



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Automatische Klassifikation von Bauteilen im Ersatzteilmanagement unter Berücksichtigung additiver Fertigungstechnologien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

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

Proj.-Ass. Dipl.-Ing. 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

Lukas Schmidt, BSc

01227537 (066.482)

Franzengasse 7-9/1/4

1050 Wien

Wien, im Juni 2020

Lukas Schmidt



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 2020

Lukas Schmidt

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium an der Technischen Universität Wien ermöglicht haben. Durch Ihre Unterstützung konnte ich meinem Wunsch des Studierens nachgehen und auch in schwierigen Phasen dieses Lebensabschnittes haben Sie mir immer Mut zugesprochen und mir dabei geholfen, meine Ziele konsequent zu verfolgen.

Großer Dank gilt außerdem meinem Diplomarbeitsbetreuer, Herrn Dipl. Ing. Karl Ott, der sich stets Zeit dafür genommen hat, mir bei Fragen und aufgetretenen Problemen mit guten Ratschlägen und Ideen weiterzuhelfen. Im Zuge zahlreicher Treffen hatte ich immer die Möglichkeit, Unterstützung bezüglich meiner Anliegen von ihm zu erhalten.

Weiters gilt mein Dank allen Interviewpartnern, die mir bei fachlichen Fragen mit wertvollen Informationen und Erfahrungen aus der Praxis weitergeholfen haben. Durch Sie war es mir möglich, verschiedene Themenbereiche der Diplomarbeit aus mehreren Blickwinkeln zu betrachten und neue Lösungswege einzuschlagen.

Letztendlich möchte ich mich bei allen weiteren Personen bedanken, die mich während des Verfassens meiner Diplomarbeit sowohl fachlich als auch persönlich unterstützt haben und sich immer Zeit für interessante Diskussionen und hilfreiche Gespräche genommen haben.

Kurzfassung

Industrieunternehmen stehen der Herausforderung einer langjährigen Ersatzteilversorgung nach Abschluss der Serienfertigung gegenüber. Diese Aufgabe ist meist gesetzlich bzw. vertraglich verpflichtend und mit erheblichem Aufwand verbunden. Zur Erfüllung dieser Aufgabe haben Unternehmen die Möglichkeit, aus verschiedenen Bereitstellungsstrategien zu wählen, um den anfallenden Bedarf an individuellen Ersatzteilen in der Nachserienphase zu decken.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Identifikation geeigneter ersatzteilbezogener Klassifikationsmerkmale, um Maschinen- und Anlagenbauunternehmen eine Möglichkeit zu bieten, aus Herstellersicht beurteilen zu können, welche Strategie sich dazu am besten empfiehlt. Im Zuge des Identifikationsprozesses findet die Eignung der additiven Fertigung zur Ersatzteilbereitstellung zusätzlich Berücksichtigung, weshalb metallische Bauteile im Fokus stehen.

Einleitend werden die einzelnen Nachserienversorgungsstrategien näher erklärt und Möglichkeiten der Ersatzteilklassifikation aufgezeigt. Außerdem wird die additive Fertigung nach dem Verfahren des selektiven Laserschmelzens (SLM-Verfahren) genauer beleuchtet, da dieses speziell für metallische Werkstoffe relevant ist. Anhand der erlangten Erkenntnisse wurde eine Demoversion eines Ersatzteil-Klassifizierungstools mittels VBA (Visual Basic for Applications) in Excel programmiert, das dem Anwender eine automatische Ersatzteilklassifikation ermöglicht.

Anschließend erfolgte eine empirische Untersuchung zur Evaluierung des erstellten Modells. Dazu wurden neben der Auswertung von Datenblättern verschiedener 3D-Druckermodelle auch Interviews mit Experten im Bereich des Ersatzteilmanagements und der additiven Fertigung geführt. Die Interviews dienten sowohl der Erlangung von Erkenntnissen bezüglich marktseitiger als auch technologieseitiger Rahmenbedingungen. Aus diesem Vorgehen wurden nachfolgend Weiterentwicklungspotentiale abgeleitet und gemeinsam mit den erlangten Erkenntnissen (z.B. Experteninformationen) in das bestehende Demo-Tool implementiert.

Als Ergebnis der Arbeit geht ein Excel-Tool hervor, das Unternehmen als Unterstützung bei der Strategiefindung unter Berücksichtigung der additiven Fertigung dient und darstellt, welche Eingangsdaten für eine umfassende Analyse notwendig sind.

Die Erkenntnisse zeigen, dass die Anforderungen an die entwickelte Anwendung sehr stark vom betrachteten Unternehmensbereich abhängig sind und ein individuelles Setup des Tools vor Ersteininsatz sowie eine kontinuierliche Datenpflege unbedingt notwendig sind. Herausforderungen, die hiermit in Zusammenhang stehen, werden erläutert und ein Ausblick auf zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten des Analyseprogramms gegeben.

Abstract

Industrial companies face considerable challenges in ensuring long-term supply of individual spare parts beyond completion of series production. This is often legally required under contractual arrangements and associated with significant effort. To accomplish this task, companies have the option to choose from a variety of delivery strategies to meet the need for individual spare parts in the post-production phase.

The present work deals with the identification of suitable spare-part-related classification features in order for machinery and plant construction companies to judge, from a manufacturer's perspective, which strategy is best. In the course of the identification process, the suitability of additive manufacturing for the provision of spare parts is also taken into account. Therefore, the focus is on metallic components.

As an introduction, the individual post-production supply strategies are explained in greater detail and options for spare parts classification are outlined. Furthermore, additive manufacturing using the selective laser melting (SLM) process is highlighted, as this process is particularly relevant for metallic materials. Based on the obtained knowledge, a demo version of a spare part classification tool was coded by means of VBA (Visual Basic for Applications) in Excel, which enables automatic spare part classification for users.

Subsequently, an empirical investigation was carried out to evaluate the created model. In addition to the evaluation of data sheets of various 3D printer models, interviews with experts in the field of spare parts management and additive manufacturing were conducted. The interviews provided expert information and insights, including of market-related and technology-related framework conditions, and potentials for improvement to the created classification tool were identified and implemented.

The result of the present work is an Excel tool that assists companies in finding the right delivery strategy. It takes additive manufacturing into consideration and shows which input data is needed for a comprehensive analysis.

The findings show that the requirements for the developed application are very much dependent on the considered business unit and that an individual setup of the tool prior to initial use as well as continuous data maintenance are absolutely necessary. Challenges related to this are discussed and an outlook on future expansion possibilities of the analysis tool are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Ersatzteilmanagement und additive Fertigung Grundlagen und Herausforderungen	4
1.2	Forschungsfragen	6
1.3	Methodisches Vorgehen	7
1.4	Inhaltlicher Aufbau und Struktur der Arbeit	9
2	Theoretische Grundlagen	11
2.1	Strategien zur Bereitstellung von Ersatzteilen	11
2.1.1	Nutzung kompatibler Teile	13
2.1.2	Endbevorratung	14
2.1.3	Interne Nachfertigung	16
2.1.4	Externe Nachfertigung	17
2.1.5	Altteilwiederverwendung	18
2.1.6	Wiederinstandsetzung (Reparatur)	19
2.1.7	Vergleich und Kombination der Bereitstellungsstrategien	21
2.2	Klassifikation von Ersatzteilen	23
2.2.1	Ersatzteilklassifikation nach qualitativen Kriterien	24
2.2.2	Ersatzteilklassifikation nach quantitativen Kriterien	31
2.2.3	Übersicht der Klassifikationsmerkmale	38
2.3	Additive Fertigung mit metallischen Werkstoffen	39
2.3.1	Funktionsprinzip der additiven Fertigung	39
2.3.2	Selektives Laserschmelzen (SLM-Verfahren)	40
2.3.3	Pulverherstellung und verwendbare Materialien	41
3	Derzeitige Situation und Stand der Forschung	43
3.1	Bestehende Lösungsansätze zur Ersatzteilklassifikation	43
3.2	Verbreitung der additiven Fertigung im Ersatzteilmanagement	48
4	Dateninput Identifikation von entscheidungsrelevanten Parametern für die Ersatzteilklassifikation	52
4.1	Experteninterviews	52
4.1.1	Methodisches Vorgehen und verfolgte Ziele	52

4.1.2	Interviews zur Identifikation von marktseitigen Rahmenbedingungen	55
4.1.3	Interviews zur Identifikation von technologischen Rahmenbedingungen	56
4.1.4	Ableitungen aus den Experteninterviews.....	57
4.2	Spezifikationsanalyse von 3D-Druck-Systemen verschiedener Hersteller	61
4.2.1	Bauraumgröße.....	63
4.2.2	Druckeigenschaften	64
4.2.3	Preis	66
4.2.4	Ableitungen aus der Spezifikationsanalyse	66
5	Erstellung des Excel-Tools zur automatischen Ersatzteilklassifikation	68
5.1	Methodisches Vorgehen	68
5.2	Demoversion des Ersatzteil-Klassifikationstools	70
5.3	Modellaufbau und Bewertungsschema	72
5.4	Modellkonfiguration	76
5.4.1	Klassifikationsmerkmale	76
5.4.2	Merkmalgewichtung.....	80
5.4.3	Relevante Merkmale der additiven Fertigbarkeit	81
5.4.4	Kriterienübersicht.....	83
5.5	Eingabe der benötigten Daten	84
5.5.1	Haupteingabemodul	85
5.5.2	Weitere Dateneingabemodule	85
5.6	Ausgabe der Analyseergebnisse	87
5.7	Modellvalidierung	91
6	Schlussbetrachtung	94
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	94
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse	98
6.3	Ausblick	100
	Literaturverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	107
	Tabellenverzeichnis	109
	Formelverzeichnis	110
	Abkürzungsverzeichnis	111

Anhang	113
A.1 Fragebogen	113
A.2 Experteninterviews.....	117
A.2.1 Interview 1 – FAIS	117
A.2.2 Interview 2 – Franz Haas Waffelmaschinen GmbH	120
A.2.3 Interview 3 – Großunternehmen im Schienenfahrzeugbau	124
A.2.4 Interview 4 – MostTech	128
A.2.5 Interview 5 – Prof. Stampfl (TU Wien)	132
A.3 Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools	136

1 Einleitung

1.1 Ersatzteilmanagement und additive Fertigung | Grundlagen und Herausforderungen

Nach Beendigung der Serienfertigung eines Produktes sind Unternehmen gesetzlich bzw. vertraglich dazu verpflichtet, dem Kunden für einen definierten Zeitraum Ersatzteile bereitzustellen. Neben dieser Verpflichtung stellt die Ersatzteilversorgung ebenso ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal zu Konkurrenzbetrieben sowie einen Umsatzfaktor in der Nachkaufphase eines Produktes dar. Für viele Kunden ist die Versorgung mit Ersatzteilen im After-Sales-Service ein wichtiges Qualitätsmerkmal, das zu einer besseren Kundenbindung führt und somit langfristig das Unternehmen am Markt stärkt.¹

Es kann durchaus der Fall sein, dass mithilfe von Ersatzteilen höhere Gewinne als durch den Produktverkauf erzielt werden. Das Gesamtergebnis einer Firma kann so deutlich verbessert werden.²

Dies kann anhand eines Vergleichs, der durch chinesische Behörden im Jahr 2015 dargestellt wurde, veranschaulicht werden. Dabei wurde errechnet, dass eine Mercedes-C-Klasse in guter Ausstattung, welche nur durch den Einsatz von Ersatzteilen zusammengebaut werden würde, umgerechnet etwa 600.000 Euro anstelle der im Handel veranschlagten 50.000 Euro kosten würde.³

Daraus lässt sich erkennen, welches Potenzial im Bereich des Ersatzteilmanagements steckt und wie wichtig dieser Unternehmensbereich in Hinsicht auf die erreichbaren Geschäftsziele wie z.B. die Steigerung des Gesamtergebnisses und eine stärkere Kundenbindung ist.

Bei der Betrachtung von Unternehmen, die im Maschinen- und Anlagenbau tätig sind, können zwei gegenläufige Trends beobachtet werden. Während die technische Lebensdauer der Primärprodukte stetig zunimmt, kommt es zu einer ständigen Verkürzung der Innovationszyklen sowie der Zeiträume, in denen die Serienproduktion verläuft.⁴

Das Resultat ist eine hohe Anzahl an Produkten, für die der Hersteller über lange Zeiträume Ersatzteile zur Verfügung stellen muss. Dies ist eine der vielen Herausforderungen, denen Industrieunternehmen heutzutage gegenüberstehen. Nachfolgend

¹ Vgl. Dombrowski/Horatzek/Wrehde, 2005a, S.125

² Vgl. Meinel, 2007, S.875

³ Vgl. Rief, N.: Ein Auto aus Ersatzteilen um 600.000 Euro (01.08.2015), <https://diepresse.com/home/wirtschaft/international/4791181/Ein-Auto-aus-Ersatzteilen-um-600000-Euro> (zugegriffen am: 22.09.2018)

⁴ Vgl. Dombrowski/Horatzek/Wrehde, 2005a, S.125

sind weitere Faktoren aufgelistet, die zu einer Steigerung der Komplexität in Bezug auf die Bereitstellung von Ersatzteilen führen:

- Schwere Prognostizierbarkeit des Bedarfs
- Dringende Bedarfe (z.B. funktionskritische Bauteile)
- Varianten- und Artikelvielfalt steigen
- Wettbewerb verschärft sich⁵

Um diesen Herausforderungen bestmöglich entgegenzuwirken, können verschiedene Bereitstellungsstrategien im Ersatzteilmanagement angewandt werden. Diese Strategien müssen jedoch auf das jeweilige Bauteil abgestimmt sein, da keine allgemeingültige Aussage über einzelne Artikelgruppen getroffen werden kann.

