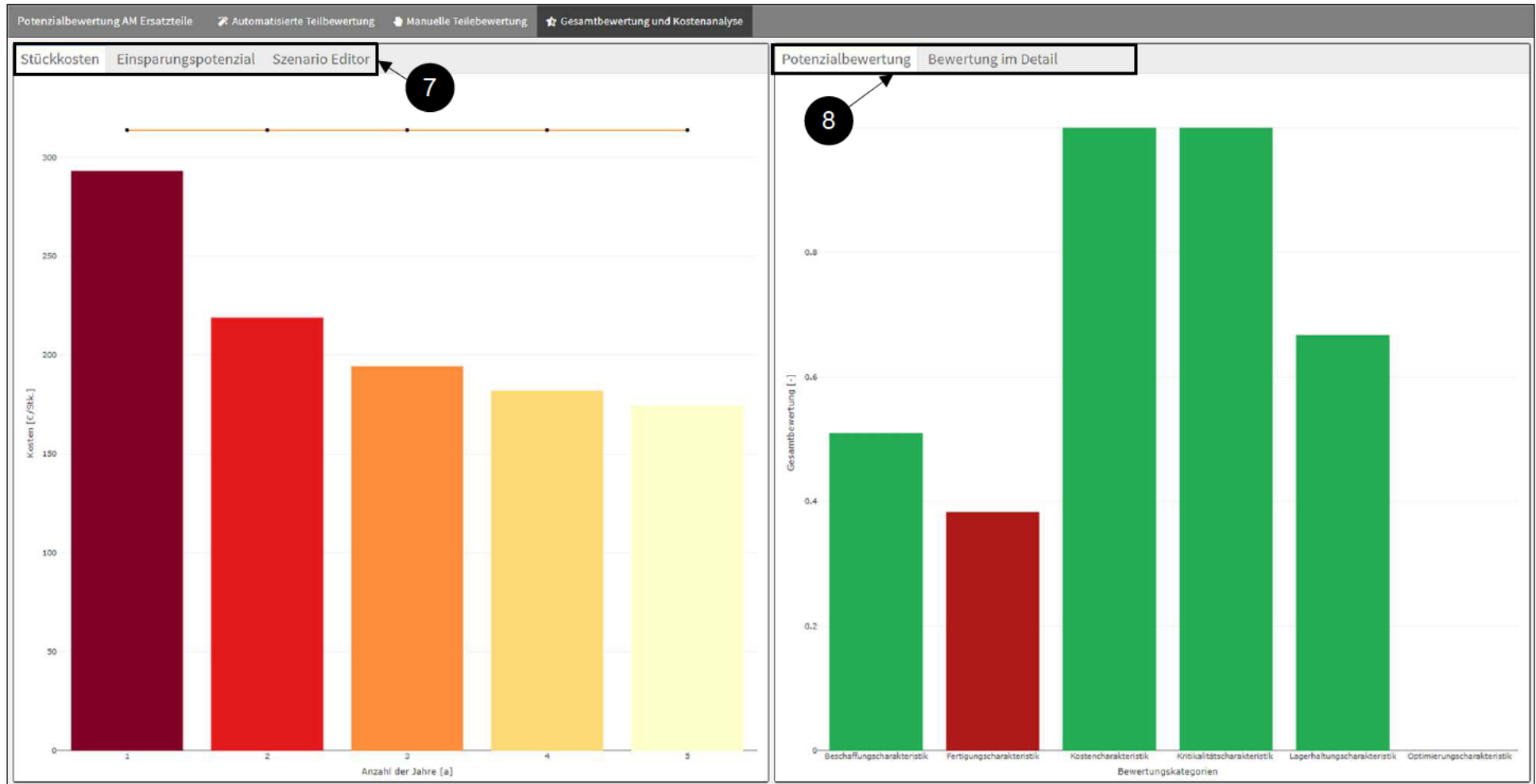


Abbildung 50: Benutzeroberfläche Gesamtbewertung und Kostenanalyse (eigene Darstellung)

In Abbildung 51 ist die Benutzeroberfläche des in der *Gesamtbewertung und Kostenanalyse (7)* implementierten *Szenario Editor* ersichtlich.

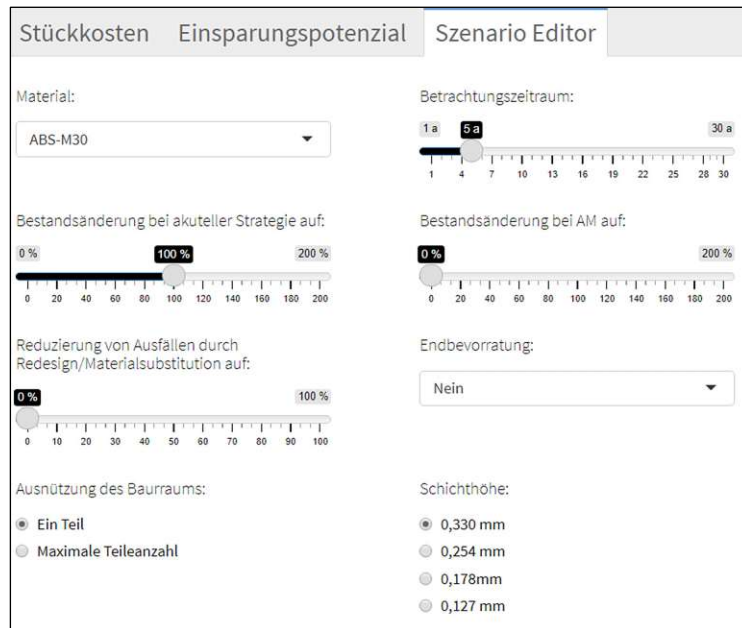


Abbildung 51: Benutzeroberfläche *Szenario Editor* (eigene Darstellung)

## 6.7 Ergebnisse des Fallbeispiels

### 6.7.1 Definition der Rahmenbedingungen und automatisierte Bewertung

Ausgehend von den definierten Modellparametern und der erstellten Datenbank wird das Ersatzteilspektrum in der Applikation im gegenständlichen Abschnitt bewertet.

Für die *Automatisierte Bewertung* werden gemeinsam mit dem AM-Experten des Anwendungsunternehmens nachfolgende Bereichsgewichtungen ( $g_j$ ) und Grenzwerte definiert (siehe Abbildung 52).

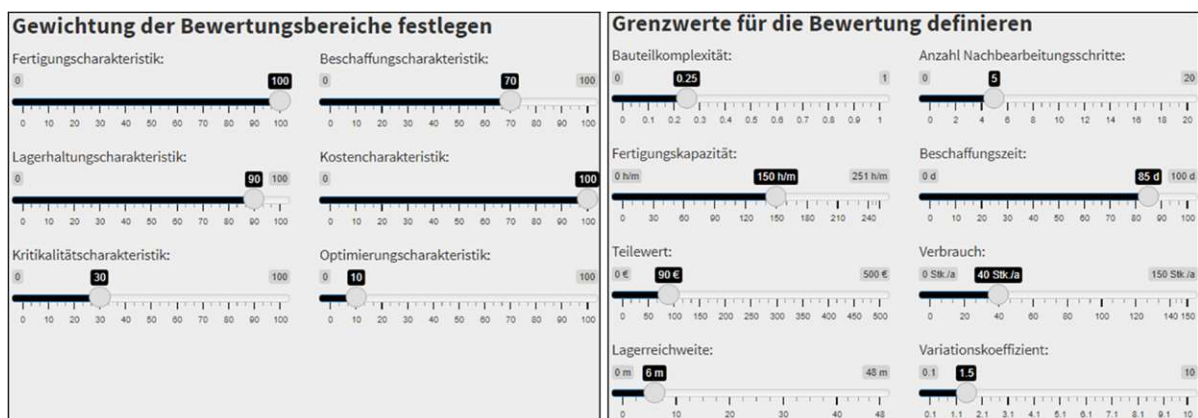


Abbildung 52: Auswahl der Bereichsgewichtungen und Festlegung von Grenzwerten im Fallbeispiel (eigene Darstellung)

Das bedeutsamste Entscheidungskriterium für den Umstieg der Ersatzteilversorgung auf eine AM-basierte Strategie ist für das Anwendungsunternehmen das Einsparungspotenzial gefolgt vom Fertigungsaufwand. Folglich ist für den Experten die *Fertigungs-* und die *Kostencharakteristik* von größter Bedeutung. Auch die *Lagerhaltungs-* und die *Beschaffungscharakteristik* werden als wichtig erachtet. Die *Kritikalitätscharakteristik* spielt für die automatisierte Auswertung eine untergeordnete Rolle. Da der Fokus primär auf der Ersatzteilbereitstellung liegt, wird die *Optimierungscharakteristik* durch den Experten als vernachlässigbar eingestuft.

Die Grenzwerte für die Bewertung werden ebenfalls vom Experten festgelegt. Im Fallbeispiel werden Teile mit hoher Komplexität und wenigen Nachbearbeitungsschritten gesucht. Außerdem wird angenommen, dass eine monatliche Druckkapazität von 150 Stunden zur Verfügung steht. Weiters legt der Experte fest, dass eine Kosten-Verbrauchskombination ab einem Teilewert von 90 Euro und einem Jahresverbrauch von 40 Stück ideal ist. Hinsichtlich der Beschaffungszeit werden Teile mit sehr hoher Wiederbeschaffungsdauer für den Umstieg auf AM als günstig erachtet. Bezüglich des Variationskoeffizienten werden vom Unternehmen Teile bevorzugt, die einen unregelmäßigen Verbrauch aufweisen.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die Grenzwerte bewusst interaktiv gestaltet werden, da eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungskombinationen für die additive Fertigung sprechen können. Ob die gewählten Grenzwerte für die Identifikation sinnvoll sind, entscheidet der Anwender.

Das Ergebnis der *Automatisierten Bewertung* ist in der Abbildung 53 ersichtlich. Neben der Reihung der Teile aus Kapitel 6.2 sind die Ergebnisse der Bewertung in Form des Gesamt- und der Bereichscores angeführt. Außerdem wird das geschätzte Einsparungspotenzial für die nächsten fünf Jahre ab der Umstellung auf AM angeführt.

Rangfolge nach Potenzial

Copy CSV Excel  $S_{Ax}$   $SB_{Axj}$   $EP_x$  Search

Nummer	Bewertung	Fertigungscharakteristik	Beschaffungscharakteristik	Lagerhaltungscharakteristik	Kostencharakteristik	Kritikalitätscharakteristik	Optimierungscharakteristik	Einsparungspotenzial (€/Jahr)	
1	12123XXXX	0,58	1	1	0,5	1	1	0	6254,69
2	12587XXXX	0,57	0,89	0,5	1	1	1	0	11496,65
3	46552XXXX	0,5	0,67	0,5	0,75	1	1	0	6093,19
4	83916XXXX	0,48	0,67	1	0,25	1	1	0	4570,41
5	46116XXXX	0,46	0,67	0,5	0,5	1	1	0	37337,8

Abbildung 53: Ergebnis der *Automatisierten Bewertung* in Form der Rangfolge (eigene Darstellung)

Auffallend ist, dass die Applikation, die vom Experten in Abschnitt 6.2 als druckbar deklarierten Teile 12123XXXX und 12587XXXX als erstes reiht. Dies spricht für eine funktionierende Teileidentifikation. Weiters ist zu beobachten, dass ohne Berücksichtigung der Kosten  $K_{Re}$ ,  $K_A$ ,  $K_{PZ}$ ,  $K_{NB}$  und  $K_Q$  alle Teile Kosteneinsparungen beim Umstieg auf AM aufweisen.



Die beiden Teile mit der höchsten Bewertung werden nachfolgend in der Applikation exemplarisch weiter im Detail betrachtet.

### 6.7.2 Beispiel 1 | Teil 12123XXXX – Steckdosenklappe

Die Merkmalsausprägungen des Ersatzteiles für die *Manuelle Bewertung* sind in Tabelle 21 dokumentiert.

	Merkmalsausprägung	Bewertung
Fertigungscharakteristik	Nachbearbeitungsbedarf	gering
	Brandschutzanforderungen	zu berücksichtigen
	Mechanische Belastung in Funktion	keine
	3D-Modell verfügbar	nein
	Werkstoff druckbar	ja mit Substitution
	Nachkonstruktion	möglich
Beschaffungscharakteristik	Lebenszyklusphase	EDO < X < EOS
	Obsoleszenzrisiko	gering
	Beschaffungsquellen	1
	Dringlichkeit	gering
	Ersatzteilsteher	nein
	Kannibalisierungsmöglichkeit	nicht relevant
Lagerhaltungscharakteristik	Teilekompatibilität	nein
	Lagerfähigkeit Rohmaterial	gegeben
Kostencharakteristik	Lagerfähigkeit ET	gegeben
	Qualitätsprüfungskosten	100 €/a
	Redesingkosten	1 500 €
	Patent- und Zulassungskosten	0 €
	Anschaffungskosten Maschinen/Werkzeug	0 €
Kritikalitätscharakteristik	Nachbearbeitungskosten	10 €/Stk.
	Ausfallwahrscheinlichkeit	gering
Optimierungscharakteristik	Kritikalität	unkritisch
	Enabler - Leichtbau	nicht möglich
	Enabler - Funktionsintegration	nicht möglich
	Enabler - Materialsubstitution	möglich
	Enabler - Integralbauweise	nicht möglich

Tabelle 21: *Manuelle Bewertung* Teil 12123XXXX (eigene Darstellung)

Nach der Auswahl der Merkmalsausprägungen in Abbildung 49 (5) erhält der Anwender entsprechend Abbildung 50 (8) nachfolgende Bereichsbewertungen (siehe Abbildung 54) als Ergebnis.



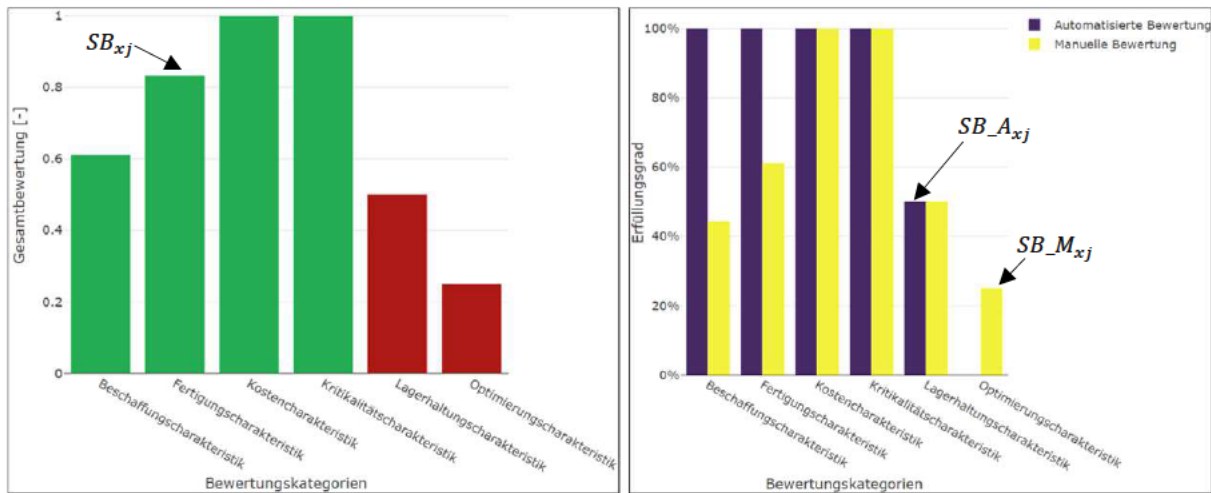


Abbildung 54: *Potenzialbewertung* (links) und *Bewertung im Detail* (rechts) für Teil 12123XXXX (eigene Darstellung)

Die Bewertungsbereiche *Kosten-*, *Kritikalitäts-* und *Fertigungscharakteristik* sprechen für den Umstieg auf AM (siehe Abbildung 54 – links). Bei der *Beschaffungscharakteristik* gibt es Defizite resultierend aus den manuell festgelegten Merkmalsausprägungen (siehe Abbildung 54 – rechts). Die *Lagerhaltungs-* und *Optimierungscharakteristik* weisen eine niedrige Bewertung (rote Balken links) auf. Sie müssen vom Experten nochmals analysiert werden. Bei genauer Betrachtung stellt dieser fest, dass diese Bereiche nicht für, jedoch auch nicht gegen AM sprechen. Der geringe Verbrauch sowie der hohe Bestand des Teils kann bei dem zu realisierenden Einsparungspotenzial vernachlässigt werden und die *Optimierungscharakteristik* deutet lediglich darauf hin, dass nur eine Bauteiloptimierungsmaßnahme, die AM begünstigt, möglich ist.