Zu diesem Zweck ist eine Einteilung der Ersatzteile nach verschiedenen Merkmalen sinnvoll. Bauteile können dadurch in Klassen mit gewissen Ausprägungen gruppiert werden, die es den Herstellern erleichtern, sich für eine geeignete Vorgehensweise bei der Ersatzteilversorgung zu entscheiden.

Aufgrund des rasanten Fortschritts der Technologie im Bereich der additiven Fertigung darf diese Fertigungs- bzw. Bereitstellungsvariante bei der Klassifikation von Bauteilen nicht außer Acht gelassen werden.

Bei der additiven Fertigung handelt es sich um einen Herstellungsprozess, der nach dem Schichtbauprinzip arbeitet und speziell in den letzten Jahren an großer Bedeutung gewonnen hat.⁶ Nähere Details werden in Kapitel 2.3 erläutert.

In Abbildung 1 ist dieser Umstand anhand des weltweiten Marktvolumens für Systeme, Materialien und Services im Bereich der additiven Fertigung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Umsatz seit 2010 mehr als vervierfacht hat und dass bis 2023 ein weiterer überproportionaler Anstieg von Experten erwartet wird.⁷

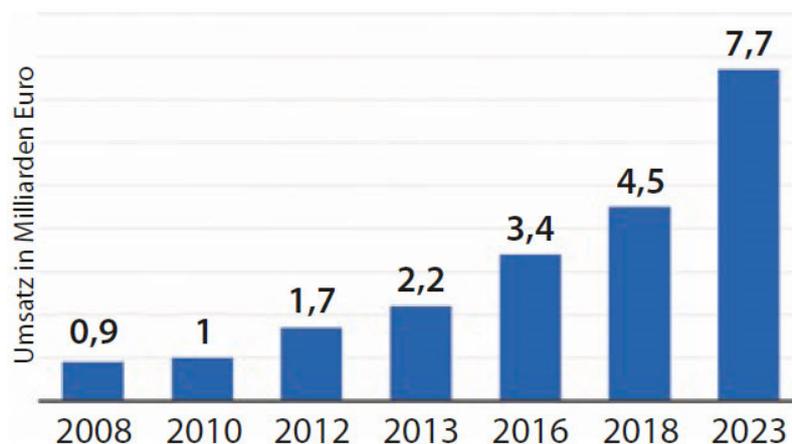


Abbildung 1: Marktvolumen für Systeme, Materialien und Services im Bereich der additiven Fertigung⁸

⁵ Vgl. Voss, 2006, S.7 ff.

⁶ Vgl. Gebhardt/Kessler/Thurn, 2016, S.2

⁷ Vgl. Lachmayer/Lippert, 2017, S.2

⁸ Lachmayer/Lippert, 2017, S.3

Der Ausdruck additive Fertigung stellt dabei einen Überbegriff für eine große Anzahl an unterschiedlichen Fertigungsverfahren, die speziell für Kunststoffe sowie metallische und keramische Werkstoffe geeignet sind, dar. Im allgemeinen Sprachgebrauch bürgert sich der generische Begriff *3D-Druck* aufgrund der einfachen Vermittlung immer mehr ein.

Im Zuge dieser Diplomarbeit liegt der Fokus auf metallischen Bauteilen, weshalb das selektive Laserschmelzen (kurz: SLM-Verfahren), welches in Kapitel 2.3.2 näher beschrieben wird, eine entscheidende Rolle spielt.

Derzeit erweist sich die standardisierte Einteilung der Ersatzteile nach einem geeigneten, unternehmensspezifischen Schema als problematisch. Unternehmen stehen der Herausforderung gegenüber, relevante eindimensionale Klassifikationsmerkmale in Form eines effizienten Bewertungsschemas zu kombinieren. Die dafür benötigten Informationen aus riesigen Datenmengen zu erkennen, ist oft sehr schwer. In den bisherigen Literaturansätzen finden meist nur konventionelle Versorgungsvarianten ohne Einbindung der additiven Fertigung Berücksichtigung und es gibt keine Softwarelösungen zur Strategiefindung. Außerdem gibt es nur wenig Literatur zur Klassifizierung von additiv gefertigten Bauteilen.

Durch eine kombinierte Betrachtung der konventionellen Bereitstellungsvarianten und der Möglichkeiten, die sich durch additive Fertigung ergeben, soll im Zuge der vorliegenden Arbeit ein neues, automatisiertes Klassifizierungsschema für Ersatzteile unter Berücksichtigung der additiven Fertigung entwickelt werden.

1.2 Forschungsfragen

Zur Lösung der oben aufgezeigten Problemstellung werden die folgenden Forschungsfragen formuliert:

- Nach welchen Kriterien können Bauteile eines Industrieunternehmens, das im Maschinen- und Anlagenbau tätig ist, klassifiziert werden, um festzustellen, welche Strategien im Ersatzteilmanagement für die Nachserienversorgung (NSV) der betrachteten Teile angewandt werden können?
- Welche Bedingungen müssen vorliegen, damit eine Produktion der benötigten Bauteile durch additive Fertigungsverfahren für die Bereitstellung von Ersatzteilen in Frage kommt?
- Welche qualitativen bzw. quantitativen Daten über Produkte, Prozesse, interne und externe Umgebungsbedingungen eines Unternehmens sind notwendig, um eine geeignete Klassifikation der Ersatzteile vornehmen zu können?

Die Antworten der ersten beiden Fragen sollen speziell dazu dienen, Klassifikationsmöglichkeiten aufzuzeigen, welche sich durch eine kombinierte Betrachtung von mehreren eindimensionalen Bewertungskriterien unter Berücksichtigung der additiven Fertigung ergeben.

Ziel der dritten Frage ist es, eine Lösung zu entwickeln, die Unternehmen schon während des Produktentwicklungsprozesses dabei unterstützt, Daten für eine spätere Klassifikation zu identifizieren bzw. zu dokumentieren. Dadurch soll Bewusstsein dafür geschaffen werden, welche relevanten Daten der neu entwickelten Teile unmittelbar nach ihrem Entwurf in das Produktdatenmanagement (PDM) bzw. das Enterprise Resource Planning (ERP) System einfließen sollen bzw. in welcher Form dies geschehen soll.

1.3 Methodisches Vorgehen

Zu Beginn der Arbeit werden die durch Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse bezüglich konventioneller Bereitstellungsstrategien für die Nachserienversorgung genauer beschrieben, da die Klassifizierung der betrachteten Teile letztendlich dazu dienen soll, um auf eine geeignete Strategie schließen zu können. Basierend auf Informationen aus unterschiedlichen Quellen werden im Anschluss mögliche Kriterien der qualitativen und quantitativen Bauteilklassifikation aufgezeigt. Zum einen soll dies ein grundlegendes Verständnis schaffen und zum anderen wird hier bereits eine erste Strukturierung der Klasseneinteilung in sinnvolle Bereiche für die einzelnen Ersatzteilmerkmale vorgenommen. Den Abschluss des Grundlagenteils bilden die ebenfalls durch Recherche von Fachliteratur erlangten Erkenntnisse im Themengebiet der additiven Fertigung von metallischen Bauteilen. Das Hauptaugenmerk liegt hier vor allem auf dem SLM-Verfahren sowie auf den verwendbaren Werkstoffen.

Die gewonnenen Informationen aus den in Kapitel 2 dargelegten Grundlagen werden genutzt, um einen Vergleich der bestehenden Klassifizierungsschemata von verschiedenen Autoren in Form einer Matrix darzustellen. Dadurch wird ein Überblick des derzeitigen Forschungsstandes vermittelt. Weiters wird untersucht, wie stark die additive Fertigung bereits heutzutage in der Ersatzteilproduktion Verwendung findet.

Im Anschluss wird die empirische Untersuchung, wie in Abbildung 2 dargestellt, nach dem Modell von Bös, Hänsel und Schott durchgeführt.

Phase I erfolgte bereits durch die Präzisierung des Diplomarbeitsthemas und die Erstellung eines Exposé als auch eines Zeitplanes.

Die Problemanalyse in Phase II wird durch die erwähnte Literaturrecherche sowie den Vergleich verschiedener Theorien und deren Charakteristika in den der empirischen Untersuchung vorangehenden Kapiteln durchgeführt.



Abbildung 2: Ablauf im empirischen Forschungsprozess⁹

Phase III dient der Aufstellung von Rahmenbedingungen sowie der Identifikation geeigneter Untersuchungsmethoden, welche im Zuge der Arbeit Anwendung finden.

Den Hauptteil des empirischen Forschungsprozesses bildet Phase IV – die Untersuchungsdurchführung. Auf Basis der Erkenntnisse der Literaturrecherche wird ein Demo-Tool mittels VBA (Visual Basic for Applications) in Excel programmiert, das eine automatische Klassifikation von Ersatzteilen ermöglicht. Persönlich geführte Experteninterviews, die sich an einem zuvor ausgearbeiteten Leitfaden orientieren, dienen dazu, um qualitative Informationen über eine sinnvolle mehrdimensionale Klassifizierung zu erhalten und dadurch Weiterentwicklungsmöglichkeiten für das Demo-Tool zu identifizieren. Für diesen Zweck werden Gespräche mit den folgenden Vertretern geführt:

- Ersatzteilmanager von Maschinen- und Anlagenbauunternehmen
- Spezialisten von Forschungseinrichtungen und Unternehmen im Bereich der additiven Fertigung mit metallischen Werkstoffen

Zusätzlich werden Datenblätter von 3D-Druckern gesammelt und analysiert, um quantitative, klassifikationsrelevante Informationen (z.B. Druckgeschwindigkeit, Bauraumgröße, mögliche Schichtdickenauflösung und maximale Detailauflösung) zu erhalten und weitere Ansätze zur Optimierung der entwickelten Anwendung zu eruieren.

Im nächsten Schritt (Phase V) werden die aus Phase IV erhaltenen Daten analysiert, ausgewertet und sich aus den Forschungsfragen ergebende Schlussfolgerungen

⁹ Vgl. Bös/Hänsel/Schott, 2004, S.34

abgeleitet. Eine Diskussion über Aussagen und Ergebnisse der Fragestellungen zeigt neue Erkenntnisse auf.

Anschließend fließen die bisher in Phase V gewonnenen Informationen in die Demoversion des Ersatzteil-Klassifikationstools ein, um die Excel-Anwendung entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse weiterzuentwickeln und einen effizienteren Modellaufbau zu ermöglichen. Zur Validierung des Modells werden Testläufe mit Daten verschiedener Einzelteile durchgeführt. Die Ergebnisse werden genau untersucht, interpretiert und einer kritischen Kontrolle unterzogen, um die Plausibilität zu prüfen.

Phase VI dient der übersichtlichen Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse. Die Ergebnisse werden zusammengefasst und nötige Schritte für eine verbesserte Anwendbarkeit des Excel-Tools in Unternehmen genauer eruiert. Den Abschluss bildet ein Ausblick zur möglichen Weiterentwicklung des Modells, damit beispielsweise auch aus Kunststoff gefertigte Teile in der Analyse berücksichtigt werden können.

1.4 Inhaltlicher Aufbau und Struktur der Arbeit

Abbildung 3 zeigt eine Übersicht des strukturellen Aufbaus der vorliegenden Diplomarbeit. Dabei ist zu erkennen, dass eine Gliederung in 6 Abschnitte vorgenommen wurde. Die angeführten Unterpunkte stellen eine detaillierte Auflistung der im jeweiligen Kapitel behandelten Inhalte dar.

Nach der Einleitung in Kapitel 1, welche die Grundlagen und Herausforderungen des Ersatzteilmanagements sowie die Festlegung der Problemdefinition und des methodischen Vorgehens beinhaltet, folgt in Kapitel 2 der theoretische Grundlagenteil. Dieser dient dazu, dem Leser eine fundierte Basis an notwendigen Kenntnissen im Bereich der Ersatzteilklassifikation und der Nachserienversorgung mit Ersatzteilen zu vermitteln.

Im Anschluss erfolgt in Kapitel 3 eine Erörterung des derzeitigen Forschungsstandes und eine Verbreitungsanalyse der additiven Fertigung im Bereich des Ersatzteilmanagements. Hier wird im Speziellen gezeigt, welches Potential in den nächsten Jahren von 3D-Druck Systemen zu erwarten ist und welche Auswirkungen sich dadurch auf die Ersatzteilbereitstellung ergeben können.

In Kapitel 4 wird auf die verwendeten Methoden eingegangen, die zur Erhebung des relevanten Dateninputs für die Entwicklung des Ersatzteil-Klassifikationstools notwendig sind. Zum einen handelt es sich hier um Experteninterviews, zum anderen um eine Spezifikationsanalyse von 3D-Druck Systemen verschiedener Hersteller.

Neben dem methodischen Vorgehen zur Entwicklung der finalen Excel-Anwendung werden in Kapitel 5 ebenfalls die Erstellung der Demoversion und der genaue

Modellaufbau näher behandelt. Zusätzlich wird auf den Konfigurationsprozess des Excel-Tools, die benötigten Eingangsdaten sowie die vom Programm ausgegebenen Analyseergebnisse detaillierter eingegangen.

Im letzten Kapitel werden die anfänglich definierten Forschungsfragen beantwortet und die Ergebnisse zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick über Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Ersatzteil-Klassifikationstools und über die damit verbundenen Anwendungsgebiete gegeben.



Abbildung 3: Inhaltlicher Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Strategien zur Bereitstellung von Ersatzteilen

Ersatzteile sind gemäß DIN 24420

„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.“¹⁰

Laut DIN 31051¹¹ kann bei Ersatzteilen zwischen Reserveteilen, Verbrauchsteilen und Kleinteilen unterschieden werden. Bei Reserveteilen handelt es sich meist um relativ teure Teile, die nur in wenigen Anlagen zum Einsatz kommen (z.B. Sonderanfertigungen). Im Gegensatz dazu sind Verbrauchsteile meist genormt und in mehreren Instandhaltungsobjekten vorzufinden (z.B. Wälzlager oder Relais). Als Kleinteile werden jene Ersatzteile bezeichnet, die einen geringen Einzelwert besitzen, allgemein einsetzbar und vorwiegend genormt sind (z.B. Muttern oder Schrauben).¹²

Eine andere Kategorisierungsmöglichkeit bietet die Art der Herkunft von Ersatzteilen. Wie im Zuge dieses Kapitels gezeigt wird, besteht hier ein starker Zusammenhang mit den möglichen Versorgungsstrategien. Drei Gruppen werden unterschieden:

- Originalersatzteile, die vom Anlagenhersteller selbst erzeugt bzw. vom Erstausrüster fremd bezogen werden
- Fremdersatzteile, die entweder durch vom Erstausrüster hergestellte Identteile oder Nachbauteile repräsentiert werden
- Gebrauchtteile, die aus Altanlagen entnommen oder durch Reparatur instand gesetzt werden¹³

Abbildung 4 zeigt einen qualitativen Verlauf der benötigten Menge an Ersatzteilen über die Phasen des Produktlebenszyklus eines Erzeugnisses. Nach Ende der Serienfertigung (EOP) müssen Ersatzteile für eine bestimmte Zeit bevorratet werden. Die Zeiträume des hier angeführten Beispiels beziehen sich speziell auf die Automobilindustrie und können je nach betrachteter Branche variieren.

Es kann von folgenden Richtwerten für die Dauer der Nachserienversorgung ausgegangen werden:

- Haushaltsgeräte: 10 Jahre
- Automotive: 20 Jahre

¹⁰ Deutsches Institut für Normung, 1976, S.1

¹¹ Vgl. Deutsches Institut für Normung, 2003, S.11

¹² Vgl. Biedermann, 2008, S.3

¹³ Vgl. ebenda, S.4

- Aviation: 30 - 40 Jahre
- Militär: bis zu 50 Jahre¹⁴

Der Bedarf, der sich durch die während der Einführungsphase (zwischen SOP und EOP) auftretenden Frühausfälle ergibt, kann relativ einfach durch Ersatzteile aus der laufenden Produktion befriedigt werden. Betrachtet man jedoch den Zeitraum der Nachserienversorgung (zwischen EOP und EOS) ist dies nicht mehr möglich. Folglich müssen für Planung, Steuerung und Überwachung der NSV geeignete Strategien der Bereitstellung festgelegt werden, um den Bedarf zu decken.

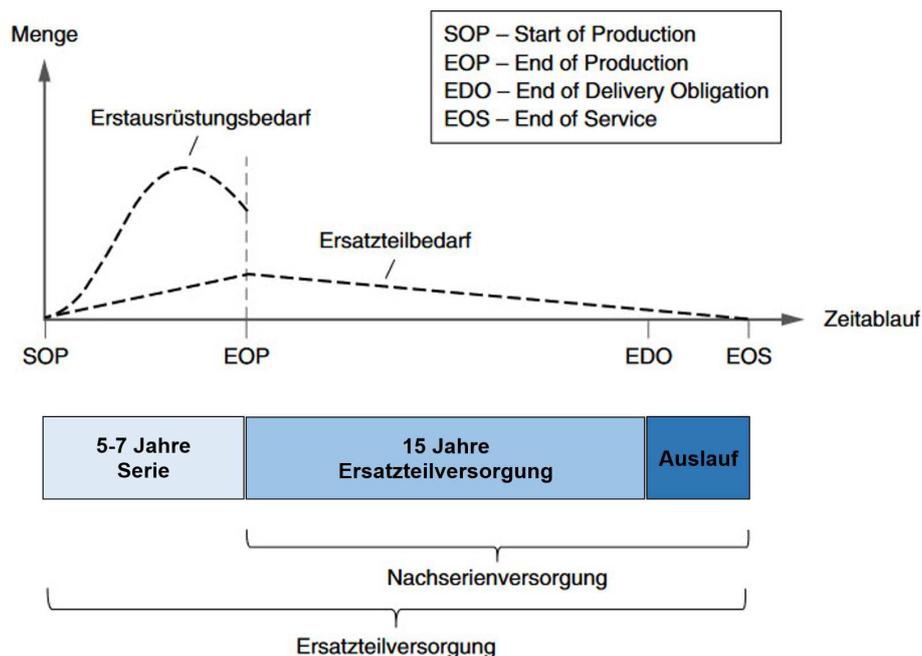


Abbildung 4: Ersatzteilbedarf während der Phasen des Produktlebenszyklus¹⁵

Die spezifischen Rahmenbedingungen, denen ein Hersteller ausgesetzt ist, definieren, welche Planungsziele in der Ersatzteilbereitstellung verfolgt werden. Solche Ziele können beispielsweise eine höhere Kundenbindung, eine größere Flexibilität, ein minimiertes Überdeckungsrisiko, geringere Kosten oder eine schnelle Reaktion auf veränderte Rahmenbedingungen sein. Meist reicht jedoch eine einzelne Versorgungsstrategie nicht aus, um den Unternehmenszielen gerecht zu werden. In solchen Fällen kommt oft eine Kombination mehrerer Strategien in Form eines sogenannten Versorgungsszenarios zum Einsatz. Durch eine Symbiose der jeweiligen Vorteile kann somit besser auf die priorisierten Zielgrößen der Ersatzteilbereitstellung eingegangen werden.¹⁶

Während eine Versorgungsstrategie mit hoher Lieferfähigkeit z.B. zu einer positiven Beeinflussung der Kundenbindung führt und dafür einer flexiblen Strategie mit

¹⁴ Vgl. Recknagel, S. E. A.: ABC der Logistik, Folge 2: Ersatzteillogistik (15.03.2013), <http://www.youtube.com/watch?v=DFRjdDo2HTA> (zugegriffen am: 02.10.2018)

¹⁵ Vgl. Klug, 2010, S.448

¹⁶ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.440

entsprechendem Servicegrad bedarf, kann das Ziel der Risikominimierung u.a. durch eine Strategie mit geringer Wahrscheinlichkeit zur Unterdeckung der Nachfrage erreicht werden.¹⁷

Im Allgemeinen wird zwischen sechs Versorgungsstrategien unterschieden. Diese sind in Abbildung 5 nach Verwendung von Neu- bzw. Altteilen gegliedert und werden im Anschluss näher behandelt. Neben den Eigenschaften der jeweiligen Strategien wird auf die Vor- und Nachteile bezüglich der verschiedenen Zielgrößen eingegangen.

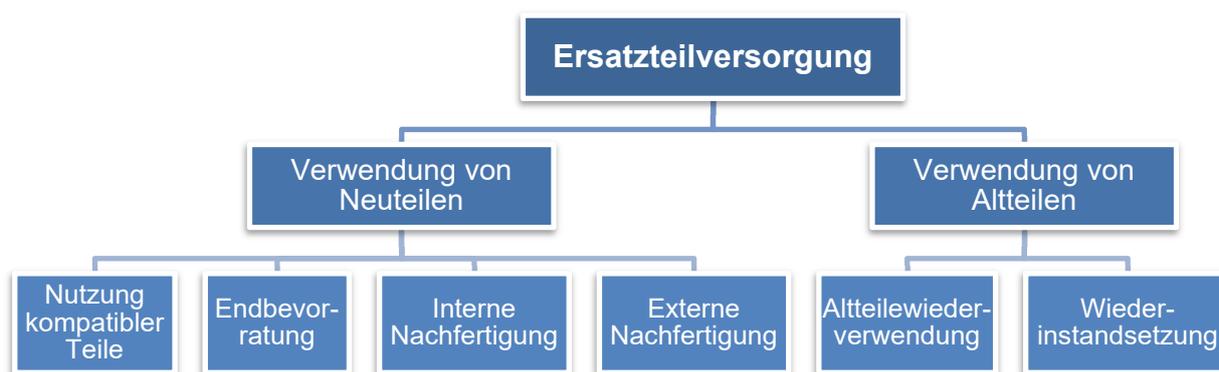


Abbildung 5: Übersicht der möglichen Nachserienversorgungsstrategien¹⁸

2.1.1 Nutzung kompatibler Teile

Können Bauteile aus der laufenden Serienfertigung eines Nachfolgeprodukts zur Ersatzteilversorgung seines ausgelaufenen Vorgängers verwendet werden, wird von der Nutzung kompatibler Teile gesprochen. Konstruktion und Auslegung nachfolgender Produktgenerationen erfolgen so, dass eine Abwärtskompatibilität gewährleistet ist und somit der Ersatzteilbedarf der Nachserie gedeckt werden kann. Eine Prüfung der Funktionalität und der Einbauspezifikationen sowie eine Abstimmung mit den angrenzenden Schnittstellen ist in jedem Fall notwendig. Neben den geringen Kosten, die durch diese Strategie entstehen, stellt der zuverlässige Schutz vor einer Unterversorgung einen weiteren Vorteil dar. Unsichere Bedarfsprognosen führen daher zu keinem Risiko der Unter- bzw. Überdeckung. Dem gegenüber steht allerdings ein erhöhter Entwicklungsaufwand, da beim Entwurf des neuen Produkts stets Rücksicht auf die Anforderungen der Altgeräte genommen werden muss. Eine Abwärtskompatibilität wird daher oft auch als Innovationshemmnis gesehen.^{19, 20}

In Fällen, bei denen Komponenten nicht abwärts kompatibel ausgeführt werden können, besteht die Möglichkeit des Redesigns der Vorgängerversion. Nur um die Ersatzteilversorgung der ausgelaufenen Produktgeneration sicherzustellen, wird die

¹⁷ Vgl. Finke, 2015, S.20

¹⁸ Vgl. Bothe, 2003, S.49

¹⁹ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.445 f.

²⁰ Vgl. Dombrowski/Weckenborg/Schulze, 2009, S.954

Neuentwicklung eines betroffenen kompatiblen Teils durchgeführt. Dadurch wird die Produktion auf den für die laufende Fertigung gerüsteten Maschinen möglich. Die Kosten für diesen Entwicklungsprozess sind i. d. R. relativ hoch. Dennoch stellt das Redesign eine attraktive Möglichkeit dar, eine Unabhängigkeit von Bauteilabkündigungen und eine bessere Auslastung der Fertigungseinrichtungen zu erreichen.²¹

Wird die Nutzung kompatibler Teile als Bereitstellungsstrategie herangezogen, ist eine Ausmusterung der alten Serienfertigungseinrichtungen möglich, da diese nicht mehr benötigt werden.²² Was jedoch erforderlich bleibt, ist sowohl das Know-How aus der Entwicklung als auch das Erfahrungswissen über die alte Teilegeneration.²³

Generell ist der Einsatz von Normteilen anzuraten, da durch deren Verwendung eine weitreichende Kompatibilität über mehrere Generationen eines Produkts ermöglicht wird.

Die oben genannten Eigenschaften sind in Abbildung 6 übersichtlich zusammengefasst.