Zur *Kostenanalyse* wird nachfolgend der *Szenario Editor* herangezogen. Es werden in Anlehnung an das in Kapitel 4.1 vorgestellte ET-Lebenszyklusmodell unterschiedliche Versorgungsstrategien miteinander verglichen.

Da es sich um ein Teil mit erhöhten Brandschutzanforderungen handelt (siehe Tabelle 21) wird als Werkstoff für die Steckdosenklappe *Ultem* festgelegt. Außerdem wird in allen nachfolgend beschriebenen AM-Szenarien mit einer Schichthöhe von 0,33 Millimetern gefertigt.

### 6.7.2.1 Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. *Print-on-Demand*

Der Kostenvergleich zwischen der aktuellen Beschaffungs- und Lagerhaltungsstrategie des ET und dem durch AM realisierbaren *Print-on-Demand* als ET-Versorgungsstrategie erfolgt über die in Tabelle 22 erfassten Einstellungen im *Szenario Editor*.

Für die Kostenberechnung der aktuellen Ersatzteilversorgung wird  $\alpha_B$  auf 100 Prozent gesetzt, unter der Annahme, dass der durchschnittliche Lagerbestand die nächsten

Jahre konstant gehalten wird. Der Lagerbestand bei AM beläuft sich in diesem Fall auf null Prozent des durchschnittlichen Lagerbestands ( $\alpha_{BAM} = 0\%$ ), da bei *Print-on-Demand* nur Teile produziert werden, wenn ein unmittelbarer Bedarf besteht. Der mathematische Einfluss von  $\alpha_{BAM}$  sowie  $\alpha_B$  auf die Berechnung kann in Formel 16 und Formel 17 nachvollzogen werden.

Teil: 12123XXXX – Steckdosenklappe   Abbildung 55					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Aktuelle Ersatzteilversorgung	$\alpha_B$	100%	Schichthöhe	0,33 mm	8 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
Print-on-Demand	$\alpha_{BAM}$	0%	Material	Ultem	

Tabelle 22: Beispiel 1 – Einstellungen Szenario Editor: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. *Print-on-Demand* (eigene Darstellung)

In Abbildung 55 werden auf der linken Seite die AM-Stückkosten  $K_x$  mit denen der aktuellen Beschaffungs- und Lagerpolitik  $KB_x$  des ET verglichen. Da beim Umstieg auf AM Redesingkosten anfallen, sind die Stückkosten anfänglich deutlich höher als bei der konventionellen Beschaffung. Über den Zeitverlauf verteilen sich die AM-Gesamtkosten jedoch auf einen immer größeren Verbrauch. Folglich sinken dadurch die Stückkosten. Da sich die Einkaufspreise beim Lieferanten nicht ändern und der durchschnittliche Lagerbestand in die Zukunft fortgeschrieben wird, ist  $KB_x$  konstant.

Auf der rechten Seite der Grafik sind die Gesamtkosten beider Szenarien sowie das Einsparungspotenzial  $EP_x$  dargestellt. Die Einsparungskurve (rot) startet im Negativen, da im Gesamtkostenvergleich bei einjähriger Betrachtung durch den Umstieg auf AM Mehrkosten anfallen. Nach zwei Jahren haben sich jedoch die Redesingkosten (siehe Tabelle 21) bereits amortisiert und es werden Einsparungen gegenüber der aktuellen Ersatzteilversorgung erzielt.

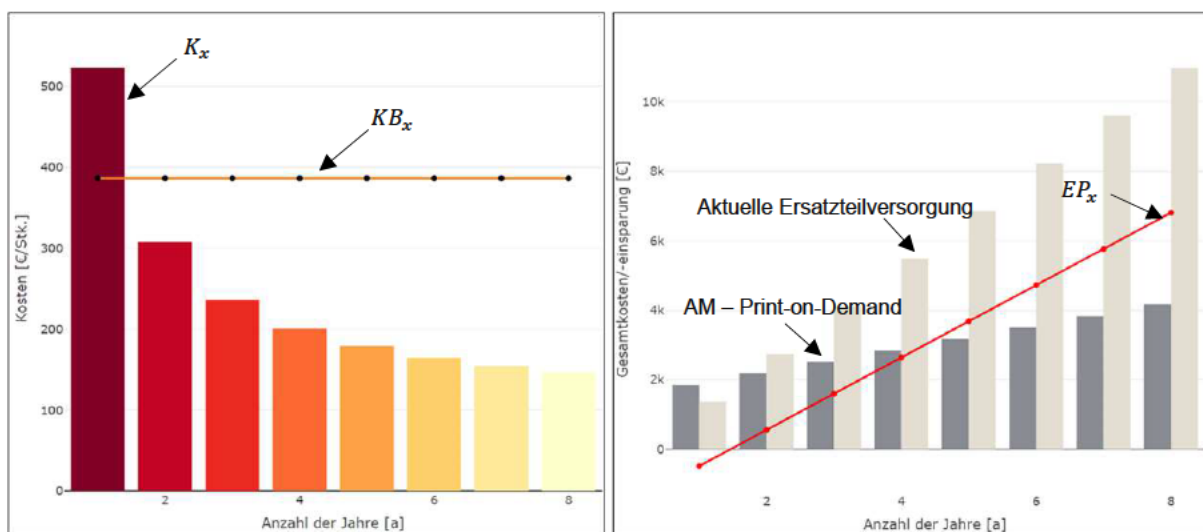


Abbildung 55: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. *Print-on-Demand* (eigene Darstellung)

### 6.7.2.2 Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion

Da *Print-on-Demand* nicht immer umsetzbar ist, wird in diesem Abschnitt untersucht, inwieweit sich eine Verringerung des Lagerbestands durch den Einsatz von AM auf die Kosten auswirkt. Dazu wird angenommen, dass sich der durchschnittliche Lagerbestand bei AM auf 60 Prozent des ursprünglichen Bestands reduzieren lässt (siehe dazu Tabelle 23).

Teil: 12123XXXX – Steckdosenklappe   Abbildung 56					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Aktuelle Ersatzteilversorgung	$\alpha_B$	100%	Schichthöhe	0,33 mm	15 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
AM mit Lagerbestandsreduktion	$\alpha_{BAM}$	60%	Material	Ultem	

Tabelle 23: Beispiel 1 – Einstellungen *Szenario Editor*: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Nach drei Jahren ergibt sich bei diesem Szenario ein Vorteil gegenüber der aktuell eingesetzten ET-Strategie (siehe Abbildung 56).

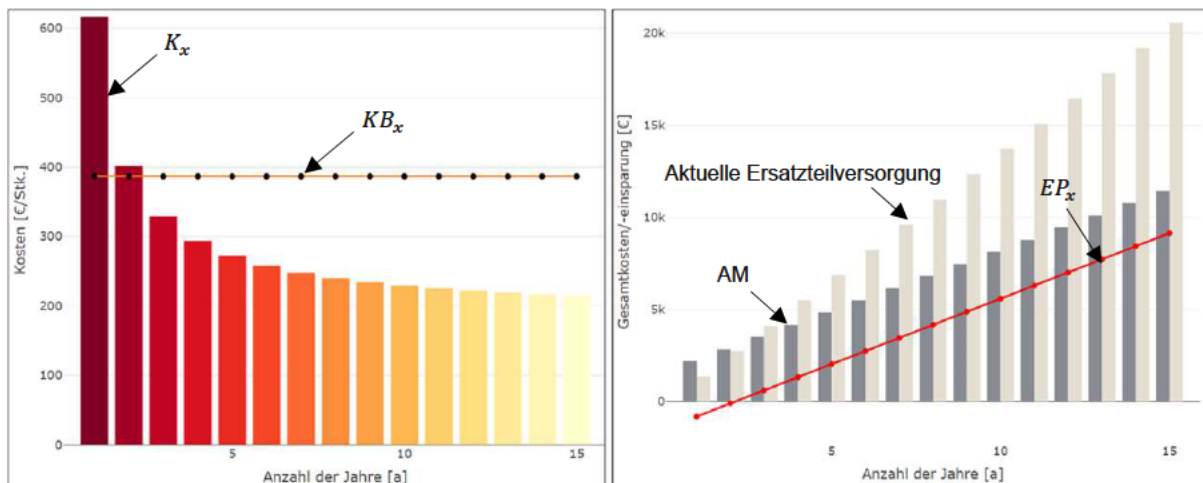


Abbildung 56: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Beim Vergleich von Abbildung 55 und Abbildung 56 fällt auf, dass die Lagerkosten für die Wirtschaftlichkeit einer Versorgungsstrategie eine entscheidende Rolle spielen.

### 6.7.2.3 Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion

Wird bei der Evaluierung der ET-Versorgungsstrategie zwischen AM und einer Endbevorratung tendiert, zeichnet sich für die Einstellungen im *Szenario Editor* in Tabelle 24 nachfolgendes Bild ab (siehe Abbildung 57).

Teil: 12123XXXX – Steckdosenklappe   Abbildung 57					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Endbevorratung	siehe Formel 17	-	Schichthöhe	0,33 mm	15 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
AM mit Lagerbestandsreduktion	$\alpha_{BAM}$	60%	Material	Ultem	

Tabelle 24: Beispiel 1 – Einstellungen *Szenario Editor*: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Sollte der *EOU* mehr als drei Jahre in der Zukunft liegen, ist es sinnvoll, AM gegenüber einer Endbevorratung zu bevorzugen. Je länger Teile endbevorratet werden, desto höher wird der Anteil der Lagerkosten in den Gesamtkosten. Es zeigt sich, dass eine Endbevorratung über einen langen Zeithorizont sehr kostenintensiv ist.

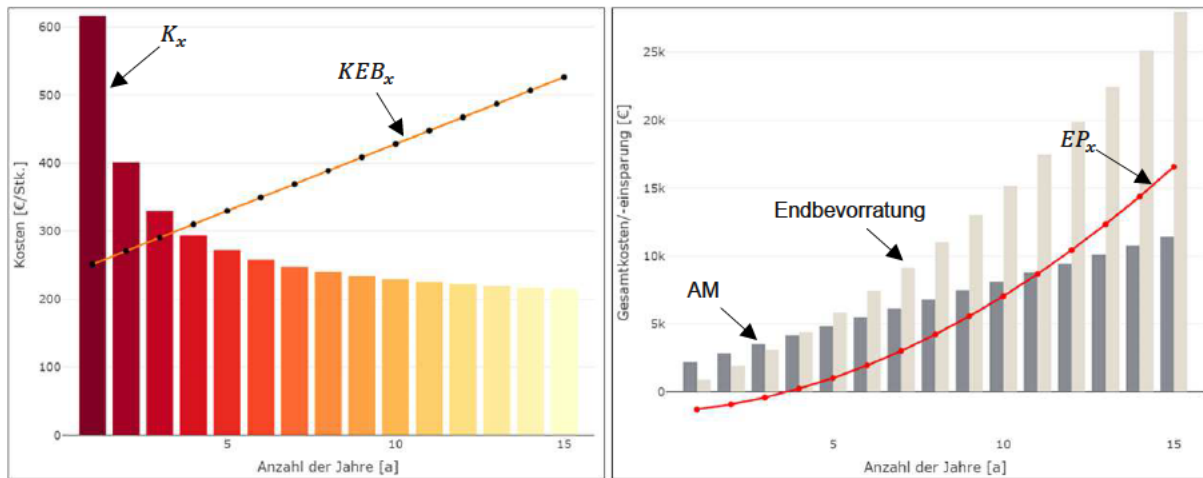


Abbildung 57: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

### 6.7.2.4 Interne vs. externe Nachfertigung

Da AM für das ET 12123XXXX in vielen Fällen die bessere Versorgungsstrategie darstellt, wird untersucht, ob eine interne oder eine externe Nachfertigung anzustreben ist. Dazu wird vom Experten des Anwendungsunternehmens bei einem AM-Dienstleister ein Angebotspreis für die Steckdosenklappe eingeholt (vgl. Anwendungsunternehmen 2022). In Abbildung 58 werden die Kosten der Eigen- und Fremdfertigung verglichen.

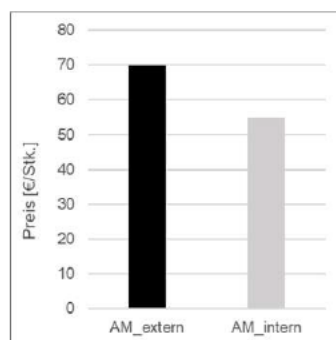


Abbildung 58: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Interne vs. externe Fertigung (eigene Darstellung)



Anzumerken ist, dass es sich bei dieser Differenzierung um die reinen Herstellungskosten (inkl. Gewinnspanne des Dienstleisters) handelt und  $K_{Re}$ ,  $K_A$ ,  $K_{PZ}$ ,  $K_{NB}$  und  $K_Q$  nicht berücksichtigt sind. Weiters gilt der Preis des externen Herstellers erst ab einer Mindestbestellmenge von zehn Stück, was dem 2,5-fachen Jahresbedarf des ET entspricht. Neben höheren Lagerkosten ist die Fremdfertigung über 25 Prozent teurer als die Eigenfertigung.

#### 6.7.2.5 Fazit Teil 12123XXXX – Steckdosenklappe

Da die Steckdosenklappe laut Experten noch lange zur Instandhaltung der aktuellen SF-Flotte benötigt wird und das Kosteneinsparungspotenzial mit über 50 Prozent ab einem Betrachtungszeitraum von vier Jahren vielversprechend ist, kann auf eine interne Nachfertigung mittels AM zur Deckung der Ersatzteilbedarfe im Anwendungsunternehmen umgestellt werden. In Abbildung 59 ist das additiv gefertigte ET ersichtlich.



Abbildung 59: Additiv gefertigtes Teil 12123XXXX (eigene Darstellung)

### 6.7.3 Beispiel 2 | Teil 12587XXXX – Bettleiterfuß

Die manuelle Bewertung des zweiten ausgewählten ET ist nachfolgend dargestellt (siehe Tabelle 25).