Versorgungsstrategie: Nutzung kompatibler Teile	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibles Teil muss in der Nachfolgeserie vorhanden sein • Informationen über Kompatibilität
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Produktionskosten der Teile (wie bei Serienfertigung) • Keine Abhängigkeit von unsicheren Bedarfsprognosen und Bauteilabkündigungen • Keine Langzeitlagerung notwendig • Alte Fertigungseinrichtungen können ausgemustert werden
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Beeinträchtigung des Innovationspotentials durch Restriktionen • Höherer Aufwand für die Entwicklung der Folgegeneration aufgrund nötiger Kompatibilität • Hohe Kosten für den Entwicklungsprozess

Abbildung 6: Details zur Versorgungsstrategie „Nutzung kompatibler Teile“²⁴

2.1.2 Endbevorratung

Bei der Endbevorratung wird eine Prognose über den zukünftig benötigten Ersatzteilbedarf (nach EOP) getätigt und eine entsprechende Menge an Erzeugnissen in Form eines Abschlussloses am Ende der Serienproduktion gefertigt und eingelagert. Dieser sogenannte Allzeitbedarf dient zur Kundenbedarfsdeckung über den gesam-

²¹ Vgl. Bothe, 2003, S.50 f.

²² Vgl. ebenda, S.51

²³ Vgl. Wrehde, 2011, S.53

²⁴ Vgl. Bothe, 2003, S.52

ten Versorgungszeitraum in der Nachserie hinweg (von EOP bis EDO bzw. EOS). Nach der Einlagerung werden Fertigungs- und Prüfeinrichtungen oft für nachfolgende Produktserien umgerüstet bzw. ausgemustert. Voraussetzung für die Endbevorratung ist die lange Lagerfähigkeit der Produkte, Komponenten bzw. Bauteile (siehe Abbildung 7). Um auftretende Schäden, die zur Unbrauchbarkeit der Ersatzteile führen würden, während der Lagerung zu verhindern, können spezielle Lagerbedingungen notwendig sein (z.B. lichtgeschützte Umgebung oder spezielle Verpackungseigenschaften).²⁵

Bei Anwendung dieser Strategie ist die zuvor erwähnte Prognose zentrales Element zur erfolgreichen Umsetzung. Neben meist fehlender Vergangenheitsdaten und langen Versorgungszeiträumen führt das zufällige Ausfallverhalten vieler Ersatzteile dazu, dass die Prognose große Unsicherheiten mit sich bringt. Die Folge kann sowohl eine Über- als auch Unterdeckung sein.

Will man kein gravierendes Fehlmengenrisiko in Kauf nehmen, ist eine Überdeckung aufgrund von mangelnder Flexibilität dieser Strategie (es sind keine zeitlich und mengenmäßigen Anpassungen nach EOP möglich) kaum zu vermeiden. Dies kann z.B. in der Hausgerätebranche beobachtet werden. Laut Recknagel liegt der Verschrotungsanteil von eingelagerten Ersatzteilen hier bei 25%.²⁶ Eine Unterdeckung führt zu einer Lieferunfähigkeit und resultiert in einem schlechten Servicegrad und einer negativen Beeinflussung der Kundenzufriedenheit.^{27, 28}

Versorgungsstrategie: Endbevorratung	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ersatzteile müssen lagerfähig sein • Prognostizierbarkeit des Allzeitbedarfs • Prüfeinrichtungen müssen eventuell bestehen bleiben (z.B. Qualitätscheck nach Lagerung)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Abhängigkeit von Bauteillieferanten und Bauteilabkündigungen • Geringe Produktionskosten der Teile (wie bei Serienfertigung) • Fertigungseinrichtungen können ausgemustert bzw. umgerüstet werden
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Lagerhaltungs-, Opportunitäts- und Prüfkosten • Gefahr der Unter- bzw. Überdeckung durch ungenaue Prognosen • Obsoleszenz durch lange Lagerung • Geringe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Rahmenbedingungen

Abbildung 7: Details zur Versorgungsstrategie „Endbevorratung“²⁹

²⁵ Vgl. ebenda, S.54 ff.

²⁶ Vgl. Recknagel, 2007, S.271 ff.

²⁷ Vgl. Inderfurth/Kleber, 2009, S.1021

²⁸ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.954

²⁹ Vgl. Bothe, 2003, S.56

Bei Betrachtung der entstehenden Kosten bietet diese Strategie sowohl positive als auch negative Aspekte. Herstellungsseitig ist die Endbevorratung vorteilhaft, da verglichen mit der Serienproduktion keine Extrakosten auftreten. Hohe Opportunitätskosten durch gebundenes Kapital in Form von Lagerteilen sowie hohe Lagerhaltungskosten stehen dem jedoch gegenüber. Durch eine Vielzahl an Ersatzteilen kann dies zu einer starken wirtschaftlichen Belastung eines Unternehmens führen. Die Unabhängigkeit von Bauteillieferanten und Bauteilabkündigungen ist einer der Hauptgründe, weshalb die Endbevorratung trotzdem zum Einsatz kommt.³⁰

2.1.3 Interne Nachfertigung

Eine Möglichkeit zur Vermeidung des Problems der genauen Bedarfsprognosen und der geringen Lagerfähigkeit ist die Nachfertigung. Diese kann sowohl intern als auch extern (siehe Abschnitt 2.1.4) erfolgen. Organisatorisch kann die interne Nachfertigung in die laufende Serienfertigung integriert oder von ihr getrennt werden. Bei Anwendung dieser Versorgungsstrategie kommt es während des gesamten Nachserienzeitraums zur bedarfsgerechten, periodischen Nachfertigung. Die Verfügbarkeit der notwendigen Einrichtungen und Bauteile stellt die Grundvoraussetzung dar. Folglich kann es ein großer Nachteil sein, dass eine Fertigung durch Bauteilabkündigungen nicht mehr realisierbar oder ein Vorhalten von Prüf- und Fertigungseinrichtungen mit nur geringer Auslastung notwendig ist.³¹

Beispielsweise müssen produktspezifische Prüfautomaten vorgehalten werden. Bei diesen handelt es sich selbst um Primärprodukte, welche oft schwierig zu reaktivieren sind und ebenfalls Probleme durch den langfristigen Bedarf von Ersatzteilen mit sich führen können.³²

Aufgrund der geringen Stückzahl ist eine kontinuierliche Fertigung nicht möglich. Diese Tatsache spiegelt sich in einer geringen Betriebsmittelauslastung wider. Aus Kostengründen (Betrieb, Wartung, etc.) ist eine Automatisierungslösung nicht zweckmäßig. Letztlich ist es empfehlenswert, eine Umstrukturierung der Fertigungseinrichtungen durchzuführen und eine Anpassung des Fertigungsprozesses auf eine Kleinserienfertigung vorzunehmen.³³ Im Gegensatz zur regulären Produktion entfallen hier die Vorteile durch Skaleneffekte in der Produktion, da sich die entstehenden Fixkosten auf eine entsprechend geringere Ausbringungsmenge aufteilen. Höhere Stückkosten sind die Folge. Aufgrund von geringen Lagerkosten kann trotzdem eine positive Gesamtsituation erzielt werden. Weiters ist eine hohe Zeitflexibilität bei dieser Bereitstellungsoption von Vorteil. Während der Nachserie kann relativ einfach auf verfügbare Informationen bezüglich vorhandener Ersatzteilbedarfs-

³⁰ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.446

³¹ Vgl. Dombrowski/Weckenborg/Schulze, 2009, S.954 f.

³² Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.446

³³ Vgl. Bothe, 2003, S.58

schwankungen reagiert werden. Bei genauerer Betrachtung der Mengenflexibilität sind jedoch Einschränkungen aufgrund von vertraglich geregelten Mindestbestellmengen mit Lieferanten festzustellen. Diese rühren meist aus den zuvor erwähnten Umstellungen in der Produktion her.³⁴

In Abbildung 8 sind die Voraussetzungen sowie die Vor- und Nachteile der Strategie „Interne Nachfertigung“ dargestellt.

Versorgungsstrategie: Interne Nachfertigung	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigungs- und Prüfeinrichtungen müssen vorgehalten werden • Verfügbarkeit von Bauteilen muss gegeben sein • Vorhandenes Fertigungs-Know-How
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassungsfähigkeit an den Bedarfsverlauf (hohe Zeitflexibilität) • Keine langfristige Bedarfsprognose notwendig • Geringe Lagerhaltungskosten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Auslastung der Betriebsmittel (Fertigungs- und Prüfeinrichtungen) • Bauteilabkündigungen können eine Gefahr darstellen • Erhöhte Herstellungskosten aufgrund entfallender Skaleneffekte • Umstellung des Fertigungsprozesses auf eine Kleinserienfertigung

Abbildung 8: Details zur Versorgungsstrategie „Interne Nachfertigung“³⁵

2.1.4 Externe Nachfertigung

Von externer Nachfertigung wird gesprochen, wenn die Nachfertigung an ein Drittunternehmen vergeben wird, das die Ersatzteile nach Vorgaben des Serienherstellers produziert. Hintergrund der Anwendung dieser Versorgungsstrategie ist der Versuch, die Ineffizienzen der internen Nachfertigung (geringe Auslastung der Maschinen, Umstellung auf Kleinserienfertigung, etc.) zu minimieren. Zumeist werden die erforderlichen Fertigungseinrichtungen ebenfalls an das dritte Unternehmen weitergegeben. Die sogenannten Ersatzteilmfertiger können die Produktion speziell an die veränderten Bedingungen der Nachserie anpassen (z.B. kleine Stückzahlen und hohe Flexibilität). Dies führt neben einer Effizienzsteigerung auch dazu, dass sich der Primärprodukthersteller gezielt auf seine Kernkompetenz – die Serienproduktion – konzentrieren kann und dass das Ersatzteilgeschäft separiert ist. Umständliche interne Umstrukturierungen können so vermieden werden.³⁶

Die externe Nachfertigung besitzt weitestgehend dieselben Vor- bzw. Nachteile wie die im vorigen Abschnitt beschriebene interne Nachfertigung (siehe Abbildung 9).

³⁴ Vgl. Inderfurth/Kleber, 2009, S.1022

³⁵ Vgl. Bothe, 2003, S.58

³⁶ Vgl. Dombrowski/Weckenborg/Schulze, 2009, S.955

In Bezug auf das erforderliche Know-How für die Nachfertigung von Bauteilen, die nur für einen begrenzten Zeitraum am Markt verfügbar sind (z.B. mechatronische Komponenten), sind besondere Herausforderungen zu bewältigen. Beispielsweise kommen viele verschiedene Prozesstechnologien, die eine entsprechende Mitarbeiterqualifikation voraussetzen, zum Einsatz und das nötige Wissen zur Bedienung der Anlagen muss trotz auftretender Technologiesprünge gewahrt werden. Durch die externe Nachfertigung kommt erschwerend hinzu, dass das firmeninterne Fertigungs-Know-How an das liefernde Drittunternehmen weitergegeben werden muss.³⁷

Versorgungsstrategie: Externe Nachfertigung	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Drittunternehmen, das die Ersatzteilerfertigung übernimmt • Fertigungs- und Prüfeinrichtungen müssen vorgehalten werden • Verfügbarkeit von Bauteilen muss gegeben sein • Vorhandenes Fertigungs-Know-How
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassungsfähigkeit an den Bedarfsverlauf (hohe Zeitflexibilität) • Keine langfristige Bedarfsprognose notwendig • Geringe Lagerhaltungskosten • Konzentration auf die Kernkompetenzen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteilabkündigungen können eine Gefahr darstellen • Erhöhte Herstellungskosten aufgrund entfallender Skaleneffekte • Weitergabe von Fertigungs-Know-How an Dritte

Abbildung 9: Details zur Versorgungsstrategie „Externe Nachfertigung“³⁸

2.1.5 Altteilewiederverwendung

Das Prinzip der Altteilewiederverwendung beruht nicht wie bei den bisher beschriebenen Strategien auf der Fertigung neuer Produkte, sondern auf der Gewinnung von Ersatzteilen durch die Rückführung von funktionsfähigen Rückläufern, die bereits in Gebrauch waren. Durch eine Überholung der Bauteile können diese anschließend im Service wiederverwendet werden. Den Problemen der Bauteilabkündigungen und der Vorhaltung von Fertigungseinrichtungen wird so entgegengewirkt.³⁹

Die Produkte werden teilweise systematisch zurückgekauft und vom Hersteller selbst bzw. durch Dritte, die sich in diesem Markt etabliert haben, aufgearbeitet, um dem Bedarf an Ersatzteilen gerecht zu werden.⁴⁰ Aber auch andere Gründe, wie Rücknahmeverpflichtungen aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen oder der Schutz des Ersatzteilmarktes vor Mitbewerbern, führen zu einer Rückführung der gebrauchten Teile.⁴¹

³⁷ Vgl. Finke, 2015, S.26

³⁸ Vgl. Bothe, 2003, S.58

³⁹ Vgl. Trapp, 2000, S.29 ff. (zit. nach: Hermann, 2010, S.367 f.)

⁴⁰ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.446

⁴¹ Vgl. Toffel, 2003, S.117

Generell ist eine Reparatur nicht vorgesehen, da die rückgeführten Teile wie bereits erwähnt funktionsfähig sind. Durch eine Aufwertung können die Ersatzteile jedoch an das Funktionalitätsniveau von Neuteilen angepasst werden (siehe Abbildung 11). Um sicherzustellen, dass die erforderlichen Bauteileigenschaften erfüllt sind, werden Funktionstests durchgeführt und die Teile eventuell einer anschließenden Qualitätskontrolle unterzogen. So kann eine Einstufung in Altersklassen erfolgen. Gerade bei sicherheitsrelevanten Teilen kann es hierbei zu Problemen kommen, da hohe Anforderungen in Bezug auf die Produkthaftung bestehen.⁴²

Eine Einschränkung der Mengenflexibilität entsteht bei dieser Versorgungsalternative durch die hohe Unsicherheit der Altproduktrückführung in zeitlicher und quantitativer Hinsicht. Zudem kann der erforderliche Bedarf für gewöhnlich nicht komplett gedeckt werden. Mindestmengen spielen hier im Gegensatz zur Nachfertigung meist nur eine untergeordnete Rolle. Eine weitere Flexibilitätseinschränkung kann durch eine mangelnde Möglichkeit der Lagerung aufgrund technischer oder organisatorischer Einschränkungen, welche die sofortige Aufarbeitung bzw. Entsorgung der Bauteile erzwingt, entstehen.⁴³

Alle Aspekte der Altteilewiederverwendung sind in Abbildung 10 übersichtlich dargestellt.

Versorgungsstrategie: Altteilewiederverwendung	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Rückführung von Teilen • Know-How und Einrichtungen zur Funktionalitäts- und Qualitätsprüfung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Lagerhaltungskosten • Fertigungs- und Prüfeinrichtungen müssen nicht vorgehalten werden • Separierung von der Serienproduktion • Umweltfreundliche Strategie in Hinsicht auf die Produktion
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Rücktransport notwendig • Bedarf kann für gewöhnlich nicht komplett gedeckt werden (speziell am Anfang) • Schlechte Prognostizierbarkeit über Anzahl an rückgeführten Bauteilen • Unbekannte Restlebensdauer und rechtliche Unklarheiten

Abbildung 10: Details zur Versorgungsstrategie „Altteilewiederverwendung“⁴⁴

2.1.6 Wiederinstandsetzung (Reparatur)

Genauso wie bei der Altteilewiederverwendung erfordert die Wiederinstandsetzung keine Fertigung neuer Produkte, sondern das Vorhandensein eines Rückführsystems

⁴² Vgl. Graf, 2005, S.97

⁴³ Vgl. Inderfurth/Kleber, 2009, S.1022

⁴⁴ Vgl. Bothe, 2003, S.64

von Altteilen. Gegensätzlich ist jedoch, dass es sich bei den gebrauchten Teilen um defekte Produkte handelt, die instand gesetzt werden müssen, um sie anschließend als Austauschteile verkaufen zu können. Nach der Reparatur können die Altteile einer Aufarbeitung unterzogen werden (z.B. Austausch von Verschleißkomponenten), die sie wieder in einen gleichwertigen Zustand eines neu hergestellten Teiles versetzt (siehe Abbildung 11). Dadurch ist es oft möglich, die den eines Neuteiles gleichenden Garantiezusagen zu geben. In Anbetracht der Materialkosten zeigt dieses Versorgungsprinzip eine kostengünstige Variante auf. Dieser Kostenvorteil gegenüber der Serienproduktion geht allerdings durch einen geringen Automatisierungsgrad der Aufarbeitungsprozesse wieder verloren.⁴⁵

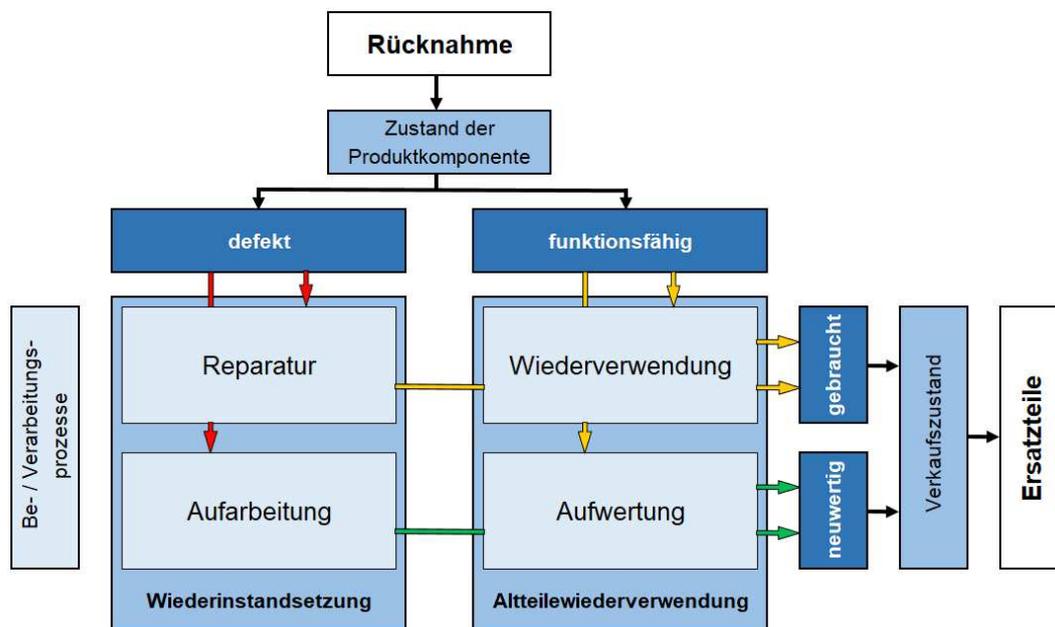


Abbildung 11: Mögliche Be- und Verarbeitungsprozesse an rückgeführten Produkten⁴⁶

Die Wiederaufbereikbaarheit (technische Reparaturfähigkeit, Prüfbarkeit, etc.) der rückgeführten Bauteile zählt zu den Voraussetzungen dieser Strategie (siehe Abbildung 12). Außerdem ist es notwendig, einen entsprechend großen Vorrat an Altteilen durch ein funktionierendes Rückführsystem zu generieren, um für die Effektivität der Wiederinstandsetzung zu sorgen. Dabei fallen natürlich hohe Transportkosten an, die als Nachteil bei dieser Versorgungsoption zu sehen sind. Erschwerend kommt weiters hinzu, dass erst einige Jahre nach EOP mit einer ausreichenden Bedarfsdeckungsmenge gerechnet werden kann, da es anfänglich i. d. R. zu weniger Ausfällen kommt. Vorteilhaft sind die geringere Umweltbelastung und die Unabhängigkeit vom Einsatz neuer Komponenten und Spezialbetriebsmitteln, die sich häufig in einem kostengünstigeren Angebot der Austauschteile bemerkbar machen.⁴⁷

⁴⁵ Vgl. Inderfurth/Kleber, 2009, S.1022

⁴⁶ Vgl. Hesselbach/Graf, 2003, S.505 ff.

⁴⁷ Vgl. Klug, 2010, S.452

Versorgungsstrategie: Wiederinstandsetzung (Reparatur)	
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederinstandsetzbarkeit der rückgeführten Altteile • Know-How und Einrichtungen zur Instandsetzung • Rückführung von Teilen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Lagerhaltungskosten • Fertigungs- und Prüfeinrichtungen müssen nicht vorgehalten werden • Separierung von der Serienproduktion • Umweltfreundliche Strategie in Hinsicht auf die Produktion
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Rücktransport notwendig • Bedarf kann für gewöhnlich nicht komplett gedeckt werden (speziell am Anfang) • Schlechte Prognostizierbarkeit der Anzahl an rückgeführten Bauteilen • Wiederinstandsetzung kann durch Bauteilabkündigungen nicht möglich sein

Abbildung 12: Details zur Versorgungsstrategie „Wiederinstandsetzung“⁴⁸

2.1.7 Vergleich und Kombination der Bereitstellungsstrategien

Die in den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.6 näher vorgestellten Versorgungsstrategien weisen alle unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf bestimmte Bewertungskriterien auf. Wie gut die wichtigsten dieser Kriterien von den einzelnen Strategien erfüllt werden, zeigt Tabelle 1 in Form einer qualitativen Bewertungsmatrix. In dieser sind die Erkenntnisse aus Kapitel 2.1 zusammengefasst und mit einer Farbcodierung in drei Ausprägungsstufen kategorisiert, um Vor- und Nachteile einfach zu erkennen.

Durch Kombination mehrerer Strategien entstehen Versorgungsszenarien, die das Ziel haben, die jeweiligen Vorteile so zu kombinieren, dass über den gesamten Nachserienzeitraum eine möglichst effiziente und zuverlässige Bereitstellung realisiert wird. Die Anwendung kann in zeitlicher Abfolge hintereinanderliegen oder parallel verlaufen. Allerdings tritt oft die Situation ein, dass durch etwaige prozessbedingte oder strukturelle Gegebenheiten (z.B. Bauteilabkündigungen, Ausmusterung von Fertigungseinrichtungen oder Strategieentscheidungen) der Zeitpunkt eines Strategiewechsels vorgegeben ist.

Mögliche Szenarien sind in Abbildung 13 zu sehen. Das in Gelb dargestellte Szenario kombiniert die Strategien „Interne Nachfertigung“ und „Endbevorratung“. Die Unsicherheit der Bedarfsprognose zu Beginn der Nachserienversorgung ist hier zu hoch, um die Wahl einer direkten Endbevorratung zu treffen. Aus diesem Grund wird zuerst intern nachgefertigt. Zu einem späteren Zeitpunkt ist es basierend auf Vergangenheitsdaten möglich, eine genauere Prognose für die Endbevorratung zu erstellen. Dadurch fallen bei einem Strategiewechsel die Lagerabweichungskosten minimal aus und eventuelle Defizite in der Auslastung werden umgangen.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Bothe, 2003, S.62

⁴⁹ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.447

Bewertungs- kriterien		Strategien der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienproduktion						
		Verwendung von Neuteilen				Verwendung von Altteilen		
Gute Erfüllung des Kriteriums		Nutzung kompatibler Teile	Endbevorratung	Interne Nachfertigung	Externe Nachfertigung	Altteile-wiederverwendung	Wieder-instandsetzung	
Mäßige Erfüllung des Kriteriums		gering (wie Serienproduktion)	gering (wie Serienproduktion)	höher als in Serienproduktion	höher als in Serienproduktion	-	-	
Schlechte Erfüllung des Kriteriums		gering	sehr hoch	mittel	mittel	mittel	mittel	
Produktionskosten		gering	gering	gering	mittel	hoch	hoch	
Lagerhaltungskosten		gering	gering	gering	mittel	hoch	hoch	
Transportkosten		gering	gering	gering	mittel	hoch	hoch	
Bedarfsprognose		Prognose nicht notwendig	langfristige Prognose notwendig	langfristige Prognose nicht notwendig	langfristige Prognose nicht notwendig	-	-	
Prognose über Rückführungsmenge		-	-	-	-	schwer möglich	schwer möglich	
Lagerfähigkeit		unproblematisch	problematisch	unproblematisch	unproblematisch	unproblematisch	unproblematisch	
Vorhalten von Fertigungseinrichtungen		nicht notwendig	nicht notwendig	notwendig	notwendig	nicht notwendig	nicht notwendig	
Entwicklung und Innovationspotential		eingeschränkt (Kompatibilität)	nicht eingeschränkt	nicht eingeschränkt	nicht eingeschränkt	nicht eingeschränkt	nicht eingeschränkt	
Abhängigkeit von Lieferanten		vorhanden	keine Abhängigkeit	vorhanden	hoch	keine Abhängigkeit	vorhanden	
Mengenflexibilität ¹		hoch	nicht vorhanden	eingeschränkt (Lieferantenverträge)	eingeschränkt (Lieferantenverträge)	eingeschränkt	eingeschränkt	
Zeitflexibilität ²		hoch	nicht vorhanden	hoch	hoch	gering	gering	
Betriebsmittelauslastung		hoch	kein Vorhalten von Einrichtungen nötig	gering	intern nicht relevant	schwankend	schwankend	
Obsoleszenz in Form von Bauteilabkündigungen		unproblematisch	unproblematisch	problematisch	problematisch	unproblematisch	problematisch	
Know-How		interne Erhaltung notwendig	nur für Produktion notwendig	interne Erhaltung notwendig	muss extern weitergegeben	für Qualitätsprüfung erforderlich	für Instandsetzung erforderlich	
Rücktransport		nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	
Bedarfsdeckung		unproblematisch	Gefahr von Über-/Unterdeckung	unproblematisch	unproblematisch	speziell anfänglich oft problematisch	speziell anfänglich oft problematisch	