	Merkmal	Ausprägungen
Fertigungscharakteristik	Nachbearbeitungsbedarf	keine
	Brandschutzanforderungen	zu berücksichtigen
	Mechanische Belastung in Funktion	mittlere
	3D-Modell verfügbar	nein
	Werkstoff druckbar	ja mit Substitution
	Nachkonstruktion	möglich
Beschaffungscharakteristik	Lebenszyklusphase	EDO < X < EOS
	Obsoleszenzrisiko	gering
	Beschaffungsquellen	<=1
	Dringlichkeit	gering
	Ersatzteilsteher	nein
	Kann balisierungsmöglichkeit	nicht relevant
Lagerhaltungscharakteristik	Teilekompatibilität	nicht relevant
	Lagerfähigkeit Rohmaterial	gegeben
Kostencharakteristik	Lagerfähigkeit ET	gegeben
	Qualitätsprüfungskosten	0 €/a
	Redesingkosten	0 €
	Patent- und Zulassungskosten	0 €
	Anschaffungskosten Maschinen/Werkzeug	0 €
	Nachbearbeitungskosten	0 €/Stk.
Kritikalitätscharakteristik	Ausfallwahrscheinlichkeit	gering
	Kritikalität	unkritisch
Optimierungscharakteristik	Enabler - Leichtbau	nicht möglich
	Enabler - Funktionsintegration	nicht möglich
	Enabler - Materialsubstitution	möglich
	Enabler - Integralbauweise	nicht möglich

Tabelle 25: Manuelle Bewertung Teil 12587XXXX (eigene Darstellung)

Für die *Gesamtbewertung* ergeben sich nachfolgende Bereichsbewertungen (siehe Abbildung 60).

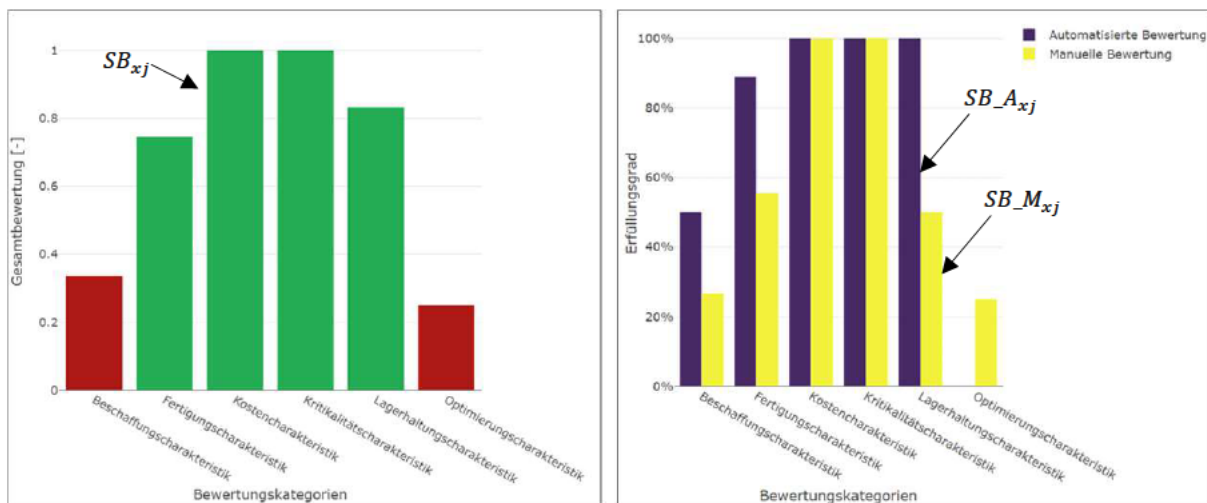


Abbildung 60: Potenzialbewertung (links) und Bewertung im Detail (rechts) für Teil 12587XXXX (eigene Darstellung)



Auffällig ist das gute Abschneiden des Bauteils in sämtlichen Bewertungsbereichen, ausgenommen die *Beschaffungs-* und *Optimierungscharakteristik*. Da die Marktsituation in puncto Bezug des Ersatzteils trotz der Monopolstellung des Lieferanten gut ist, spricht aus der Perspektive der *Beschaffungscharakteristik* nichts für einen unmittelbaren Handlungsbedarf in der Ersatzteilversorgung. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass keines der Beschaffungsmerkmale gegen AM spricht, lediglich AM nicht begünstigt wird. Weiters zeigt die *Optimierungscharakteristik* auf, dass bis auf die Materialsubstitution keine Maßnahmen zur Bauteilverbesserung unternommen werden können.

Durch das besonders gute Abschneiden in den Bewertungsbereichen *Fertigungs-, Kritikalitäts-, Kosten- sowie Lagercharakteristik* und da beschaffungsseitig nichts gegen AM spricht, werden die Kosten näher analysiert. Dazu wird der in der Applikation integrierte *Szenario Editor* herangezogen. Zum Erfüllen der Brandschutzanforderungen und des Einsatzzwecks wird der Hochleistungskunststoff TPU gewählt.

### 6.7.3.1 Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. *Print-on-Demand*

In der Abbildung 61 werden die Kosten von *Print-on-Demand* mit den konventionellen Bezugskosten (inkl. Lagerkosten) der aktuellen Ersatzteilversorgung des Anwendungsunternehmens verglichen. Die Tabelle 26 gibt einen Überblick über die Einstellungen im *Szenario Editor*.

Teil: 12587XXXX – Bettleiterfuß   Abbildung 61					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Aktuelle Ersatzteilversorgung	$\alpha_B$	100%	Schichthöhe	0,127 mm	5 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
Print-on-Demand	$\alpha_{BAM}$	0%	Material	TPU	

Tabelle 26: Beispiel 2 – Einstellungen *Szenario Editor*: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. *Print-on-Demand* (eigene Darstellung)

Bei der Betrachtung von Abbildung 61 wird deutlich, dass aufgrund der geringen Fertigungskosten ein Einsparungspotenzial beim Umstieg auf AM von mehr als 50 Prozent realisierbar ist. Bereits nach fünf Jahren könnten dadurch über 8.000 Euro eingespart werden.

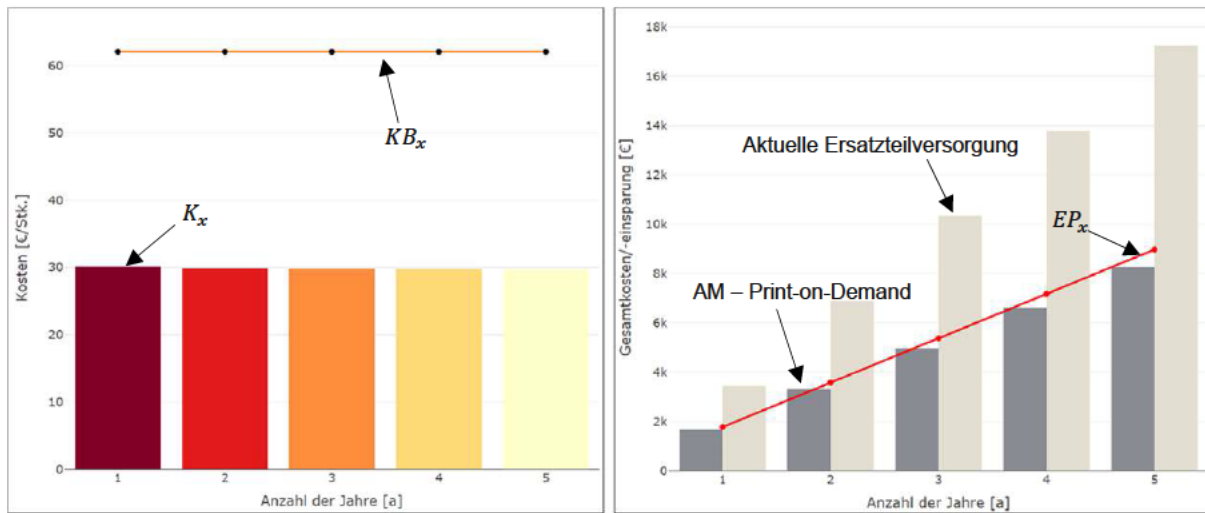


Abbildung 61: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. Print-on-Demand (eigene Darstellung)

### 6.7.3.2 Just-in-Time Beschaffung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion

Wird bei der Evaluierung der ET-Versorgungsstrategie zwischen einer *Just-in-Time* (JIT) Beschaffung und der internen Nachfertigung mit AM tendiert, ergibt sich nachfolgende Grafik (siehe Abbildung 62).

Für die AM-Strategie wird angenommen, dass der Bestand auf 55 Prozent des durchschnittlichen Lagerbestands reduziert werden kann. Die Tabelle 27 fasst die Eintragungen im *Szenario Editor* zusammen.

Teil: 12587XXXX – Bettleiterfuß   Abbildung 62					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
JIT-Beschaffung	$\alpha_B$	0%	Schichthöhe	0,127 mm	15 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
AM mit Lagerbestandsreduktion	$\alpha_{BAM}$	55%	Material	TPU	

Tabelle 27: Beispiel 2 – Einstellungen *Szenario Editor*: JIT-Beschaffung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Durch den Umstieg auf JIT können Kosten gespart werden. Der Verlauf von  $EP_x$  auf der rechten Seite der Grafik bildet die Mehrkosten von AM gegenüber JIT im Zeitverlauf ab.

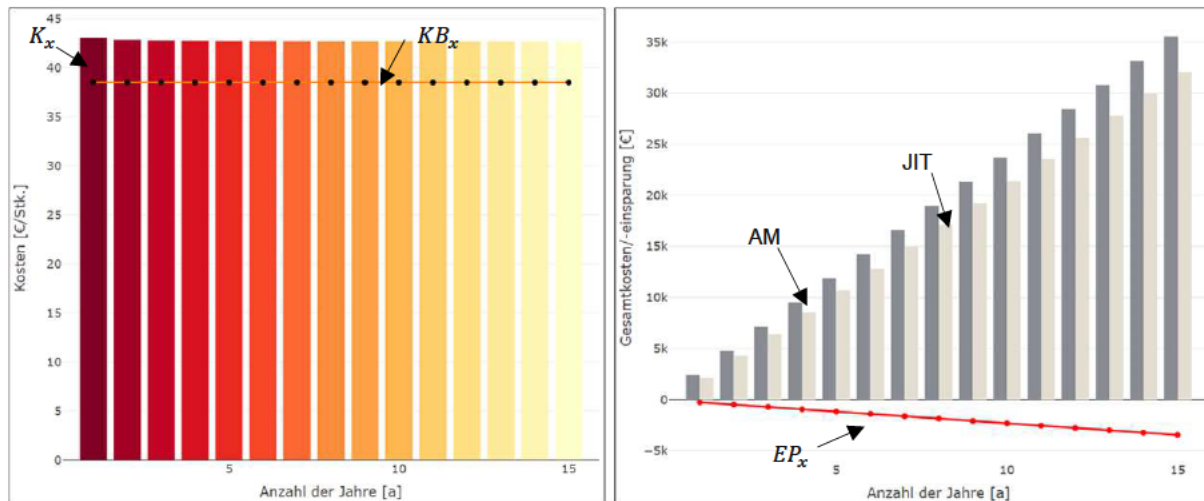


Abbildung 62: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: JIT vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei JIT zwar keine Lagerkosten anfallen, jedoch zusätzliche Logistikkosten auftreten können. Diese sind in  $KB_x$  nicht berücksichtigt. Da es für das Bauteil nur einen Lieferanten gibt (siehe dazu Tabelle 25), müsste dieser weiters dazu bereit sein, seine Anlieferungsstrategie abzuändern.

### 6.7.3.3 Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion

Für den Vergleich der beiden ET-Bereitstellungsstrategien Endbevorratung und AM-Nachfertigung werden die in Tabelle 28 dokumentierten Einstellungen im *Szenario Editors* ausgewählt.

Teil: 12587XXXX – Bettleiterfuß   Abbildung 63					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Endbevorratung	siehe Formel 17	-	Schichthöhe	0,127 mm	15 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
AM mit Lagerbestandsreduktion	$\alpha_{BAM}$	25%	Material	TPU	

Tabelle 28: Beispiel 2 – Einstellungen *Szenario Editor*: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Im Falle einer Endbevorratung ergeben sich deutlich höhere Kosten als beim Umstieg auf AM (siehe dazu Abbildung 63). Bei einer Reduktion des durchschnittlichen Lagerbestands durch AM auf 25 Prozent befindet sich die additive Fertigung, selbst bei einer Endbevorratung von einem Jahr (angenommener *EOU*), klar im Vorteil.

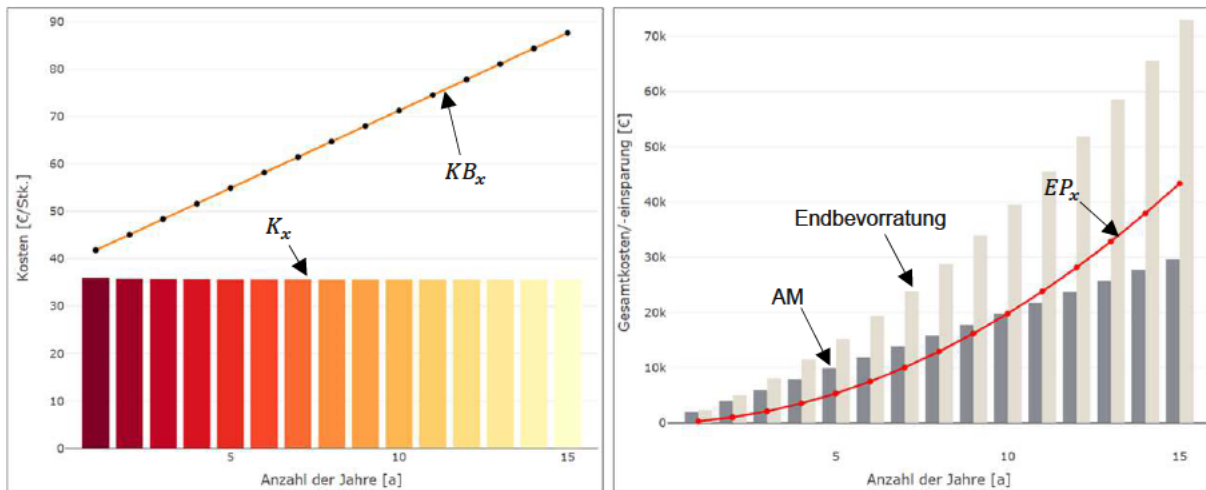


Abbildung 63: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

Bei der Weiterführung des aktuellen durchschnittlichen Lagerbestands ( $\alpha_{BAM} = 100\%$ ) trotz der Nachfertigung mittels AM, würde bereits nach fünf Jahren AM eine günstigere Ersatzteilversorgung als die Endbevorratung darstellen (siehe Abbildung 64).

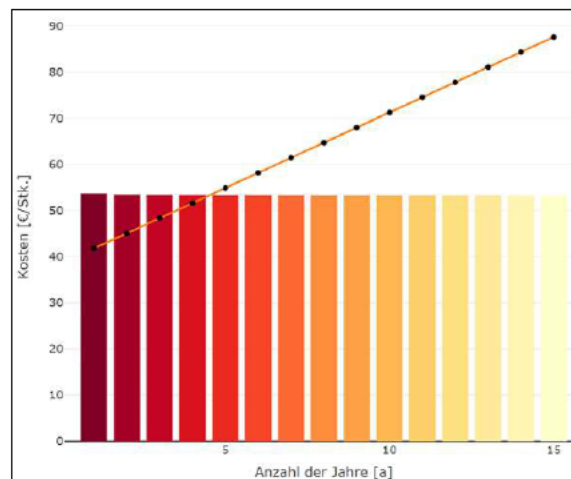


Abbildung 64: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion (eigene Darstellung)

#### 6.7.3.4 Beschaffungspreis vs. AM-Fertigungskosten

Zur Gegenüberstellung des Beschaffungspreises mit den AM-Fertigungskosten werden im *Szenario Editor* nachfolgende Einstellungen getroffen (siehe Tabelle 29). Da das Teil optisch keinen hohen Anforderungen genügen muss, wird die Schichthöhe von 0,127 auf 0,254 Millimetern erhöht.