¹ mengenmäßige Anpassungsfähigkeit aufgrund von verfügbaren Kapazitäten

² Fähigkeit zur laufenden zeitlichen Anpassung von Entscheidungen

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Versorgungsstrategien (eigene Darstellung)

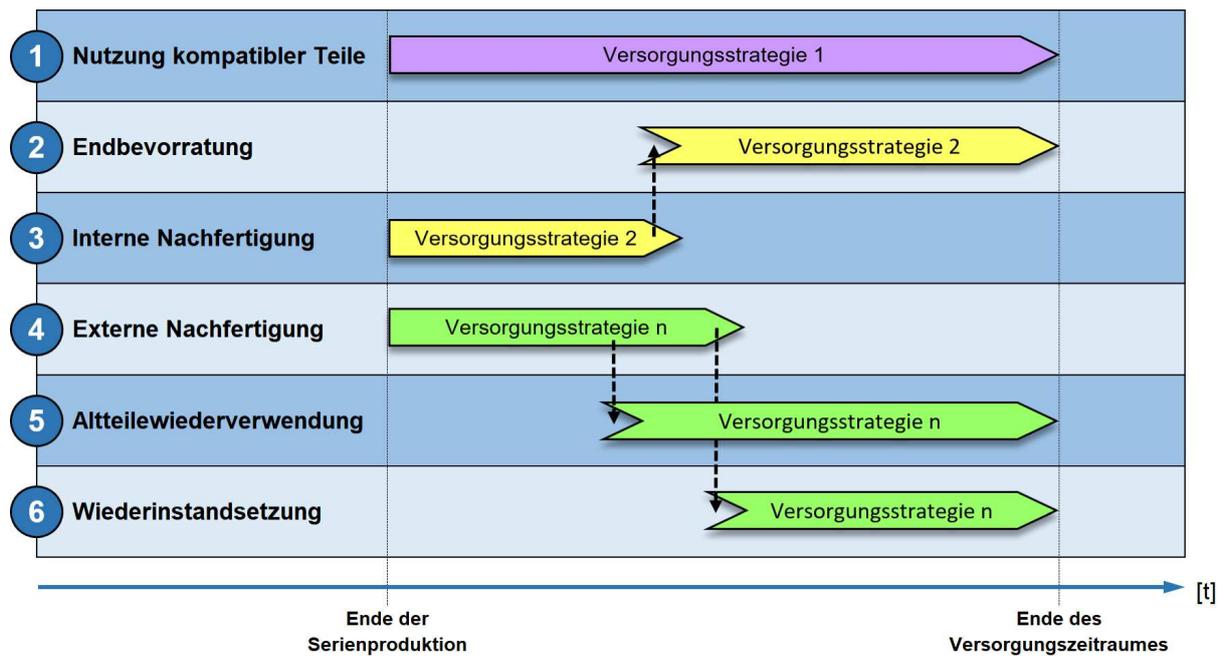


Abbildung 13: Kombination der Versorgungsstrategien zu einem Versorgungsszenario⁵⁰

2.2 Klassifikation von Ersatzteilen

Typischerweise haben produzierende Industrieunternehmen eine hohe Anzahl an verschiedenen Ersatzteilen bereitzustellen. Dabei kann es sich um mehrere zehner- oder sogar hunderttausende Artikel handeln. Bei einer solchen Menge ist es eine große Herausforderung, alleine auf das menschliche Urteilsvermögen zu vertrauen, um für jedes einzelne Teil eine geeignete Versorgungsstrategie zu wählen. Eine der Möglichkeiten, den Auswahlprozess zu unterstützen, ist es, Ersatzteile mit ähnlichen Merkmalen zu identifizieren und diese in Gruppen zu kategorisieren. Basierend auf den spezifischen Eigenschaften jeder Gruppe ist eine Zuteilung zu einer der sechs Nachserienversorgungsstrategien möglich.⁵¹

Die Kategorisierung der Ersatzteile führt zu einer Vereinfachung und aufwandsärmeren Gestaltung bei der Strategiewahl. Der Effekt dieser Maßnahme bewirkt eine Komplexitätsreduktion, die außerdem dabei hilft, den Auswahlprozess effizienter durchführen zu können. In Zeiten mit immer kürzer ausfallenden Produktentwicklungszyklen, steigender Variantenvielfalt und hohen Anforderungen an die Lieferbereitschaft ist ein besonders hoher Nutzen dieses Vorgehens naheliegend.

Generell erfolgt die Einteilung von Ersatzteilen nach qualitativen und quantitativen Kriterien. Eine Gliederung nach diesen Kategorien findet sich auch bei der näheren Beschreibung der einzelnen Differenzierungsmerkmale in diesem Kapitel wieder.

⁵⁰ Vgl. Dombrowski/Schulze, 2008, S.447

⁵¹ Vgl. Hu u.a., 2017, S.1136

Allgemein ist anzumerken, dass bei der Wahl einer Bereitstellungsstrategie viele Faktoren in die Entscheidungsfindung einfließen. Einige davon sind zeitlich variant, wodurch eine Dynamik entsteht, die es nicht zulässt, eine gültige Strategie für die gesamte Nachserie von Beginn an festzulegen. Die einzelnen Einflussgrößen müssen immer wieder überprüft werden. Gegebenenfalls muss eine Anpassung der Klassifizierung und dadurch in weiterer Folge auch eine Anpassung der Versorgungsvariante vorgenommen werden. Dieser Vorgang ist auf keinen Fall zu vernachlässigen.⁵²

2.2.1 Ersatzteilklassifikation nach qualitativen Kriterien

2.2.1.1 Kritikalität

Die Kritikalität ist eines der wichtigsten Merkmale bei der Klassifizierung von Ersatzteilen. Daher ist sie bei der Untersuchung von Bauteilcharakteristiken durch Ersatzteillogistiker meist eine der Eigenschaften, die zu Beginn eruiert wird. Sie ist abhängig von den verursachten Auswirkungen, die beim Versagen eines Bauteils während des Betriebes entstehen, wenn kein sofortiger Ersatz bereitgestellt werden kann. Mithilfe der Kritikalität wird festgelegt, ob ein Bauteil als funktionskritisch bzw. als funktionsunkritisch einzustufen ist. Als funktionskritisch (oder auch nur als kritisch bezeichnet) ist eine Komponente dann zu bewerten, wenn ihr Versagen einem Totalausfall der Anlage gleicht. Dadurch können Kosten entstehen, die ein Vielfaches des Wertes der ausgefallenen Komponente übersteigen. Während der Ausfall eines funktionskritischen Bauteils zum Stillstand des gesamten Systems führt, beeinflusst der Ausfall eines funktionsunkritischen Bauteils die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems nicht. Schwierigkeiten treten oft bei der Abgrenzung zwischen den beiden Bereichen auf. Diese muss jedoch genauestens überlegt sein, da sie in weiterer Folge starke Auswirkungen auf die Wahl der Versorgungsstrategie hat.^{53, 54}

Theoretisch besteht eine Möglichkeit darin, die Kritikalität durch die entstehenden Kosten bei Maschinenstillstand zu quantifizieren. In der Praxis ist diese Abschätzung aber meist nur schwer möglich. Für eine geeignete Klassifizierung ist dieses Vorgehen jedoch nicht zwingend notwendig, da eine Einteilung in nur wenige Kategorien ausreichend ist. Dabei kann Bezug auf verschiedene Parameter (z.B. Stillstandszeiten, Ausfallfolgekosten oder Vorhersagefähigkeit eines Ausfalls) genommen werden. Im Zuge dieser Arbeit wird die Kritikalität anhand jener Zeit gemessen, in der ein Ersatz des fehlerhaften Bauteils erfolgen muss, um eine Wiederaufnahme des normalen Betriebs zu gewährleisten.

⁵² Vgl. Knigge/Rosentritt, 2009, S.1147

⁵³ Vgl. Schuh/Stich/Wienholdt, 2013, S.171 f.

⁵⁴ Vgl. Huiskonen, 2001, S.129

Dazu erfolgt eine Einteilung in drei Kategorien:

- 1) Sehr kritisch: Das Ersatzteil muss sofort bereitgestellt werden, um den Betrieb fortsetzen zu können.
- 2) Kritisch: Der Betrieb kann temporär ohne das ausgefallene Bauteil weitergeführt werden. Ein Ersatz muss innerhalb eines kurzfristigen Zeitraums gewährleistet werden, um den Betrieb fortsetzen zu können
- 3) Unkritisch: Bei einem Bauteilausfall wird der Betrieb nicht direkt beeinflusst. Eine Bereitstellung des Ersatzteils kann auch erst nach einem längeren Zeitraum erfolgen und der Betrieb kann durchgehend ohne Probleme fortgesetzt werden.⁵⁵

Ein Auto dient an dieser Stelle zur Veranschaulichung dieser Kategorien. Bremsleitungen fallen hierbei in die Kategorie *sehr kritisch*, da ohne sie ein Betrieb nicht möglich ist. Als *kritisch* wäre z.B. die Lichtmaschine einzustufen. Ist diese defekt, wird die Batterie nicht geladen und somit ist ein Betrieb erst nach einer gewissen Zeit (bis die Batterie entladen ist) nicht mehr möglich. Teile wie ein defekter Fensterheber oder ein kaputter Heckscheibenwischer haben keinen direkten Einfluss auf den Betrieb und können daher als *unkritisch* betrachtet werden.

2.2.1.2 Obsoleszenzrisiko

Unter Obsoleszenz (lat.: *obsolescere*, sich abnutzen, veralten) wird die frühzeitige Alterung bzw. Funktionsunfähigkeit von Bauteilen vor Ablauf der üblichen Nutzungsdauer verstanden. Produkte werden dadurch unbrauchbar. Dieser Effekt kann aufgrund natürlicher oder künstlicher Gegebenheiten hervorgerufen werden. Im Allgemeinen wird zwischen drei Arten von Obsoleszenz unterschieden:

- Werkstoffliche Obsoleszenz: Diese wird durch eine mangelnde Leistungsfähigkeit des Materials hervorgerufen. Beispielsweise sind eine Verschlechterung der Festigkeit oder eine Abweichung der Passform aufgrund von Korrosion Anzeichen einer Produktalterung. Ein künstliches Auftreten dieser Art der Obsoleszenz kann z.B. durch die gezielte Einbringung von Sollbruchstellen schon während des Designs ausgelöst werden.
- Funktionale Obsoleszenz: Die zweite Art der Obsoleszenz wird durch sich rasch verändernde technische sowie funktionale Anforderungen induziert. Ein Beispiel sind Produktinnovationen, die einen neuen Zusatznutzen im Vergleich zum Vorgängermodell liefern und dieses somit unbrauchbar machen.
- Psychische Obsoleszenz: Bei dieser Art der Obsoleszenz entsteht die vorzeitige Alterung aufgrund von neuen Trends (technisch oder modisch) und Konsummustern (z.B. Facelift eines Autos)⁵⁶

⁵⁵ Vgl. ebenda

⁵⁶ Vgl. Bertling u.a., 2014, S.60 f.

Der *Verein Deutscher Ingenieure (VDI)* hat in der Richtlinie VDI 2882 Obsoleszenz wie folgt definiert:

„Obsoleszenz bedeutet, dass eine Komponente, eine Baugruppe oder ein komplettes Produkt (wie auch Prozesse, Materialien, Software, Produktionseinrichtungen usw.) während der Nutzungsdauer nicht mehr verfügbar ist.“⁵⁷

Begründet wird diese Unverfügbarkeit durch die rapide wachsende Anzahl an Innovationen sowie den vermehrten Einsatz von Elektronikkomponenten (hier kommt es speziell bei Halbleiterbauteilen sehr oft zu Abkündigungen) in der Investitionsgüterindustrie.⁵⁸ Diese Definition des VDI soll als Grundlage für spätere, das Obsoleszenzmanagement betreffende, Abschnitte dieser Arbeit dienen.

Als Teil des Risikomanagements hat sich das Obsoleszenzmanagement etabliert. Aufgabe ist es, vor allem Bauteilabkündigungen und Obsoleszenz von Fertigungseinrichtungen zu betrachten und Folgen für die eigene Produktion abzuleiten sowie Bauteile mit einem erhöhten Abkündigungsrisiko bereits in der Entwicklung zu vermeiden bzw. Strategien für den Fall einer Abkündigung festzulegen.⁵⁹

Das Obsoleszenzrisiko soll im Zuge dieser Arbeit ebenfalls in drei Kategorien eingeteilt werden:

- 1) Hohes Obsoleszenzrisiko
- 2) Mittleres Obsoleszenzrisiko
- 3) Geringes Obsoleszenzrisiko

Die genaue Bewertung und Zuteilung von Bauteilen in diese Kategorien wird an diesem Punkt nicht näher beschrieben, da dies i. d. R. durch das Obsoleszenzmanagement geschieht. Die Verfügbarkeit der Klassifikationsdaten wird somit als gegeben angenommen.