Teil: 12587XXXX – Bettleiterfuß   Abbildung 65					Zeitraum
Strategie	Parameter	Wert	Druckereinstellungen	Wert	
Beschaffungskosten	$\alpha_B$	0%	Schichthöhe	0,245 mm	5 a
versus			Bauraumanordnung	einfach	
AM-Fertigungskosten AM	$\alpha_{BAM}$	0%	Material	TPU	

Tabelle 29: Beispiel 2 – Einstellungen *Scenario Editor*: Beschaffungskosten vs. AM-Fertigungskosten (eigene Darstellung)

Beim Vergleich des Einkaufspreises mit den Eigenfertigungskosten, zeigt sich, dass der Beschaffungspreis am Markt gegenüber der internen Nachfertigung mittels AM nicht wettbewerbsfähig ist. Die Gegenüberstellung von Abbildung 61 und Abbildung 65 verdeutlicht außerdem die Reduktion von  $K_{AM}$  aufgrund der vergrößerten Schichthöhe.

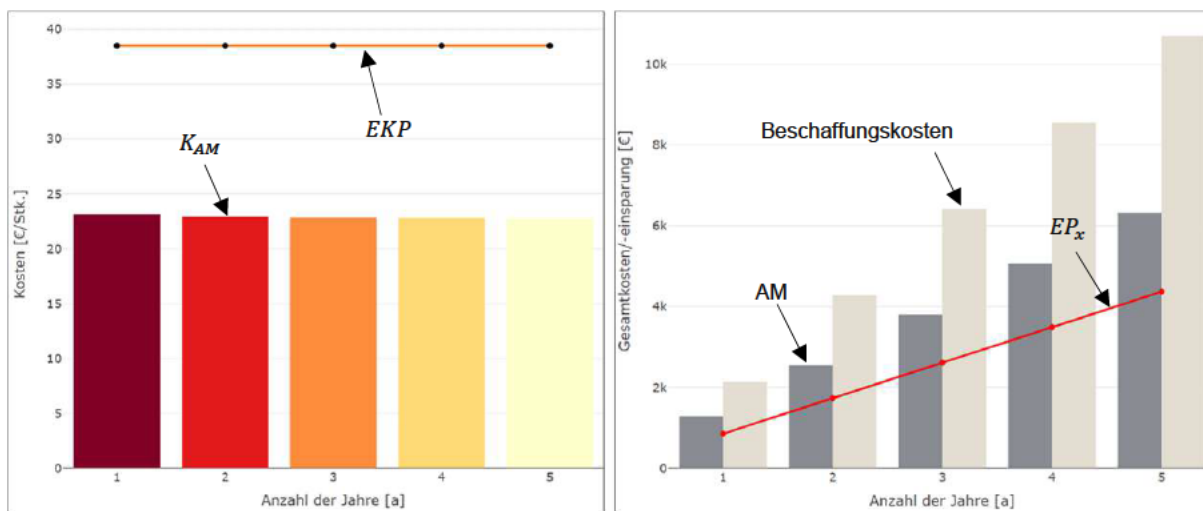


Abbildung 65: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Beschaffungskosten vs. AM-Fertigungskosten (eigene Darstellung)

### 6.7.3.5 Interne vs. externe Nachfertigung

Für das ET 12587XXXX wird ebenfalls untersucht, ob eine interne oder eine externe Nachfertigung anzustreben ist. In der Abbildung 66 werden die Kosten der Eigenfertigung dem Angebot eines AM-Auftragsfertigers gegenübergestellt (vgl. 3faktor 2022). Die Eigenfertigung erweist sich als deutlich günstiger. Dies ist auf die Gewinnaufschläge des externen Produzenten sowie auf einen unterschiedlichen Maschinenkostensatz zurückzuführen.



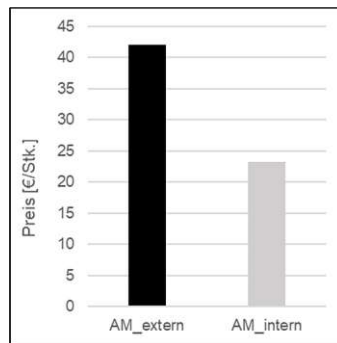


Abbildung 66: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Interne vs. externe Fertigung (eigene Darstellung)

### 6.7.3.6 Fazit Teil 12587XXXX – Bettleiterfuß

Aufgrund der Bereichsbewertungen und des vielversprechenden Einsparungspotenzials wird das Teil 12587XXXX in Zukunft mittels AM für die Instandhaltung bereitgestellt. Durch den Umstieg auf *Print-on-Demand* als ET-Versorgungsstrategie können beispielsweise innerhalb der nächsten fünf Jahre über 9.000 Euro eingespart werden. In Abbildung 67 ist ein additiv gefertigter Prototyp des Ersatzteiles ersichtlich.



Abbildung 67: Additiv gefertigtes Teil 12587XXXX (eigene Darstellung)

### 6.7.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads des Bewertungsmodells und der erfolgreichen Validierung wird gefolgert, dass eine Implementierung der Applikation zu einer Prozessoptimierung beim Anwendungsunternehmen führt. Neben der Reduzierung von Bürokratie, entfallen durch den automatisierten Teil des Bewertungsmodells die Prozessschritte der Teileidentifikation. Die Bewertung der ET erfolgt außerdem objektiv und strukturiert. Aufgrund der Bündelung aller relevanten Informationen in einer Schnittstelle und durch den systematischen Aufbau wird die Entscheidungsfindung beschleunigt. Der durch das Bewertungsmodell verschlankte, neue AM-Identifikationsprozess des Anwendungsunternehmens ist in Abbildung 68 dargestellt.



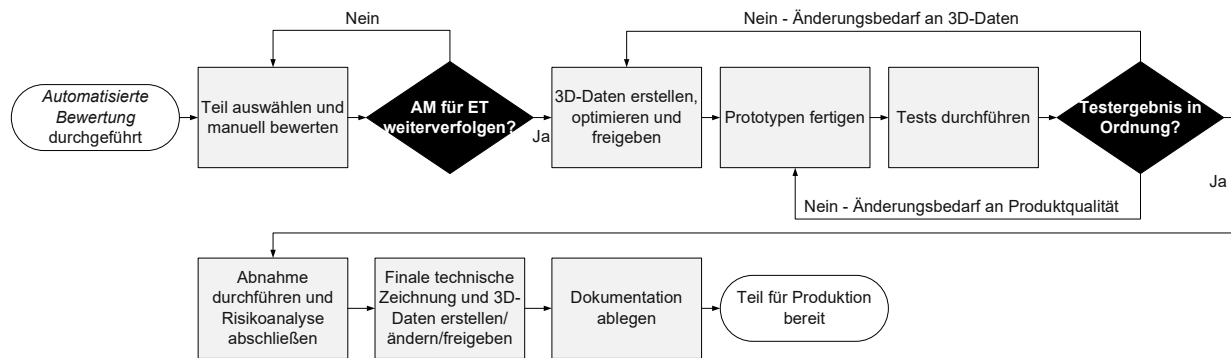


Abbildung 68: Prozessverbesserung des AM-Identifikationsprozesses beim Anwendungsunternehmen durch das Potenzialbewertungsmodell (eigene Darstellung)

Neben der Reduzierung von Prozesszeiten ermöglicht es die Umsetzung des Bewertungsmodells als Applikation, die Vorteile von AM im EM auszuspielen. Die beiden identifizierten Teile geben erste Rückschlüsse auf die Höhe möglicher Einsparungspotenziale. Bei einer konservativen Schätzung, dass sich lediglich 2 Prozent der über 100.000 ET des Anwendungsunternehmens für AM eignen, kann von möglichen jährlichen Einsparungen in Millionenhöhe ausgegangen werden.

Die Ergebnisse des Fallbeispiels wurden entsprechend der DSRM (*Schritt 6 – Kommunikation*) mit den Partnern des Forschungsprojektes „AM4Rail“ diskutiert. Die Inputs seitens Industrie und Wissenschaft, wurden über die in Abbildung 1 integrierte Prozessiterationsschleife bei der Umsetzung dieses Kapitels berücksichtigt.

## 6.8 Restriktionen des Bewertungsmodells und zu berücksichtigende Rahmenbedingungen

Im Zuge der durchgeführten Expertenworkshops und der Anwendung des Bewertungsmodells beim Anwendungsunternehmen können nachfolgende Einschränkungen (siehe Abschnitt 6.8.1) sowie zu beachtende Rahmenbedingungen (siehe Abschnitt 6.8.2) im Kontext des Modells identifiziert werden.

### 6.8.1 Einschränkungen des Modells

#### *Restriktion 1: Datenverfügbarkeit*

Ausgehend von den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1 wird deutlich, dass manche in der Literatur angeführten Merkmale weder automatisiert noch manuell erhoben werden können. Ein Beispiel dafür ist die Ausfallwahrscheinlichkeit. Außerdem werden von den SFB lediglich jene Ersatzteile im SAP-System angelegt, für die es einen signifikanten Verbrauch gibt. Diese reaktionäre Vorgehensweise führt unter anderem zu Problemen, vor allem wenn Teile erst gegen Ende des Lebenszyklus in größerer Anzahl ausfallen.

### *Restriktion 2: Datenverwertbarkeit*

In ERP-Systemen kommt es vor, dass nicht alle Ersatzteilmerkmale von den Verantwortlichen gepflegt werden oder die Eintragungen falsch sind. Bei der durchgeführten Datenanalyse sind folgende Herausforderungen für die Ausrollung des Bewertungsmodells auf das gesamte Ersatzteilspektrum des Anwendungsunternehmens aufgetreten:

- Pflichtfelder werden teilweise mit Platzhaltern befüllt
- Nicht für alle Materialien ist ein Werkstoff hinterlegt
- Dimensionen im SAP sind teilweise nicht vorhanden

### *Restriktion 3: Kostenberechnung*

Die Änderung des durchschnittlichen Lagerbestandes kann im Modell über den *Szenario Editor* eingestellt werden und nimmt die zukünftige Entwicklung als konstant an. Mehrere aufeinanderfolgende Strategien können nicht simuliert werden.

### *Restriktion 4: Programmieroberfläche*

3D-Modelle sind in der Applikation nicht darstellbar. Aus diesem Grund werden bei der Auswahl eines Ersatzteiles, falls verfügbar, lediglich die 2D-Ableitung in der *Manuellen Bewertung* angezeigt.

## **6.8.2 Rahmenbedingungen**

### *Rahmenbedingung 1: Materialien*

Es ist nicht jedes Material für den Schienenfahrzeugbereich zugelassen, da hohe Brandschutzanforderungen erfüllt werden müssen. Die nachfolgenden sieben Sicherheitsklassen (R-Klassen) nach DIN EN 45545 (vgl. DIN EN 45545-1:2013-08 2013) sind für den Schienenverkehr von besonderer Bedeutung (vgl. Schlingmann 2022, S. 11):

- R1: Große nicht gelistete Bauteile im Innenbereich
- R2: Bauteile mit begrenzten Oberflächen
- R7: Große nicht gelistete Bauteile im Außenbereich
- R22: Kleine nicht gelistete Bauteile im Innenbereich  $< 0,2 \text{ m}^2$
- R23: Kleine nicht gelistete Bauteile im Außenbereich  $< 0,2 \text{ m}^2$
- R24: Sehr kleine nicht gelistete Bauteile im Innen- und Außenbereich  $< 500 \text{ g}$
- R26: Kleine elektronische Bauteile

Aufgrund dieser Reglementierungen gibt es eine begrenzte Anzahl von Materialien, die von SFB eingesetzt werden können. Die Abbildung 69 gibt einen Überblick über die bedeutsamsten Materialien.

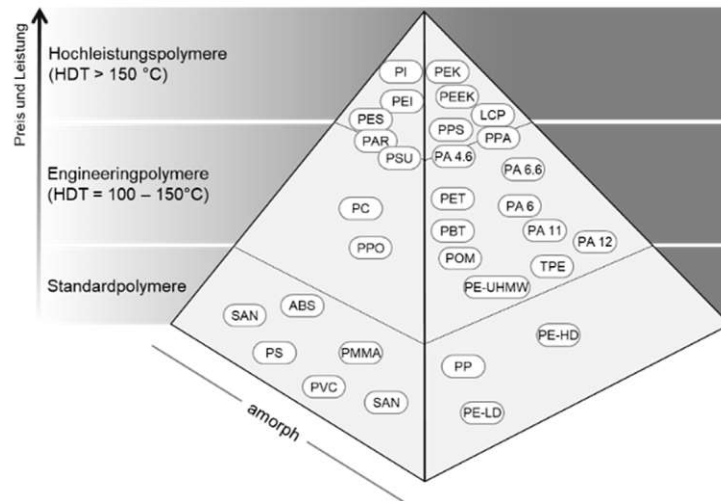


Abbildung 69: Einteilung amorpher Materialien nach Preis und Hitzebeständigkeit (vgl. Schlingmann 2022, S. 14)

Für Schienenfahrzeuge sind je nach R-Klasse vor allem die in der Spitze der Pyramide angeführten Materialien geeignet. Die Materialien des im Fallbeispiels verwendeten Druckers erfüllen lediglich teilweise diese Anforderungen.

### Rahmenbedingung 2: Rechtliche Aspekte

Weiters müssen bei der Verwendung des Modells rechtliche Aspekte berücksichtigt werden. Kommt es zur Nachfertigung und/oder Umkonstruktion eines ausgewählten Teils sind folgende Rechtsgrundlagen zu beachten (Senior Associate: Internationale Anwaltskanzlei, persönliche Korrespondenz, Wien, 12.05.2022):

- Immaterialgüterrechte
  - Patent- und Gebrauchsmusterrecht
  - Design- und Geschmacksmusterschutz
  - Markenrecht
  - Urheberrecht
- Produkthaftungsrecht
- Wettbewerbsrecht

Vor allem bei älteren Ersatzteilen stehen die Chancen gut, dass es aus rechtlicher Sicht keine Einwände gegen die Nachfertigung gibt. Im Zweifelsfall ist ein Jurist beizuziehen.

## 7 Diskussion und Ausblick

### 7.1 Ergebnisse der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Ersatzteillebenszyklusmodell und ein teilautomatisiertes AM-Potenzialbewertungsmodell zur Identifikation von Ersatzteilen für die additive Fertigung im Schienenfahrzeugbereich entwickelt.

Das Lebenszyklusmodell zeigt die Komplexität der Ersatzteilversorgung am Beispiel des Schienenfahrzeugbereichs auf und geht auf das Risiko der Bauteilobsoleszenz ein. Es integriert gängige Strategien der Nachserienversorgung und verdeutlicht Versorgungslücken. Weiters werden, darauf aufbauend, entlang des Ersatzteillebenszyklus Anwendungsfelder der additiven Fertigung für die Ersatzteilversorgung von Maschinen und Anlagen mit langen Nutzungsdauern aufgezeigt sowie Erkenntnisse für die Potenzialbewertung von Ersatzteilen abgeleitet. Diese fließen einerseits in Form der Lebenszykluszeitpunkte in die *Manuelle Bewertung* und andererseits als gedankliche Hilfestellung für den Anwender in die *Kostenanalyse* des Bewertungsmodells ein.

Einen zentralen Teil der Arbeit bildet das entwickelte teilautomatisierte AM-Potenzialbewertungsmodell. Das Modell verbindet Anforderungen aus Literatur und Praxis. Es basiert auf 40 Merkmalen. Über diese wird die Eignung von Ersatzteilen für die additive Fertigung in den sechs Bewertungsbereichen *Fertigungscharakteristik*, *Beschaffungscharakteristik*, *Lagerhaltungscharakteristik*, *Kostencharakteristik*, *Kritikalitätscharakteristik* und *Optimierungscharakteristik* ermittelt. Das Modell besteht aus einer *Ersatzteildatenbank*, einer *Automatisierten Bewertung* sowie einer anschließenden *Manuellen Bewertung*. Ergänzt wird das Bewertungsmodell durch eine interaktive *Kostenanalyse*. Diese ermöglicht den Vergleich der additiven Fertigung mit anderen Versorgungsstrategien. Der Aufbau des Potenzialbewertungsmodells als intuitive Applikation löst den in Betrieben praktizierten Bottom-Up-Ansatz des Teilescreenings ab. Neben einem strukturierten und einheitlichen Ablauf zur Teileidentifikation wird sichergestellt, dass Ersatzteile mit hohem Potenzial lückenlos aufgezeigt werden. Die Einführung des Modells als Softwarelösung bei Unternehmen führt dazu, dass der AM-Entscheidungsprozess schlanker wird und eine objektive Bewertung von Bauteilen sichergestellt wird. Außerdem ermöglicht es, Einsparungspotenziale im Bereich der Ersatzteilversorgung zu quantifizieren und in weiter Folge die Ersatzteillogistik zu optimieren.

Das Potenzialbewertungsmodell wird in einem Fallbeispiel bei einem österreichischen Schienenfahrzeugbetreiber als Shiny-App umgesetzt und evaluiert. Die Funktionsfähigkeit des Bewertungsmodells lässt sich infolgedessen für ein ausgewähltes Ersatzteilspektrum nachweisen. Es werden zwei vielversprechende

Teile identifiziert und additiv gefertigt. Durch geringfügige Anpassungen und der Spezifikation von Druckparametern kann das Modell bei anderen Anlagenbetreibern unabhängig vom Schienenfahrzeugsektor angewendet werden.

## 7.2 Abschließende Diskussion der Forschungsfragen

Die in Abschnitt 1.3 definierte Forschungsfrage und die daraus resultierenden Subforschungsfragen werden, basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen, nachfolgend beantwortet.

**Forschungsfrage:** *Wie können etablierte Methoden und Bereitstellungskonzepte des Ersatzteil- und Obsoleszenzmanagements mit Technologien der additiven Fertigung und Lebenszyklusbetrachtungen kombiniert werden, um Bestände zu reduzieren, eine hohe Teileverfügbarkeit zu gewährleisten und nachhaltiger zu wirtschaften?*

Die Antwort der übergreifenden Forschungsfrage ergibt sich aus der Beantwortung der drei Subfragestellungen:

**Subfrage 1:** *Wie gestaltet sich der Lebenszyklus eines Ersatzteiles, welche Strategien lassen sich draus ableiten und welche Aspekte des Ersatzteillebenszyklus sind zur Potenzialbewertung der AM-Eignung relevant?*

Aufgrund der Komplexität der Ersatzteilversorgung bei Maschinen und Anlagen mit langen Lebensdauern ist es zweckmäßig, zur Analyse des Ersatzteillebenszyklus den des zugehörigen Primärproduktes aufzugreifen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 4.1 ein ganzheitliches Lebenszyklusmodell entwickelt. Für das Modell werden folgende für das EM und OM bedeutsame Zeitpunkte *BOL*, *SOP*, *EOP*, *EOS*, *EOA* und *EOU* definiert und die dazwischenliegenden Lebenszyklusphasen analysiert.

Im Zuge der Instandhaltung durch den Anlagenbetreiber wird beim Ausfall oder geplanten Austausch von Ersatzteilen bisher auf folgende Bereitstellungsstrategien zurückgegriffen:

- Bevorratung über interne oder externe Lagerhaltung
- Zukauf am OES, BTM oder IAM sowie Kannibalisierung
- Konventionelle Nachfertigung intern oder extern

Sowohl die Bevorratung, der Zukauf als auch die konventionelle Nachfertigung sind für die Ersatzteilbereitstellung oft nicht optimal. Im Bereich der Nachfertigung wird AM kaum aufgegriffen. Lediglich vereinzelt werden Bauteile über AM-Auftragsfertiger realisiert. Vor allem bei kleinen Losgrößen, unregelmäßigen Bedarfen und zur Verhinderung von Obsoleszenz bietet AM entscheidende Vorteile gegenüber den

herkömmlichen Versorgungsstrategien. Folgende AM-Strategien eignen sich zur Realisierung entlang des Ersatzteillebenszyklus:

- *Design for AM* (bis *SOP*) und *hybride Ersatzteilversorgung* durch den OEM/OCM (bis *EOS*)
- Nachfertigung von Ersatzteilen durch den Betreiber über Lizenzmodelle (ab *EOS*) bei *Design for AM* (bis *SOP*)
- Erwerb von Ersatzteilzeichnungen beim Kauf des Primärprodukts zur internen oder externen Nachfertigung (ab *SOP* oder *EDO* je nach vertraglichen Bestimmungen)
- Nachkonstruktion, Redesign oder 3D-Scan von Ersatzteilen zur Nachfertigung (ab *EDO*)
- *Print-on-Demand* knapp vor geplanten Instandhaltungen (ab *EDO*)
- *Print-on-Demand* bei Fehlteilen, um Ersatzteilsteher zu reduzieren (ab *EDO*)

Besonders die eingeführten Lebenszykluszeitpunkte (*SOP* bis *EOU*), die Versorgungsstruktur und das Obsoleszenzrisiko eines Ersatzteiles sind, ausgehend vom Lebenszyklusmodell, für die Potenzialbewertung aufschlussreich. Die meisten ersatzteilspezifischen Merkmale zur Potenzialbewertung gelten entlang des gesamten Lebenszyklus. Als wichtige Entscheidungsgrundlage für die additive Fertigung als Versorgungsstrategie erweist sich neben den Kosten die Bauteilobsoleszenz.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass die additive Fertigung Schienenfahrzeugbetreiber in Zukunft vor Abhängigkeiten und Materialengpässen bewahren kann. Zur Entfaltung des Potenzials in der Praxis muss die Fertigungsinfrastruktur jedoch noch weiter ausgebaut werden. Eine zukünftige Herausforderung für Unternehmen, im Besonderen SFB, besteht weiters in der Schaffung eines kollektiven Bewusstseins für die additive Fertigung.

***Subfrage 2: Welche ökonomischen und technischen Kriterien sprechen bei der Teilebereitstellung für den Einsatz der additiven Fertigung und wie können diese automatisiert sowie standardisiert ausgewertet werden?***

In der vorliegenden Arbeit werden in einer Literaturrecherche aus 74 wissenschaftlichen Veröffentlichungen 59 ökonomische und technische Merkmale zur Potenzialbewertung von Ersatzteilen für die additive Fertigung erhoben. Diese werden nach ihrer relativen Häufigkeit ausgewertet sowie in Expertenworkshops diskutiert. Es können daraus 40 Merkmale zur Bewertung des Ersatzteilpotenzials für den operativen Betrieb bei Schienenfahrzeugbetreibern definiert und den ausgearbeiteten Bewertungsbereichen *Fertigungscharakteristik*, *Beschaffungscharakteristik*, *Lagerhaltungscharakteristik*, *Kostencharakteristik*, *Kritikalitätscharakteristik* und *Optimierungscharakteristik* zugewiesen werden. Aufgrund der Interferenz von



ökonomischen und technischen Kriterien ist die Differenzierung der Merkmale nicht zweckmäßig.

Da nicht alle Ersatzteilmerkmale in den Unternehmensdatenbanken abgebildet sind, ist es naheliegend für die Potenzialbewertung einen teilautomatisierten Ansatz, wie in Kapitel 5 beschrieben, zu verfolgen. Diese Erkenntnis basiert auf der Analyse der Datenstruktur zweier österreichischer Schienenfahrzeugbetreiber in Kapitel 5.1. Zur Umsetzung eines Bewertungsmodells bedarf es eines replizierbaren Ansatzes (siehe Abschnitt 5.4.1.1) zur Generierung einer standardisierten Ersatzteildatenbank sowie eines Leitfadens für Expertenabschätzungen.

Für AM geeignete Teile können über die von der Ersatzteildatenbank und Experten bereitgestellten Merkmalsausprägungen mittels den in Kapitel 5.4 vorgestellten Logiken identifiziert und bewertet werden. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte teilautomatisierte AM-Potenzialbewertungsmodell ermöglicht eine einheitliche und strukturierte Teileidentifikation, eine objektive sowie transparente Bewertung, die Reduktion von Prozesskosten des Teilescreenings und die Realisierung von Einsparungen in der Ersatzteilversorgung.

**Subfrage 3:** *Wie kann ein Potenzialbewertungsmodell von Schienenfahrzeugbetreibern in der Praxis eingesetzt werden und wie lässt sich für ein definiertes Ersatzteilspektrum die Funktionsfähigkeit des Bewertungsmodells nachweisen?*

Das entwickelte Potenzialbewertungsmodell kann im Betrieb von Schienenfahrzeugbetreibern mittels einer Applikation eingesetzt werden. Der Bediener muss zu Beginn die additive Fertigungseinheit, Vorselektionen, Analysegrenzwerte und die Gewichtung von Bewertungsbereichen festlegen. Im automatisierten Teil der Bewertung (siehe Abschnitt 5.4.1.2) erhält der Anwender eine Rangfolge von Ersatzteilen nach deren Eignung. Aus dieser Reihung kann er ein vielversprechendes Bauteil per Mausklick auswählen. Im manuellen Teil der Bewertung (siehe Abschnitt 5.4.1.3) kann der Anwender für das ausgewählte Teil Merkmale bewerten, die nicht automatisiert evaluiert werden können. In der abschließenden *Gesamtbewertung* (siehe Abschnitt 5.4.1.4) wird dem Bediener das Ergebnis der Potenzialbewertung auf Bewertungsbereichsebene präsentiert. Ergänzend dazu ermöglicht die Applikation eine detaillierte Kostenanalyse mittels *Szenario Editor*. Über diesen kann die additive Fertigung anderen Versorgungsstrategien gegenübergestellt werden.

Das Bewertungsmodell wird im Fallbeispiel der vorliegenden Arbeit über die Programmiersprache R realisiert. Aus einem heterogenen Ersatzteilspektrum können zwei Bauteile erfolgreich identifiziert, bewertet und schlussendlich additiv gefertigt werden. Je nach Versorgungsstrategie werden Einsparungspotenziale von bis zu 50 Prozent der Gesamtkosten aufgezeigt. Eine wesentliche Erkenntnis des Fallbeispiels

ist die hohe Auswirkung der Lagerkosten auf die Stückkosten der verschiedenen Versorgungsstrategien. Außerdem wird deutlich, dass durch die additive Fertigung in Kombination mit einem automatisierten Teilescreening die Möglichkeit besteht, bedeutsame Einsparungen im Ersatzteilwesen von Schienenfahrzeugbetreibern zu realisieren.

### 7.3 Ausblick

Im Folgenden werden Vorschläge zur Weiterentwicklung der Lebenszyklusbetrachtung sowie des teilautomatisierten Potenzialbewertungsmodells diskutiert und zukünftige Forschungsbedarfe im Themenkomplex vorgestellt.

Die Nachhaltigkeit von Ersatzteilen wird in der Literatur lediglich anhand von ökonomischen Aspekten betrachtet. Ökologische oder soziale Faktoren, die wichtige Säulen der Nachhaltigkeitsdefinition sind, werden selten aufgegriffen. Ein Paradoxon, denn in vielen anderen Forschungsdomänen ist diese Thematik omnipräsent und aktuell. Vor allem in Bezug auf Lebenszyklusbetrachtungen gibt es in diesem Themenkomplex offene Forschungsfragen, wie beispielsweise im Bereich der Evaluierung von Umweltauswirkung beim Umstieg auf eine Ersatzteilversorgung mittels AM.

Für die im entwickelten Bewertungsmodell implementierte Kostenanalyse besteht Weiterentwicklungsbedarf hinsichtlich der Verwendung von Prognosedaten sowie der Abbildung sämtlicher in der Praxis vorherrschender Versorgungsstrategien. Die Berücksichtigung von konventionellen Herstellungsverfahren und Nachbearbeitungsmethoden in der Kostenanalyse bietet ein weiteres Verbesserungspotenzial für das Modell.

Weiters besteht für die automatisierte Teilebewertung eine Nachfrage an frei zugänglichen Material- und Druckerdatenbanken. Aktuell gibt es noch keine Register, die für ein gegebenes Ausgangsmaterial mögliche Substitutionsmaterialien führen oder additive Fertigungsverfahren vorschlagen. Weiters sind Druckparameter aus empirischen Studien für die gängigsten additiven Fertigungseinheiten nicht tabellarisch abrufbar.

Von großer Bedeutung für die automatisierte Potenzialbewertung wird zukünftig die Weiterentwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) sein. Mit Ansätzen des *Supervised Learning* können Algorithmen aus den Merkmalsausprägungen bereits additiv gefertigter Teile lernen und über Mustererkennung Ersatzteile mit hohem AM-Potenzial identifizieren. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft Algorithmen der KI konventionelle Programmierlogiken im Bereich der Potenzialbewertung ablösen oder ergänzen werden. Aktuell reicht, zumindest im Schienenfahrzeugbereich, die Datengrundlage noch nicht aus, um ein KI-Modell valide trainieren und in weiterer Folge einsetzen zu können.