2.2.1.3 Ausfall- und Verschleißverhalten

Wie bereits zu Beginn des zweiten Kapitels erläutert, ist nach DIN 31051 eine Differenzierung von Ersatzteilen in Reserve-, Verbrauchs- und Kleinteile möglich. Für die Klassifikation des Verschleißverhaltens ist diese Unterscheidung maßgebend.

Während Verbrauchsteile einem normalen Verschleiß unterliegen, der aufgrund von Beobachtungen des Abnutzungsvorrates eines Bauteiles bzw. durch statistische Vergangenheitsinformationen relativ gut vorhersagbar ist, besitzen Reserveteile ein zufallsbedingtes Verschleißverhalten, das nur schwer prognostizierbar ist.⁶⁰

⁵⁷ Verein Deutscher Ingenieure, 2018, S.2

⁵⁸ Vgl. ebenda

⁵⁹ Vgl. Dombrowski/Horatzek/Wrehde, 2005a, S.126

⁶⁰ Vgl. Biedermann, 2008, S.3

Die Unterscheidung dieser zwei Ersatzteilarten hilft bei der Umsetzung im Excel-Tool. Somit erfolgt eine Einteilung in die beiden folgenden Klassen:

- 1) Verbrauchsteile: Teile mit sukzessivem Verschleiß, der normal und vorhersehbar ist (z.B. die Abnutzung von Bremseinrichtungen oder Zahnrädern)
- 2) Reserveteile: Teile mit spontanem Verschleiß, der außergewöhnlich und stochastisch ist (z.B. der Bruch einer Antriebswelle)

Zur Feststellung, welcher Kategorie ein Bauteil zuzuordnen ist, reicht die Beantwortung der Frage, ob es sich um ein Verbrauchsteil mit geplanter Abnutzung oder um ein theoretisch wartungsfreies Teil handelt. Dazu können folgende, das Abnutzungsverhalten beeinflussende Größen zur Beurteilung herangezogen werden:

- Komponenteneigenschaften: eingesetzte Werkstoffe, konstruktive Auslegung, etc.
- Technologische Bedingungen des Einsatzes: Beanspruchungsdauer, Art der Beanspruchung, etc.
- Externe Rand- und Umfeldbedingungen: Temperatur, Staubbelastung, etc.⁶¹

Zeitliche Verläufe der Ausfallshäufigkeit werden mathematisch durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Exponential-, Weibull-, γ -, Normalverteilung, etc.) beschrieben. Dabei gibt es unterschiedliche Modelle, die in Abbildung 14 dargestellt sind.

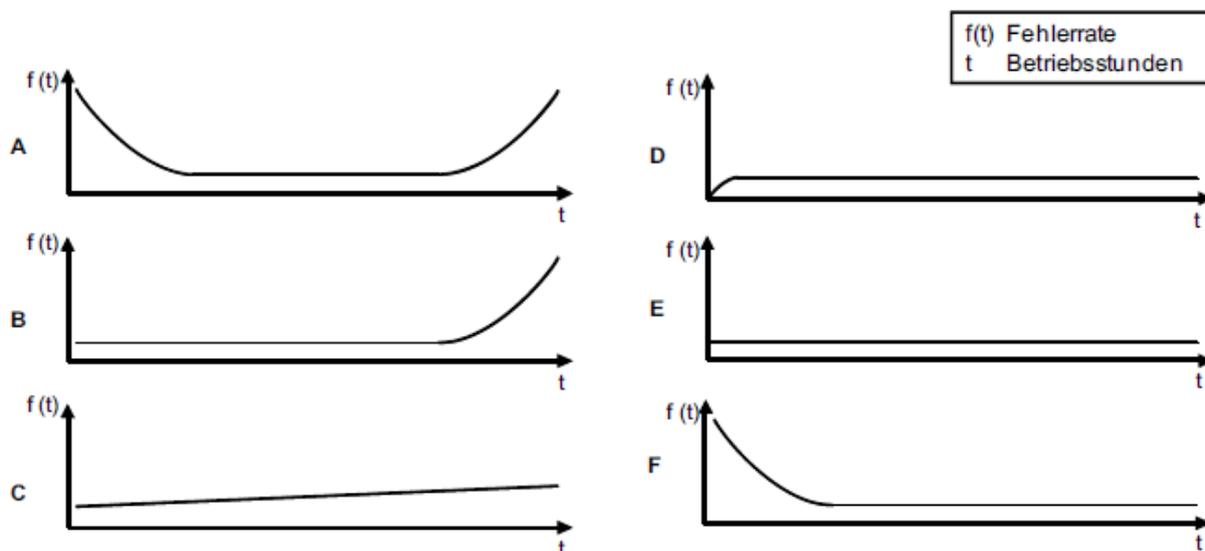


Abbildung 14: Ausfallkurven⁶²

Die in Kapitel 2.2.1.4 behandelten Lebenszyklusphasen stehen in engem Zusammenhang mit dem Ausfall- bzw. Verschleißverhalten eines Ersatzteils. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Abschnitt genauer auf die Ausfallkurven und deren Bedeutung eingegangen.

⁶¹ Vgl. ebenda, S.12

⁶² Pawellek, 2016, S.8

2.2.1.4 Lebenszyklusphase

Wie in Abbildung 14 ersichtlich, können Ausfallkurven steigende, fallende und konstante Verläufe der Ausfallsrate aufweisen. Die in Ausschnitt A dargestellte Kurve vereint alle drei Verlaufsmöglichkeiten zur sogenannten Badewannenkurve (siehe Abbildung 15). Fast alle Anlagenteile, die einer direkten Abnutzung unterliegen, weisen eine derartige Ausfallkurve auf. Abweichungen können vor allem bei komplexen Anlagen bzw. bei Anlagenteilen, die durch keine direkte Abnutzung beansprucht werden, auftreten. Dies ist in Abbildung 14 durch die Kurven B bis F ersichtlich. Speziell Verlauf F hat bei komplexen Systemen, wie sie z.B. in der Luftfahrtindustrie anzutreffen sind, eine hohe Relevanz. Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa zwei Drittel aller untersuchten Geräte dieses Sektors einem solchen Muster unterliegen.⁶³

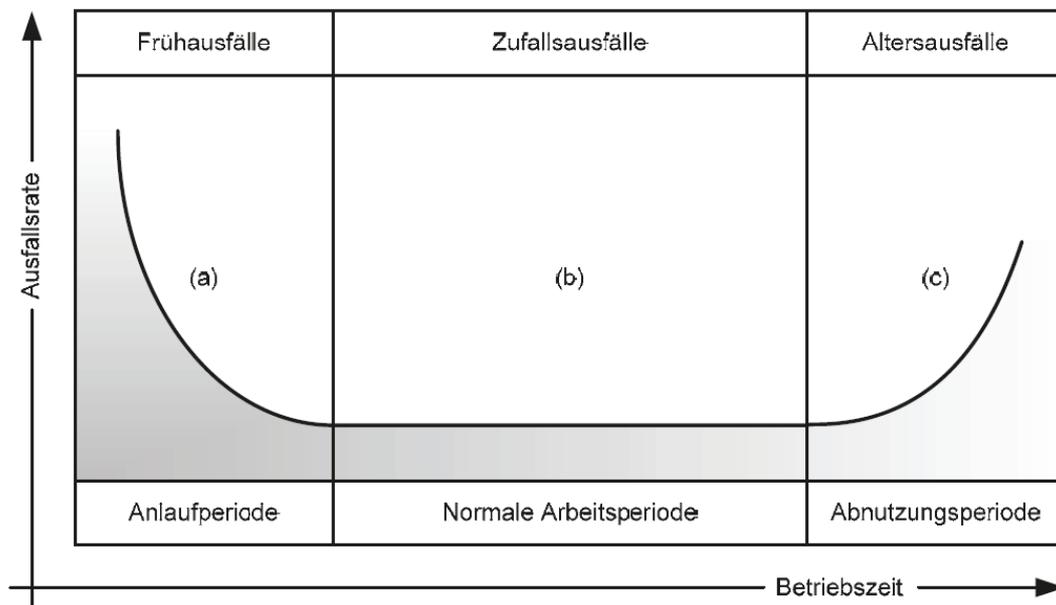


Abbildung 15: Klassische Badewannenkurve⁶⁴

Bei Betrachtung der Lebenszyklusphasen eines Ersatzteils ist ein direkter Zusammenhang mit den einzelnen Abschnitten einer Ausfallkurve zu erkennen. Es wird zwischen drei Phasen unterschieden, die anhand des Beispiels der Badewannenkurve nachfolgend näher erläutert werden:

- 1) Anlaufperiode: Frühausfälle, die beispielsweise durch Konstruktions- oder Fertigungsfehler entstehen, treten zu Beginn der Betriebszeit auf (sogenannte Kinderkrankheiten). Durch Verbesserungsmaßnahmen nimmt die Ausfallsrate in dieser Phase mit fortlaufender Zeit ab, woraus eine Steigerung der Zuverlässigkeit resultiert.
- 2) Arbeitsperiode: Während dieser Phase, die den Großteil der Lebensdauer abdeckt, ist die Ausfallsrate nahezu konstant. Das Zusammenwirken mehre-

⁶³ Vgl. Matyas, 2016, S.42 ff.

⁶⁴ Ebenda, S.42

rer, ungünstiger Umstände führt zu zufälligen Ausfällen, die unabhängig vom Bauteilalter und nicht vorhersehbar sind.

- 3) Abnutzungsperiode: Altersausfälle, die meist durch Verschleiß (Abnutzungerscheinungen) bedingt sind, bewirken ein Zunehmen der Ausfallsrate und somit eine Verringerung der Zuverlässigkeit.⁶⁵

Bei der Umsetzung im Excel-Modell werden diese drei Phasen zur Klassifikation herangezogen. Um eine passende Einteilung zu treffen, können sowohl Vergangenheitsdaten der Bauteile als auch Daten über deren Alter herangezogen werden.

2.2.1.5 Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit

Entscheidend für die mögliche Anwendung von Strategien der Nachserienversorgung, die auf der Rückführung von Altteilen beruhen (Altteilewiederverwendung und Wiederinstandsetzung), ist die Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit der Teile. Ist diese nicht gegeben, muss auf andere Bereitstellungsstrategien ausgewichen werden.

Bei Ersatzteilen, die in Form einer höheren Fertigungsstufe (z.B. Baugruppe) vorliegen, spielt speziell das Thema der Zerlegbarkeit eine große Rolle. Beispielsweise können Verklebungen oder Schweißstellen einen Behinderungsgrund darstellen. Ist die Zerlegbarkeit absichtlich nicht gegeben, handelt es sich eventuell um geplante Obsoleszenz. Aber auch das Vorhandensein von Bearbeitungs- und Prüfeinrichtungen sowie dem geeigneten Know-How sind Voraussetzungen für die Reparierbarkeit.

Zur Klassifikation ist die Bildung von zwei Kategorien ausreichend:

- 1) Aufarbeit- bzw. reparierbare Teile: Baugruppen müssen zerlegbar sein und unternehmensinterne als auch bauteilspezifische Voraussetzungen müssen erfüllt sein.
- 2) Nicht aufarbeit- bzw. reparierbare Teile: Teile, die nicht in Kategorie 1) fallen. Hier sind auch Teile, bei denen eine Reparatur unwirtschaftlich ausfallen würde, hinzuzuzählen (z.B. Kleinteile).

2.2.1.6 Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad

Die Fertigungsstufe eines Ersatzteils gibt im Wesentlichen Rückschluss auf zwei Ersatzteileigenschaften:

- Die Höhe der Kapitalbindung im Lager
- Die Lagerfähigkeit der Teile⁶⁶

Diese beiden Eigenschaften werden in den Abschnitten 2.2.2.1 und 2.2.2.5 näher betrachtet und dienen jeweils als separates Klassifikationskriterium. Nichtsdestotrotz

⁶⁵ Vgl. ebenda, S.43

⁶⁶ Vgl. Bothe, 2003, S.72 ff.

werden die Daten zur Feststellung des Wertschöpfungsgrades im Excel-Modell verarbeitet und eine eigene Gruppierung nach diesem Kriterium vorgenommen. Dadurch ist bei Auftreten eines Datenmangels in Bezug auf Kapitalbindung und Lagerfähigkeit trotzdem eine grobe Abschätzung der Klassenzuteilung möglich.

Folgende Fertigungsstufen werden in dieser Arbeit unterschieden:

- 1) Einzelteile (z.B.: Schutzblech)
- 2) Baugruppen/Module (z.B.: Lager oder Getriebe)
- 3) Systeme/Produkte (z.B.: Kühlsystem oder fertiges Produkt)

Vor- und Nachteile hinsichtlich der unterschiedlichen Fertigungsstufen sind in Abbildung 16 ersichtlich.