## 8 Anhang

### 8.1 Literaturnachweise Merkmalliste

Merkmal	Quelle	Merkmal	Quelle
Beschaffungszeit	Celebi et al. (2008); Frandsen et al. (2020); Schlögel et al. (2021); Teixeira et al. (2017); Bacchetti & Saccani (2012); Kaiser et al. (2003); Moleneers et al. (2012); Shepherd & Meisel (2019); Lindemann et al. (2015)	Funktionsintegrationspotenzial	Ilg (2019); Lindemann et al. (2015)
Stückkosten	Accorsi et al. (2019); Bacchetti & Saccani (2012); Frandsen et al. (2020); Knofius et al. (2016); Celebi et al. (2008); Burkhart & Aurich (2017); Teixeira et al. (2017); Lindemann et al. (2015); Roda et al. (2014)	Formänderungspotenzial	Schlögel et al. (2021); Shepherd & Meisel (2019)
Kritikalität	Bacchetti et al. (2013); Celebi et al. (2008); Bacchetti & Saccani (2012); Frandsen et al. (2020); Moleneers et al. (2012); Schlögel et al. (2021); Shepherd & Meisel (2019)	Nachbearbeitungsaufwand	Schlögel et al. (2021); Shepherd & Meisel (2019); Lindemann et al. (2015)
Häufigkeit der benötigten Teile	Bacchetti et al. (2013); Knofius et al. (2016); Celebi et al. (2008); Frandsen et al. (2020); Boylan et al. (2008); Bacchetti & Saccani (2012); Shepherd & Meisel (2019); Roda et al. (2014)	Ausschussanteil	Ilg (2019); Lindemann et al. (2015)
Annual Dollar Usage	Frandsen et al. (2020)	Fehlmengenkosten bei Ausfall	Ilg (2019)
Stock-Out Kosten	Roda et al. (2014)	Verkaufszyklusphase	Bacchetti et al. (2013)
Lebenszyklusphase	Ilg (2019); Schlögel et al. (2021); Bacchetti & Saccani (2012); Frandsen et al. (2020)	Sicherheitsbestandskosten	Knofius et al. (2016)
Ausfallwahrscheinlichkeit	Accorsi et al. (2019); Biedermann (2008); Frandsen et al. (2020); Moleneers et al. (2012); Teixeira et al. (2017); Burkhart & Aurich (2017); Bacchetti & Saccani (2012)	Letztes Datum der Nutzung	Frandsen et al. (2020)
Nachhaltigkeit	Celebi et al. (2008); Frandsen et al. (2020)	Rechtskosten bei Nachbau	Ilg (2019)
Liefer- und Lieferantensisiko	Bacchetti & Saccani (2012); Ilg (2019); Knofius et al. (2016)	Verbleibende Nutzungsdauer	Knofius et al. (2016)
Anzahl der Zulieferer	Moleneers et al. (2012); Frandsen et al. (2020); Knofius et al. (2016); Teixeira et al. (2017)	Aufbereitungskosten 3D-Modell	Ilg (2019)
Wiederherstellbarkeit	Frandsen et al. (2020)	Verschrottungskosten	Ilg (2019)
Lagerhaltungskosten	Kaiser et al. (2003); Frandsen et al. (2020); Ilg (2019); Roda et al. (2014)	Komplexität der Fertigung	Ilg (2019)
Anzahl verbauter Teile	Braglia et al. (2004); Kaiser et al. (2003); Cakir & Canbolat (2008); Celebi et al. (2008)	Verfügbarkeitsverpflichtung der Teile	Ilg (2019)
Vorhersage	Celebi et al. (2008); Frandsen et al. (2020); Ilg (2019)	Art der Wartung	Moleneers et al. (2012)
Haltbarkeit	Frandsen et al. (2020)	Kosteneinsparungspotenzial	Schlögel et al. (2021)
Material/Werkstoff	Shepherd & Meisel (2019); Ilg (2019); Lindemann et al. (2015); Burkhart & Aurich (2017)	Frachtkosten in der Distribution	Ilg (2019)
Materialsubstitutionspotential	Ilg (2019); Cakir & Canbolat (2008); Lindemann et al. (2015); Celebi et al. (2008)	Zollkosten in der Distribution	Ilg (2019)
Kosten durch Ausfall	Accorsi et al. (2019); Celebi et al. (2008); Biedermann (2008)	Reparaturkosten	Braglia et al. (2004)
Platzbedarf im Lager	Frandsen et al. (2020)	Sicherheitsrelevanz	Braglia et al. (2004)
Produktionsmöglichkeit	Frandsen et al. (2020)	Abmessungen	Shepherd & Meisel (2019)
Verfügbarkeit von Ersatz	Cakir & Canbolat (2008); Kaiser et al. (2003); Ilg (2019)	Teileart	Shepherd & Meisel (2019)
Datenverfügbarkeit	Schlögel et al. (2021); Ilg (2019); Moleneers et al. (2012)	Bauteilbelastung	Shepherd & Meisel (2019)
Lagerbarkeit	Frandsen et al. (2020)	Bauteilermüdungstest notwendig	Shepherd & Meisel (2019)
Bauteilkomplexität	Ilg (2019); Shepherd & Meisel (2019); Lindemann et al. (2015)	Oberflächengüte	Shepherd & Meisel (2019)
Bestand (Lager)	Braglia et al. (2004); Ilg (2019); Kaiser et al. (2003)	Anzahl ähnlicher Teile im Umlauf	Lindemann et al. (2015)
Bedarfs-/Verbrauchsregelmäßigkeit	Kaiser et al. (2003); Celebi et al. (2008)	Schnittstellen zu anderen Bauteilen	Lindemann et al. (2015)
Obsoleszenzrisiko	Frandsen et al. (2020)	Geometrische Einschränkungen für den 3D-Druck	Lindemann et al. (2015)
Fertigungsqualität	Burkhart & Aurich (2017); Shepherd & Meisel (2019)	Teileverbesserungsmöglichkeit	Lindemann et al. (2015)
Gewichtsreduktionspotenzial	Ilg (2019); Shepherd & Meisel (2019)		

Abbildung 70: Merkmalliste mit Quellenangabe (eigene Darstellung)

## 8.2 Dokumentation der Versuchsdurchführung

### Versuch 1:

Material		ABS-M30			
Schichtstärke [mm]		0,33	0,254	0,178	0,127
n	K [-]	Zeit [min]	Zeit [min]	Zeit [min]	Zeit [min]
0	6,00	783	1458	2243	2767
1	9,77	668	1215	1899	2360
2	19,45	758	1285	2203	2674
3	45,12	1919	2589	4450	5101
4	116,10	3339	4123	7508	8240

Tabelle 30: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Zeitmessung (eigene Darstellung)

Material		ABS-M30			
Schichthöhe h [mm]		0,33	0,254	0,178	0,127
n	K [-]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]
0	6,00	76,63	41,15	26,75	21,68
1	9,77	66,53	36,58	23,40	18,83
2	19,45	43,43	25,62	14,94	12,31
3	45,12	12,71	9,42	5,48	4,78
4	116,10	5,41	4,38	2,41	2,19

Tabelle 31: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen der Aufbauraten (eigene Darstellung)

Material		ABS-M30			
Schichthöhe [mm]		0,33	0,254	0,178	0,127
n	K [-]	S [-]	S [-]	S [-]	S [-]
0	6,00	0,01	0,01	0,01	0,02
1	9,77	0,04	0,04	0,05	0,08
2	19,45	0,17	0,14	0,19	0,37
3	45,12	0,54	0,39	0,41	0,65
4	116,10	2,20	1,49	1,63	2,65

Tabelle 32: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen des Supportmaterialanteils (eigene Darstellung)

**Versuch 2:**

Tabelle 33: Versuch 2; Geometrische Form der verwendeten Ersatzteile (eigene Darstellung)

Material		ABS-M30			
Schichthöhe [mm]	0,330	0,254	0,178	0,127	
Teile	Zeit [min]	Zeit [min]	Zeit [min]	Zeit [min]	
1	17	25	40	49	
2	184	295	459	575	
3	114	179	303	362	
4	1 181	1 792	3 020	3 926	
5	21	29	48	59	
6	480	705	1 359	1 335	
7	169	265	486	550	
8	121	204	328	396	
9	89	138	231	284	
10	641	1 212	1 901	2 287	

Tabelle 34: Empirische Ergebnisse Versuch 2; Zeitmessung (eigene Darstellung)

Material		ABS-M30			
Schichthöhe [mm]	0,330	0,254	0,178	0,127	
Teile	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate $\vartheta$ [cm <sup>3</sup> /h]	
1	35,35	24,04	15,02	12,26	
2	40,24	25,10	16,13	12,88	
3	25,00	15,92	9,40	7,87	
4	25,28	16,66	9,89	7,61	
5	1,29	0,93	0,56	0,46	
6	39,14	26,65	13,83	14,07	
7	15,80	10,07	5,49	4,85	
8	49,85	29,57	18,39	15,23	
9	28,97	18,68	11,16	9,08	
10	65,58	34,68	22,11	18,38	

Tabelle 35: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen der Aufbauraten (eigene Darstellung)

Material	ABS-M30			
	Schichthöhe [mm]	0,330	0,254	0,178
Teile	S [-]	S [-]	S [-]	S [-]
1	0,39	0,36	0,36	0,48
2	0,19	0,19	0,18	0,26
3	0,29	0,28	0,30	0,44
4	0,34	0,28	0,35	0,50
5	1,38	1,51	1,60	1,38
6	0,17	0,14	0,19	0,28
7	0,44	0,37	0,45	0,73
8	0,13	0,10	0,11	0,14
9	0,41	0,36	0,40	0,58
10	0,04	0,04	0,04	0,07

Tabelle 36: Empirische Ergebnisse Versuch 2; Erfassen des Supportmaterialanteils (eigene Darstellung)

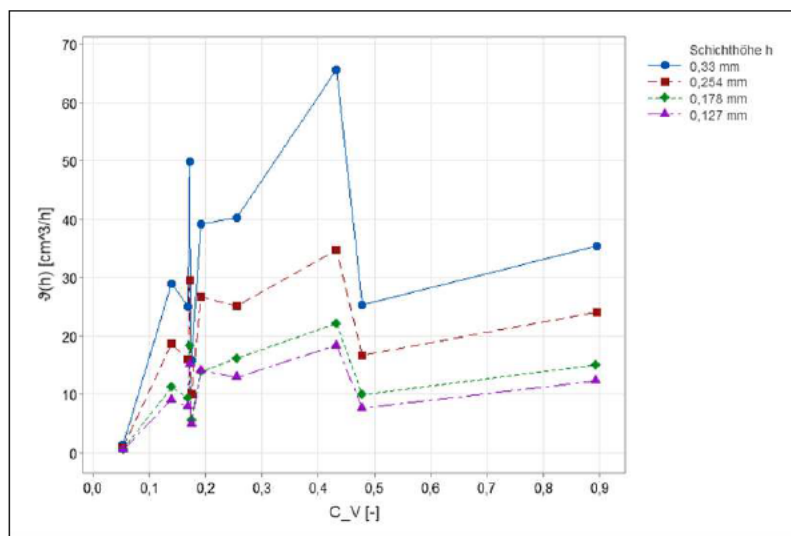


Abbildung 71: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $\vartheta$  über  $C_V$  nach  $h$  (eigene Darstellung)

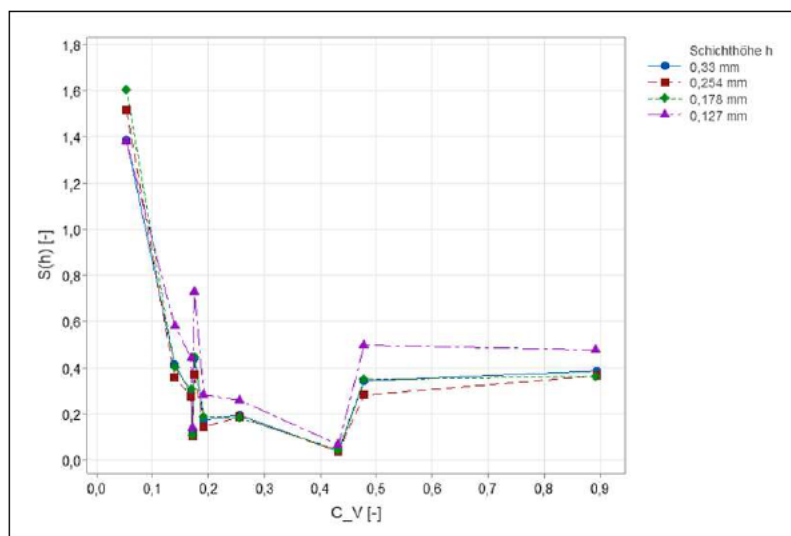


Abbildung 72: Empirische Ergebnisse Versuch 2;  $S$  über  $C_V$  nach  $h$  (eigene Darstellung)



**Versuch 3:**

Material: ABS-M30			
Schichtstärke [mm]	Aufbaurrate maximale Anordnung [cm <sup>3</sup> /h]	Aufbaurrate ein Teil [cm <sup>3</sup> /h]	Unterschied
0,33	78,9733465	76,62835249	3,06%
0,254	42,05361836	41,15226337	2,19%
0,178	27,55137183	26,74988854	3,00%
0,127	22,16066482	21,68413444	2,20%

Tabelle 37: Empirische Ergebnisse Versuch 3; Erfassen des Aufbaurates abhängig von der Anordnung im Bauraum (eigene Darstellung)

## 9 Literaturverzeichnis

### 9.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Bacchetti, Andrea; Sacconi, Nicola (2012): Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. In: *Omega* 40 (6), S. 722–737. DOI: 10.1016/j.omega.2011.06.008.
- Barkawi, Karim; Baader, Andreas; Montanus, Sven (Hg.) (2007): Erfolgreich mit After Sales Services. Geschäftsstrategien für Servicemanagement und Ersatzteillogistik (German Edition). Dordrecht: Springer. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=337273>.
- Barnsley, Michael F. (1995): Fraktale. Theorie und Praxis der deterministischen Geometrie. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akad. Verl. (Spektrum-Lehrbuch).
- Bartels, Bjoern; Pecht, Michael; Sandborn, Peter A.; Ermel, Ulrich (2012): Strategies to the prediction, mitigation and management of product obsolescence. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Bartels, Björn; Haeffs, Jean (2018): Obsoleszenzmanagement. In: Jens Reichel, Gerhard Müller und Jean Haeffs (Hg.): Betriebliche Instandhaltung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 181–197.
- Baumers, Martin; Dickens, Phill; Tuck, Chris; Hague, Richard (2016): The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. In: *Technological Forecasting and Social Change* 102, S. 193–201. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.02.015.
- Baumers, Martin; Holweg, Matthias (2019): On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. In: *Jrnl of Ops Management* 65 (8), S. 794–809. DOI: 10.1002/joom.1053.
- Biedermann, Hubert (2008): Ersatzteilmanagement. Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen. 2., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Burkhart, Mathias; Aurich, Jan C. (2015): Wissensmanagement in der additiven Fertigung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (6), S. 327–330. DOI: 10.3139/104.111340.
- Burkhart, Mathias; Aurich, Jan C. (2017): Bauteilidentifikation in der additiven Fertigung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (1-2), S. 37–40. DOI: 10.3139/104.111658.
- Cakir, Ozan; Canbolat, Mustafa S. (2008): A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. In: *Expert Systems with Applications* 35 (3), S. 1367–1378. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.041.

- Cao, H.; Folan, P. (2012): Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. In: *Production Planning & Control* 23 (8), S. 641–662. DOI: 10.1080/09537287.2011.577460.
- Cardeal, Gonçalo; Sequeira, Diogo; Mendonça, Joana; Leite, Marco; Ribeiro, Inês (2021): Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts. In: *Procedia CIRP* 98, S. 211–216. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.032.
- Carpentieri, Maria; Guglielmini, Anthony Nick; Mangione, Francesco (2007): A Life Cycle Cost Framework for the management of spare parts. In: Shozo Takata und Yasushi Umeda (Hg.): *Advances in life cycle engineering for sustainable manufacturing businesses*. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, June 11th - 13th, 2007. London: Springer, S. 473–478.
- Chen, Ye; Li, Kevin W.; Marc Kilgour, D.; Hipel, Keith W. (2008): A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis. In: *Computers & Operations Research* 35 (3), S. 776–796. DOI: 10.1016/j.cor.2006.03.024.
- Chu, Ching-Wu; Liang, Gin-Shuh; Liao, Chien-Tseng (2008): Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. In: *Computers & Industrial Engineering* 55 (4), S. 841–851. DOI: 10.1016/j.cie.2008.03.006.
- Dombrowski, Uwe; Horatzek, Sascha; Wrehde, Johannes (2005a): Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement. Teil I: Zukunftsgestaltung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (3), S. 125–129. DOI: 10.3139/104.100875.
- Dombrowski, Uwe; Horatzek, Sascha; Wrehde, Johannes (2005b): Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement. Teil II: Vergangenheitsbewältigung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (4), S. 197–201. DOI: 10.3139/104.100887.
- Dombrowski, Uwe; Malorny, Constantin; Engel, Christian (2014): Erfolgreich im Ersatzteilmanagement durch Anwendung additiver Fertigungsverfahren. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (9), S. 621–624. DOI: 10.3139/104.111209.
- Dombrowski, Uwe; Malorny, Constantin; Kolshorn, Ralf; Blöcker, Thorsten (2020): Teiledienst. In: Uwe Dombrowski, Simon Fochler und Constantin Malorny (Hg.): *After Sales Service. Zukunftsfähig und prozessorientiert gestalten*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 35–124.
- Dombrowski, Uwe; Schulze, Sven (2008): Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement — Neue Herausforderungen durch innovationsstarke

- Bauteile in langlebigen Primärprodukten. In: Peter Nyhuis (Hg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 439–462.
- Dombrowski, Uwe; Weckenborg, Sebastian; Schulze, Sven (2009): Outsourcing von Elektronikkomponenten in der Nachserienversorgung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (11), S. 954–959. DOI: 10.3139/104.110210.
- Duchessi, Peter; Tayi, Giri Kumar; Levy, Joshua B. (1988): A Conceptual Approach for Managing of Spare Parts. In: *Int Jnl of Phys Dist & Mat Mgt* 18 (5), S. 8–15. DOI: 10.1108/eb014700.
- Fastermann, Petra (2014): 3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert. Berlin: Springer Vieweg (Technik im Fokus).
- Feldmann, Carsten (2016): 3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit. Entscheidungsunterstützung für Unternehmen. Wiesbaden: Springer Gabler (SpringerLink Bücher). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz47774494xcov.htm>.
- Flores, Benito E.; Whybark, D.Clay (1989): Implementing multiple criteria ABC analysis. In: *Engineering Costs and Production Economics* 15, S. 191–195. DOI: 10.1016/0167-188X(89)90124-9.
- Frandsen, Casper Selmer; Nielsen, Martin Mathias; Chaudhuri, Atanu; Jayaram, Jayanth; Govindan, Kannan (2020): In search for classification and selection of spare parts suitable for additive manufacturing: a literature review. In: *International Journal of Production Research* 58 (4), S. 970–996. DOI: 10.1080/00207543.2019.1605226.
- Freichel, Stephan (2017): Delivery (time) strategies in the Independent Automotive Aftermarket. In: *Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic*.
- Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Schwarz, Alexander (2019): Produktgestaltung für die Additive Fertigung. München: Hanser; Ciando. Online verfügbar unter [http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok\\_id/2737546](http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/2737546).
- Geissbauer, Reinhard; Griesmeier, Alexander; Feldmann, Sebastian; Toepert, Matthias (2012): Serviceinnovation. Potenziale industrieller Dienstleistungen erkennen und erfolgreich implementieren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1614355>.
- Gelders, Ludo F.; van Looy, Paul M. (1978): An Inventory Policy for Slow and Fast Movers in a Petrochemical Plant: A Case Study. In: *Journal of the Operational Research Society* 29 (9), S. 867–874. DOI: 10.1057/jors.1978.189.

- Gupta, Yash P. (1983): Life Cycle Cost Models and Associated Uncertainties. In: J. K. Skwirzynski (Hg.): *Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing*. Berlin, Heidelberg: Springer (NATO ASI Series, Series F, 3), S. 535–549.
- Heiserich, Otto-Ernst (2011): *Logistik. Eine praxisorientierte Einführung*. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag (SpringerLink Bücher).
- Hevner; March; Park; Ram (2004): Design Science in Information Systems Research. In: *MIS Quarterly* 28 (1), S. 75. DOI: 10.2307/25148625.
- Hofmann, Hansgeorg; Spindler, Jürgen (2019): *Aktuelle Werkstoffe. Neue Materialien für innovative Produkte*. Berlin: Heidelberg.
- Huiskonen, Janne (2001): Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. In: *International Journal of Production Economics* 71 (1-3), S. 125–133. DOI: 10.1016/S0925-5273(00)00112-2.
- Ilg, Julian (2019): *Systematische Eignungsanalyse zum Einsatz additiver Fertigungsverfahren. Anwendung am Beispiel der Medizintechnik*. Wiesbaden: Springer Gabler (SpringerLink Bücher).
- Jiménez, Mariano; Romero, Luis; Domínguez, Iris A.; Del Espinosa, María Mar; Domínguez, Manuel (2019): Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. In: *Complexity* 2019, S. 1–30. DOI: 10.1155/2019/9656938.
- Jovane, F.; Alting, L.; Armillotta, A.; Eversheim, W.; Feldmann, K.; Seliger, G.; Roth, N. (1993): A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly. In: *CIRP Annals* 42 (2), S. 651–658. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62530-X.
- Kadir, Aini Zuhra Abdul; Yusof, Yusri; Wahab, Md Saidin (2020): Additive manufacturing cost estimation models—a classification review. In: *Int J Adv Manuf Technol* 107 (9-10), S. 4033–4053. DOI: 10.1007/s00170-020-05262-5.
- Khajavi, Siavash H.; Partanen, Jouni; Holmström, Jan (2014): Additive manufacturing in the spare parts supply chain. In: *Computers in Industry* 65 (1), S. 50–63. DOI: 10.1016/j.compind.2013.07.008.
- Klahn, C.; Mebolt, M.; Fontana, F.; Leutenecker-Twelsiek, B; Jansen, J. (2018): *Entwicklung und Konstruktion für die additive Fertigung. Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten*. Würzburg: Vogel Business Media. Online verfügbar unter <https://www.vogel-fachbuch.de/media/pdf/4d/d7/2d/sample-9783834333957.pdf>.
- Klostermann, Lars; Günnel, Stephanie (2012): Competitive terms of trade for European automotive suppliers – Overcoming traditional strategies in the

independent aftermarket. In: *J Revenue Pricing Manag* 11 (2), S. 127–136. DOI: 10.1057/rpm.2010.31.

Klug, Florian (2018): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. 2. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1545761>.

Knofius, Nils; van der Heijden, Matthieu C.; Zijm, W.H.M. (2016): Selecting parts for additive manufacturing in service logistics. In: *JMTM* 27 (7), S. 915–931. DOI: 10.1108/JMTM-02-2016-0025.

Koschorrek, Ralph (2007): Systematisches Konzipieren mittels Ähnlichkeitsmethoden am Beispiel von PKW-Karosserien. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2007. Berlin: Logos-Verl. (Bericht / Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, 72).

Kriwet, A.; Zussman, E.; Seliger, G. (1995): Systematic integration of design-for-recycling into product design. In: *International Journal of Production Economics* 38 (1), S. 15–22. DOI: 10.1016/0925-5273(95)99062-A.

Kuhlang, P.; Edtmayr, T.; Sihm, W. (2011): Methodical approach to increase productivity and reduce lead time in assembly and production-logistic processes. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (1), S. 24–32. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.02.001.

Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian (2017): Additive Manufacturing Quantifiziert. Visionäre Anwendungen und Stand der Technik. Berlin: Springer Vieweg.

Lachmayer, Roland; Rettschlag, Katharina; Kaierle, Stefan (2021): Konstruktion für die Additive Fertigung 2020. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Levitt, T. (1965): Exploit the product life cycle. In: *Harvard Business Review*. Online verfügbar unter [https://repository.dinus.ac.id/content/download/12/2058/62676/exploit\\_the\\_product\\_life\\_cycle.pdf](https://repository.dinus.ac.id/content/download/12/2058/62676/exploit_the_product_life_cycle.pdf).

Lindemann, Christian; Reiher, Thomas; Jahnke, Ulrich; Koch, Rainer (2015): Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (2), S. 216–227. DOI: 10.1108/RPJ-12-2014-0179.

Lindermann, C.; Jahnke, U.; Moi, M.; Koch, R. (2012): Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. Unter Mitarbeit von The University of Texas at Austin.



- Meers, Stephan; Prüssing, Patrick; Nickel, Rouven (2011): Nutzung von Lagerbeständen für die Überbrückung der Reaktionszeit zur Nutzung von Kapazitätsflexibilität. In: *Ij notrev*. DOI: 10.2195/LJ\_Not\_Ref\_Meers\_042011.
- Ng, Wan Lung (2007): A simple classifier for multiple criteria ABC analysis. In: *European Journal of Operational Research* 177 (1), S. 344–353. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.11.018.
- Nyhuis, Peter (Hg.) (2008): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Öner, K. B.; Kiesmuller, G. P.; Houtum, van G. J. A. N. (2007): Life cycle costs measurement of complex systems manufactured by an engineer-to-order company. In: *BETA publicatie* (209). Online verfügbar unter <https://research.tue.nl/files/2484974/627209.pdf>.
- Partovi, Fariborz Y.; Anandarajan, Murugan (2002): Classifying inventory using an artificial neural network approach. In: *Computers & Industrial Engineering* 41 (4), S. 389–404. DOI: 10.1016/S0360-8352(01)00064-X.
- Pawellek, Günther (2016): Ersatzteillogistik. In: Günther Pawellek (Hg.): Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik. Vorgehensweisen, Methoden, Tools. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 289–370.
- Peppers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems* 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- Poppe, Erik; Longmuß, Jörg (2019): Geplante Obsoleszenz. Erscheinungsort nicht ermittelbar: transcript Verlag.
- Ramanathan, Ramakrishnan (2006): ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. In: *Computers & Operations Research* 33 (3), S. 695–700. DOI: 10.1016/j.cor.2004.07.014.
- Reddy Bathula, Ir. Sreenivas (2017): 3D Printing for Foot. In: *MOJPB* 5 (6). DOI: 10.15406/mojpb.2017.05.00176.
- Roda, Irene; Macchi, Marco; Fumagalli, Luca; Viveros, Pablo (2014): A review of multi-criteria classification of spare parts. In: *JMTM* 25 (4), S. 528–549. DOI: 10.1108/JMTM-04-2013-0038.
- Rudolph, Jan-Peer (2018): Cloudbasierte Potentialerschließung in der additiven Fertigung. Dissertation. Unter Mitarbeit von Claus Emmelmann und Wolfgang Kersten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Light Engineering für die Praxis).

- Schlingmann, Tina (2022): Additive in Rail. 3D-Druck mit flammenfesten Kunststoffen. Austrian 3D-Printing Forum. EOS. SUCCUS GMBH. Wien, 07.04.2022. Online verfügbar unter <https://www.3d-printing-forum.at/home>.
- Schlögel, Santina; Gutsche, Katja; Kölle, Oliver (2021): Additive Fertigung in der Ersatzteillogistik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (7-8), S. 473–477. DOI: 10.1515/zwf-2021-0120.
- Schnieder, Lars (Hg.) (2018): Strategisches Management von Fahrzeugflotten im öffentlichen Personenverkehr. Begriffe, Ziele, Aufgaben, Methoden. Springer-Verlag GmbH. 1. Auflage 2018. Berlin: Springer Berlin (VDI-Buch).
- Schuh, Günther; Stich, Volker (Hg.) (2012): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2nd ed. Dordrecht: Springer (VDI-Buch Ser, v.6).
- Schuh, Günther; Stich, Volker; Wienholdt, Henrik (2012): Ersatzteillogistik. In: Günther Schuh und Volker Stich (Hg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2nd ed. Dordrecht: Springer (VDI-Buch Ser, v.6), S. 165–207.
- Sendler, Ulrich (2009): Das PLM-Kompendium. Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Xpert.press).
- Shepherd, Jacob J.; Meisel, Nicholas A. (2019): Large-Scale Identification of parts suitable for additive manufacturing. An industry perspective. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (30).
- Simkin, Zach; Wang, Annie (2014): Cost-Benefit Analyses for Final Production Parts. In: *Wohlers Report*. Online verfügbar unter [http://senvol.com/wp-content/uploads/2014/06/senvol\\_2014-wohlers-report.pdf](http://senvol.com/wp-content/uploads/2014/06/senvol_2014-wohlers-report.pdf).
- Strunz, Matthias (2012): Instandhaltung. Grundlagen - Strategien - Werkstätten. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Syntetos, A. A.; Keyes, M.; Babai, M. Z. (2009): Demand categorisation in a European spare parts logistics network. In: *Int Jrrl of Op & Prod Mngemnt* 29 (3), S. 292–316. DOI: 10.1108/01443570910939005.
- Wagner, Stephan M.; Jönke, Ruben; Eisingerich, Andreas B. (2012): A Strategic Framework for Spare Parts Logistics. In: *California Management Review* 54 (4), S. 69–92. DOI: 10.1525/cmr.2012.54.4.69.
- Wannenwetsch, Helmut (Hg.) (2008): Intensivtraining Produktion, Einkauf, Logistik und Dienstleistung. Mit Aufgaben und Lösungen. Wiesbaden: Gabler (Springer eBook Collection Business and Economics).
- Zeitler, Herbert; Pagon, Dušan (2000): Fraktale Geometrie. Eine Einführung ; für Studienanfänger, Studierende des Lehramtes, Lehrer und Schüler. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.

Zhou, Peng; Fan, Liwei (2007): A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization. In: *European Journal of Operational Research* 182 (3), S. 1488–1491. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.08.052.

## 9.2 Normen

DIN 14001:2015-11 (2016): Umweltmanagementsysteme. Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 17024:2021-09 (2021): Additive Fertigung – Prozessanforderungen und Qualifizierung. Teil 1: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Laser in der Luft und Raumfahrt. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 24420-1:1976-09 (1976): Ersatzteillisten. Teil 1: Allgemeines. Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH.

DIN 31051:1985-01 (1985): Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 31051:2019-06 (2019): Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 66001-1:1983-12 (1983): Informationsverarbeitung. Teil 1: Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 8580:2020-01 (2020): Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 13306:2018-02 (2018): Instandhaltung. Begriffe der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 45545-1:2013-08 (2013): Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen. Teil 1: Allgemeine Regeln. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 62402:2008-01 (2018): Anleitung zum Obsoleszenzmanagement. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 9241-12:2000-8 (2000): Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 12: Informationsdarstellung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 9241-14:2000-14 (2000): Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 14: Dialogführung mittels Menüs. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 2882:2018-05 (2018): Obsoleszenzmanagement aus Sicht von Nutzern und Betreibern. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 3405:2014-12 (2014): Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDMA 24903:2017-12 (2017): Obsoleszenzmanagement. Informationsaustausch zu Änderungen und Abkündigungen von Produkten und Einheiten. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

### 9.3 Internetquellen

3faktor (2022): Sofortangebot 3D-CAD-Modell. Online verfügbar unter <https://3faktor.com/3d-druck-service/>, zuletzt geprüft am 31.04.2022.

BMF (2022): Nutzungsdauer von Sachanlagen und immateriellen Anlagenwerten. Online verfügbar unter <https://www.bmbwf.gv.at/>, zuletzt geprüft am 16.03.2022.

Duden (2022): Bedeutung Obsoleszenz. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Obsoleszenz>, zuletzt geprüft am 14.01.2022.

Eurostat (2022): Auswertung Data Explorer Preise Elektrizität für Nichthaushaltskunden. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu>, zuletzt geprüft am 12.03.2022.

Filamentworld (2022): Onlinehandel für die additive Fertigung. Online verfügbar unter <https://www.filamentworld.de/>, zuletzt geprüft am 12.03.2022.

Statista Zinsentwicklung (2022): Kapitalmarktzinsentwicklung in Deutschland. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/>, zuletzt geprüft am 12.03.2022.

Stepstone (2022a): Lohn Produktionsmitarbeiter. Online verfügbar unter <https://www.stepstone.at/gehalt/Fertigung-Produktion/>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Stepstone (2022b): Gehalt Konstrukteur. Online verfügbar unter <https://www.stepstone.at/gehalt/Konstrukteur-in-Maschinenbau.html>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Stratasys Printer Catalog (2022): FDM F123 Series. Online verfügbar unter <https://www.stratasys.com/>, zuletzt geprüft am 16.03.2022.

### 9.4 Eigene unveröffentlichte Quellen

Bereichsleiter: Forschungsinstitut für Additive Produktionstechnologien, persönliche Korrespondenz, Wien, 11.11.2021.

Gruppenleiter: Forschungsinstitut für Visual Computing, persönliche Korrespondenz, Wien, 23.09.2021.

Senior Associate: Internationale Anwaltskanzlei, persönliche Korrespondenz, Wien, 12.05.2022.

#### **Expertenworkshop Merkmale:**

- Projekt Manager AM und Supply Chain Development: Nationaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 02.11.2021.
- Ausbildungsleiter Fertigungstechnik: Lokaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 02.11.2021.

#### **Expertenworkshop Anforderungen:**

- Projekt Manager AM und Supply Chain Development: Nationaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 25.01.2022.
- Ausbildungsleiter Fertigungstechnik: Lokaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 25.01.2022.

#### **Expertenworkshop Ersatzteilbeschaffung:**

- Projekt Manager AM und Supply Chain Development: Nationaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 11.11.2021.
- Ausbildungsleiter Fertigungstechnik: Lokaler Schienenfahrzeugbetreiber, Wien, 11.11.2021.

## **9.5 Fremde unveröffentlichte Quellen**

Anwendungsunternehmen (2022): Angebot für Steckdosenklappe von AM-Dienstleister. Unternehmensinterne Dokumentation. Zugriffen: 09.05.2022.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Angewandte DSRM .....	3
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 3: Einteilung von Ersatzteilen .....	5
Abbildung 4: Zielkonflikte der Ersatzteillogistik.....	7
Abbildung 5: Optimierungsproblem der Ersatzteillogistik.....	7
Abbildung 6: Schematische ABC-Analyse .....	9
Abbildung 7: Ablauf des AM-Prozesses .....	17
Abbildung 8: Überblick über die wichtigsten AM-Verfahren .....	19
Abbildung 9: Schematische Funktionsweise des FDM-Verfahrens .....	20
Abbildung 10: Menger-Schwamm nach n Iterationsstufen .....	21
Abbildung 11: AM-Kosten bei der internen Nachfertigung durch Anlagenbetreiber..	22
Abbildung 12: Aufbau der Literaturrecherche .....	27
Abbildung 13: Modell eines lebenszyklusorientierten EM.....	31
Abbildung 14: Schematische Bedarfszyklen entlang des Ersatzteilebenszyklus .....	32
Abbildung 15: Produktlebenszyklusmodell von Ersatzteilen .....	34
Abbildung 16: Anlagen- und Komponentenlebenszyklusmodell nach der Verfügbarkeit.....	34
Abbildung 17: Lebenszyklusbetrachtung als Grundlage für das OM .....	35
Abbildung 18: Generisches Lebenszyklusmodell für Systeme und Komponenten ...	36
Abbildung 19: Ablauf der Literaturerhebung von Ersatzteilmerkmalen .....	43
Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der aus Sicht der in der Literatur wichtigsten Merkmale.....	45
Abbildung 21: Lebenszyklus eines Schienenfahrzeuges.....	49
Abbildung 22: Lebenszyklusmodell eines Ersatzteiles .....	51
Abbildung 23: Sprechende Materialnummer des nationalen Schienenfahrzeugbetreibers.....	57
Abbildung 24: Herkunft der Daten zur Verknüpfung in einer Datenbank basierend auf den Erkenntnissen der beiden betrachteten Unternehmen .....	57
Abbildung 25: Bewertungsbereiche zur Potenzialbewertung.....	60
Abbildung 26: Aufbau des teilautomatisierten Bewertungsmodells .....	61
Abbildung 27: Auszug des schematischen Datenbankmodells in Alteryx.....	62
Abbildung 28: Programmablaufdiagramm entsprechend DIN 66001 zur automatisierten Bewertung und Rangfolgenbildung .....	65
Abbildung 29: Programmablaufdiagramm der manuellen Teilebewertung entsprechend DIN 66001 .....	67
Abbildung 30: Programmablaufdiagramm zur Darstellung der gesamten Bereichsbewertungen nach DIN 66001 .....	68
Abbildung 31: Aktueller Identifikationsprozess für AM aus Sicht der AM-Abteilung des Anwendungsunternehmens.....	73



Abbildung 32: Produktdaten <i>Stratasys F170</i> .....	75
Abbildung 33: Empirische Ergebnisse Versuch 1; $\vartheta$ über $K(n)$ nach $h$ .....	77
Abbildung 34: Empirische Ergebnisse Versuch 1; $S$ über $K(n)$ nach $h$ .....	77
Abbildung 35: Empirische Ergebnisse Versuch 2; $\vartheta$ über $K(n)$ nach $h$ .....	79
Abbildung 36: Vergleich Versuch 1 und 2; $\vartheta(0,33)$ über $K(n)$ .....	79
Abbildung 37: Empirische Ergebnisse Versuch 2; $S$ über $K(n)$ nach $h$ .....	80
Abbildung 38: Vergleich Versuch 1 und 2; $S(0,33)$ über $K(n)$ .....	80
Abbildung 39: Empirische Ergebnisse Versuch 2; $\vartheta$ über $C\_O$ nach $h$ .....	81
Abbildung 40: Empirische Ergebnisse Versuch 2; $S$ über $C\_O$ nach $h$ .....	82
Abbildung 41: Aufbau Versuchsreihe 3; Mehrfachanordnung im Bauraum .....	82
Abbildung 42: Empirische Ergebnisse Versuch 3; Zeitgewinn durch maximale Bauraumanordnung.....	83
Abbildung 43: Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland.....	84
Abbildung 44: Strompreisentwicklung für die Industrie .....	85
Abbildung 45: Polynomiale Regression von $S$ über $C\_O$ für $h = 0,178$ mm .....	86
Abbildung 46: Datenverknüpfung mit realen Daten für den Use Case .....	89
Abbildung 47: Aufbau der R-Shiny-Applikation.....	90
Abbildung 48: Benutzeroberfläche der <i>Automatisierten Bewertung</i> .....	92
Abbildung 49: Benutzeroberfläche <i>Manuelle Bewertung</i> .....	93
Abbildung 50: Benutzeroberfläche <i>Gesamtbewertung und Kostenanalyse</i> .....	94
Abbildung 51: Benutzeroberfläche <i>Szenario Editor</i> .....	95
Abbildung 52: Auswahl der Bereichsgewichtungen und Festlegung von Grenzwerten im Fallbeispiel.....	95
Abbildung 53: Ergebnis der <i>Automatisierten Bewertung</i> in Form der Rangfolge .....	96
Abbildung 54: <i>Potenzialbewertung</i> (links) und <i>Bewertung im Detail</i> (rechts) für Teil 12123XXXX.....	98
Abbildung 55: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. Print-on-Demand .....	99
Abbildung 56: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion.....	100
Abbildung 57: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	101
Abbildung 58: Kostenvergleich Teil 12123XXXX: Interne vs. externe Fertigung ....	101
Abbildung 59: Additiv gefertigtes Teil 12123XXXX .....	102
Abbildung 60: <i>Potenzialbewertung</i> (links) und <i>Bewertung im Detail</i> (rechts) für Teil 12587XXXX.....	103
Abbildung 61: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. Print-on-Demand .....	105
Abbildung 62: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: JIT vs. AM mit Lagerbestandsreduktion.....	106

Abbildung 63: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	107
Abbildung 64: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	107
Abbildung 65: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Beschaffungskosten vs. AM-Fertigungskosten .....	108
Abbildung 66: Kostenvergleich Teil 12587XXXX: Interne vs. externe Fertigung ....	109
Abbildung 67: Additiv gefertigtes Teil 12587XXXX .....	109
Abbildung 68: Prozessverbesserung des AM-Identifikationsprozesses beim Anwendungsunternehmen durch das Potenzialbewertungsmodell .	110
Abbildung 69: Einteilung amorpher Materialien nach Preis und Hitzebeständigkeit	112
Abbildung 70: Merkmalliste mit Quellenangabe.....	118
Abbildung 71: Empirische Ergebnisse Versuch 2; $\vartheta$ über C_V nach h .....	121
Abbildung 72: Empirische Ergebnisse Versuch 2; S über C_V nach h.....	121

# 11 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Lagerreichweite.....	8
Formel 2: Berechnung des Variationskoeffizienten .....	10
Formel 3: Berechnung der geometrischen Ähnlichkeitskennzahl .....	21
Formel 4: Berechnung der Designkosten .....	23
Formel 5: Berechnung der Vorbereitungskosten .....	23
Formel 6: Berechnung der Fertigungskosten.....	23
Formel 7: Berechnung der Nachbereitungskosten .....	24
Formel 8: Berechnung des Maschinenkostensatzes .....	24
Formel 9: Berechnung der Fertigungszeit .....	24
Formel 10: Berechnung der Gesamtkosten .....	25
Formel 11: Berechnung der Bereichsbewertung eines Ersatzteils .....	63
Formel 12: Berechnung des Ersatzteilscores eines Teils .....	64
Formel 13: Berechnung der manuellen Bereichsbewertung für ein Ersatzteil .....	66
Formel 14: Berechnung der kombinierten Bereichsbewertung eines Ersatzteiles ....	67
Formel 15: Berechnung der Stückkosten eines Ersatzteiles.....	70
Formel 16: Berechnung der Stückkosten der konventionellen Beschaffung.....	70
Formel 17: Berechnung der durchschnittlichen Stückkosten der Endbevorratung ...	70
Formel 18: Berechnung des Einsparungspotenzials .....	71
Formel 19: Berechnung der jährlichen Anlagennutzungsdauer.....	84
Formel 20: Berechnung der jährlichen AFA.....	84
Formel 21: Berechnung der kalkulatorischen Zinsen.....	84

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schritte der DSRM .....	3
Tabelle 2: Einteilung in XYZ-Artikel .....	10
Tabelle 3: Methodik der Literaturanalyse.....	28
Tabelle 4: Wissenschaftliche Modelle zur LC-Betrachtung im EM und OM.....	30
Tabelle 5: Wissenschaftliche Ansätze zur AM-Bewertung von Bauteilen .....	38
Tabelle 6: Merkmalliste.....	44
Tabelle 7: Kriterien zur wirtschaftlichen Potenzialabschätzung .....	46
Tabelle 8: Kriterien zur technischen Potenzialabschätzung .....	46
Tabelle 9: Anforderungen aus der Praxis an die Realisierung des Bewertungsmodells .....	58
Tabelle 10: Merkmale zur Potenzialbewertung von Ersatzteilen .....	59
Tabelle 11: Bauteiloptimierungsmöglichkeiten durch AM .....	59
Tabelle 12: Übersichtsdarstellung der <i>Automatisierten Bewertung</i> .....	63
Tabelle 13: Übersichtsdarstellung der manuellen Bewertung.....	66
Tabelle 14: Ersatzteilspektrum im Fallbeispiel.....	74
Tabelle 15: Versuch 2; verwendete Ersatzteile.....	78
Tabelle 16: Filament-Preise gängiger Kunststoffe .....	85
Tabelle 17: Regressionsgleichungen zur Schätzung von $S$ .....	87
Tabelle 18: Durchschnittliche Aufbaurate $\vartheta$ .....	87
Tabelle 19: Leistungsverbräuche des <i>F170</i> -Druckers .....	87
Tabelle 20: Modellparameter des Fallbeispiels.....	88
Tabelle 21: <i>Manuelle Bewertung</i> Teil 12123XXXX.....	97
Tabelle 22: Beispiel 1 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. <i>Print-on-Demand</i> .....	99
Tabelle 23: Beispiel 1 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	100
Tabelle 24: Beispiel 1 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	101
Tabelle 25: Manuelle Bewertung Teil 12587XXXX.....	103
Tabelle 26: Beispiel 2 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Aktuelle Ersatzteilversorgung vs. <i>Print-on-Demand</i> .....	104
Tabelle 27: Beispiel 2 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : JIT-Beschaffung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	105
Tabelle 28: Beispiel 2 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Endbevorratung vs. AM mit Lagerbestandsreduktion .....	106
Tabelle 29: Beispiel 2 – Einstellungen <i>Szenario Editor</i> : Beschaffungskosten vs. AM-Fertigungskosten.....	108
Tabelle 30: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Zeitmessung.....	119
Tabelle 31: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen der Aufbauraten .....	119

Tabelle 32: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen des Supportmaterialanteils .....	119
Tabelle 33: Versuch 2; Geometrische Form der verwendeten Ersatzteile .....	120
Tabelle 34: Empirische Ergebnisse Versuch 2; Zeitmessung .....	120
Tabelle 35: Empirische Ergebnisse Versuch 1; Erfassen der Aufbauraten .....	120
Tabelle 36: Empirische Ergebnisse Versuch 2; Erfassen des Supportmaterialanteils .....	121
Tabelle 37: Empirische Ergebnisse Versuch 3; Erfassen des Aufbaurates abhängig von der Anordnung im Bauraum .....	122

## 13 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
€	Euro
a	Jahr
AFA	Abschreibung für Anlagen
AHP	Analytic Hierarchy Process
AM	Additive Fertigung
BJ	Binder Jetting
BOL	Begin of Life
BTM	Bauteilanschlussmarkt
CAD	Computer-Aided Design
CM	konventionelle Fertigung
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
d	Tag
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSP	Design-Science-Paradigma
DSRM	Design-Science-Forschungsmethodik
EBM	Elektronenstrahlschmelzen
EDO	End of Delivery Obligation
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EM	Ersatzteilmanagement
EOA	End of Availability
EOL	End of Life
EOP	End of Production
EOS	End of Service
EOU	End of Use
ERP	Enterprise Resource Planning
ET	Ersatzteil
FDM	Fused Deposition Modelling
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GW	Grenzwert
GW	Grenzwert
h	Stunde
IAM	unabhängiger Ersatzteilmarkt
inkl.	inklusive
JIT	Just-in-Time



KI	Künstliche Intelligenz
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
kWh	Kilowattstunde
LC	Life Cycle
LCC	Lebenszykluskostenrechnung
LOC	letzter Bestellauftrag
MJ	Material Jetting
∅	Durchschnitt
o. S.	ohne Seitenangabe
OCM	Originalkomponentenhersteller
OEM	Erstausrüster
OES	Erstausrüstermarkt
OM	Obsoleszenzmanagement
PJ	Photopolymere Jetting
PP	Primärprodukt
rF	Relative Feuchtigkeit der Luft
SF	Schienenfahrzeug
SFB	Schienenfahrzeugbetreiber
SL	Stereolithografie
SLM	Laserschmelzen
SLS	Lasersintern
SOP	Start of Production
Stk.	Stück
STL	Standard Triangle Language
T	Temperatur
TOM	Trade-off-Methodenmatrix
TZ	Technische Zeichnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
vs.	versus

## 14 Curriculum Vitae

### Persönliche Daten

---

- Name Roland Segner, BSc
- Nationalität Österreich

### Beruflicher Werdegang

---

- 10/2020 – heute Werkstudent, Geschäftsbereich Logistik und Supply Chain Management, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien
- 2013 – 2020 Ferialmitarbeiter, Bereich Finanz-, Rechnungswesen, Controlling & Audit, Lenzing AG, Lenzing

### Akademische Laufbahn

---

- 03/2020 – 06/2022 Masterstudium, Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Technische Universität Wien, Österreich
- 10/2016 – 01/2020 Bachelorstudium, Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau, Technische Universität Wien, Österreich