	Hohe Fertigungsstufe (z.B. Baugruppe)	Niedrige Fertigungsstufe (z.B. Bauelement)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Lagerfähigkeit • Einfacher Ein- und Ausbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Kapitalbindung im Lager • Lediglich Vorhaltung von ausfallverursachenden Teilen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kapitalbindung • Auch ausfallsichere Teile sind im Ersatzteil enthalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechtere Lagerfähigkeit • Komplizierter Ein- und Ausbau (evtl. Spezialwerkzeuge notwendig)

Abbildung 16: Vor- und Nachteile von Ersatzteilen in Abhängigkeit ihrer Fertigungsstufe⁶⁷

2.2.1.7 Beschaffungsbedingungen

Zu den Beschaffungsbedingungen zählen u.a. die folgenden Größen:

- Wiederbeschaffungszeit
- Beschaffungskosten
- Bestellbedingungen (z.B. Zahlungskonditionen oder Art der Auftragserteilung)
- Bestellrestriktionen (z.B. Mindestbestellmengen)⁶⁸

Für die Klassifikation nach den Beschaffungsbedingungen muss der Hersteller sowohl eine Beurteilung aus eigener Sicht (für Zukaufteile) als auch aus Sicht des Kunden (für Verkaufsteile) durchführen. Da die Kundenverträge natürlich erheblichen Einfluss auf die Art der Ersatzteilbereitstellung haben, ist dies unerlässlich.

Die Klassifikation ist sehr kundenspezifisch und von mehreren Faktoren abhängig, weshalb eine Einteilung nach den folgenden Gruppen als gegeben betrachtet wird:

- 1) Gute Beschaffungsbedingungen
- 2) Befriedigende Beschaffungsbedingungen
- 3) Schlechte Beschaffungsbedingungen

⁶⁷ Vgl. Herrmann, 2010, S.357

⁶⁸ Vgl. Schuh/Stich/Wienholdt, 2013, S.181

2.2.2 Ersatzteilklassifikation nach quantitativen Kriterien

2.2.2.1 Lagerbestandswert und Anzahl der Lagerabgänge (ABC-Analyse)

Die ABC-Analyse zählt zu den am häufigsten angewandten Verfahren zur Klassifikation von Produkten. Sie unterliegt dem sogenannten Prinzip von Pareto, das besagt, dass 80% einer Kennzahl (z.B. Umsatz) durch 20% des Artikelspektrums ausgemacht werden. Dadurch ist es möglich, die Planung so zu gestalten, dass das Hauptaugenmerk auf jenem kleinen Anteil der Produkte liegt, der den größten Einfluss auf die betrachtete Größe hat.⁶⁹

Eine Anwendung der ABC-Analyse ist auf die verschiedensten Kennzahlen möglich. Dazu zählen beispielsweise logistische Größen (Umschlagshäufigkeit, Bestand, etc.), Produkteigenschaften (Gewicht, Abmessungen, etc.), monetäre Größen (Umsatzanteil, Wert, Lagerhaltungskosten, etc.) oder Kombinationen davon. Für die Klassifikation der Ersatzteile wird die ABC-Analyse in dieser Arbeit auf die folgenden Größen angewandt:

- Anzahl der Lagerabgänge (Identifikation von Schnell- und Langsamdrehern)
- Lagerbestandswert

Wie durch den Namen bereits ausgedrückt, erfolgt die Einteilung in A-, B- und C-Teile. Bezogen auf den Lagerbestandswert hat sich in der Praxis der Ersatzteilwirtschaft folgende Mengen- zu Wertverteilung als relativ konstant erwiesen:

- 1) **A-Teile:** 20% des Bestandes binden 70-80% des Gesamtlagerwertes
I. d. R. sind dies Teile, deren Ausfall hohe Kosten verursacht und die an nur einem Ort gelagert werden.
- 2) **B-Teile:** 30% des Bestandes binden 10-15% des Gesamtlagerwertes
Typischerweise handelt es sich dabei um Mehrort-Normteile, die durch klassische Standardmaschinenbaugruppen (z.B. Motoren, Getriebe, Pumpen, etc.) repräsentiert werden.
- 3) **C-Teile:** 50% des Bestandes binden 10-15% des Gesamtlagerwertes
In diese Kategorie der Ersatzteile fallen üblicherweise Klein- und Verschleißteile.⁷⁰

Die genauen Abgrenzungswerte für die Analyse können im Excel-Tool durch manuelle Eingabe eigenständig festgelegt werden, um auf verschiedene Situationen flexibel und zweckmäßig reagieren zu können.

Trägt man den kumulierten Anteil einer Kennzahl (in Prozent) über die kumulierte Anzahl der Artikel (in Prozent) auf, so ergibt sich eine Lorenzkurve. Dies ist anhand

⁶⁹ Vgl. Alicke, 2005, S.29

⁷⁰ Vgl. Biedermann, 2008, S.82 f.

eines Praxisbeispiels in Bezug auf die Anzahl der Lagerabgänge in Abbildung 17 dargestellt.

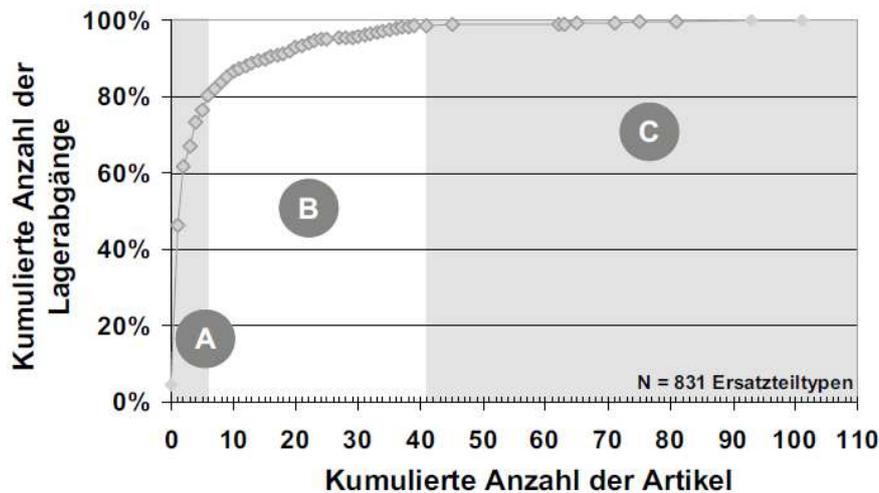


Abbildung 17: Praxisbeispiel einer ABC-Analyse bezogen auf die Anzahl der Lagerabgänge⁷¹

2.2.2.2 Prognostizierbarkeit des Bedarfs (XYZ(S)-Analyse)

Eine geeignete Methode zur Beurteilung der Prognostizierbarkeit des Bedarfs eines Ersatzteiles liefert die XYZ(S)-Analyse. Teilmengen werden anhand ihrer Verbrauchsstruktur so gewichtet, dass drei bzw. vier Gruppen entstehen. Klassisch erfolgt die Einteilung in X-, Y- und Z-Teile. Erstere sind durch einen annähernd konstanten und gut vorhersehbaren Verbrauch gekennzeichnet. Y-Teile unterliegen bereits etwas größeren Verbrauchsschwankungen (z.B. durch saisonale Einflüsse), die i. d. R. jedoch ebenfalls gut vorhersagbar sind. Ein komplett unregelmäßiger Verbrauch und somit auch eine nahezu unmögliche Einschätzung des zukünftigen Ersatzteilbedarfs wird durch Z-Teile beschrieben.⁷² Diese drei Kategorien können um eine zusätzliche Ausprägung erweitert werden – die Kategorie der sogenannten S-Teile. Ihr Bedarf ist nur sporadisch und es gibt auch Perioden mit Nullbedarfen.⁷³

Zur Abgrenzung der einzelnen Bereiche dient z.B. der Variationskoeffizient V . Dieser lässt sich wie folgt berechnen:⁷⁴

$$V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}} \quad \text{mit} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Formel 1: Bestimmung des Variationskoeffizienten V

Dabei ist n die Anzahl der betrachteten Perioden und x_i der jeweilige Periodenbedarf.

⁷¹ Schuh/Stich/Wienholdt, 2013, S.179

⁷² Vgl. Pawellek, 2016, S.324

⁷³ Vgl. Aliche, 2005, S.31

⁷⁴ Vgl. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: XYZ-Analyse, Der Variationskoeffizient (09.10.2002), http://www.uni-magdeburg.de/bwl6/logedugate/pwl_abcanalyse/content/pw_abc10a.htm (zugegriffen am: 09.03.2019)

Auch hier kann eine manuelle Eingabe bezüglich der genauen Abgrenzungen der einzelnen Klassen sowie deren Anzahl (drei oder vier) im Excel-Tool umgesetzt werden, um eine flexible und zweckmäßige Reaktion auf verschiedene Situationen zu ermöglichen. Die Einteilung kann beispielsweise folgendermaßen aussehen:

- 1) X-Teile: Der Variationskoeffizient V liegt bei: $0\% < V \leq 20\%$
- 2) Y-Teile: Der Variationskoeffizient V liegt bei: $20\% < V \leq 70\%$
- 3) Z-Teile: Der Variationskoeffizient V liegt bei: $70\% < V$
- 4) S-Teile: Der Nullperiodenanteil liegt bei: $> 30\%$

Abbildung 18 zeigt eine schematische Darstellung einer XYZ(S)-Analyse. Auf der Ordinate ist der Variationskoeffizient (in Prozent) und auf der Abszisse der Mengenanteil (in Prozent) aufgetragen. In diesem Beispiel sind 20% der Artikel S-Teile.

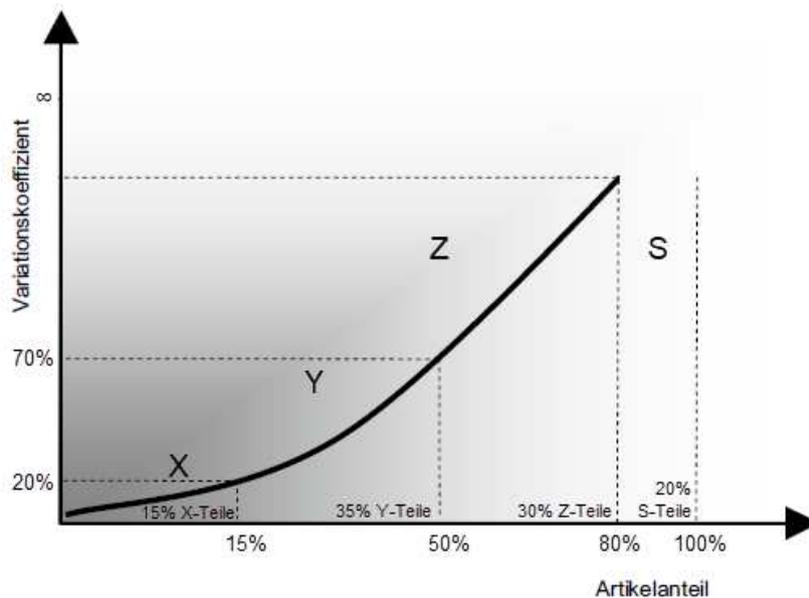


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer XYZ(S)-Analyse⁷⁵

2.2.2.3 Ersatzteilvermögen (GMK-Analyse)

Zur Klassifikation der Ersatzteile nach ihrem Volumen wird die GMK-Analyse herangezogen. Die Einteilung erfolgt in drei Kategorien:

- 1) G-Teile: Großvolumige Teile
- 2) M-Teile: Mittelvolumige Teile
- 3) K-Teile: Kleinvolumige Teile

Üblicherweise wird die GMK-Analyse zur Dimensionierung und Optimierung von Lagervolumina oder Transportkapazitäten verwendet. Dazu werden die einzelnen Teile nicht nach festen Werten eingeteilt, sondern anhand der relativen Größe in Bezug auf die Gesamtmenge aller Teile (ähnlich der ABC-Analyse).⁷⁶

⁷⁵ Vgl. Stich/Hering/Brosze, 2013, S.86

⁷⁶ Vgl. Wannewetsch, 2007, S.86 f.

Für die Umsetzung im Excel-Tool kommen jedoch fixe Grenzen zum Einsatz. Diese richten sich nach der maximalen Bauraumgröße des verwendeten 3D-Druckers und nach den Abmessungen einer Europoolpalette (1200 mm x 800 mm).

K-Teile sind somit jene Teile, deren Volumen geringer dem maximalen Bauraumvolumen des verwendeten 3D-Druckers ist. Haben die Ersatzteile ein Volumen, das größer als das maximale Bauraumvolumen des 3D-Druckers ist, jedoch die maximale Transportkapazität einer Europoolpalette nicht übersteigt, so erfolgt eine Zuteilung zu den M-Teilen. Jener Volumenbereich, der Teile umfasst, die nicht mehr auf Europaletten transportiert werden können, wird den G-Teilen zugeschrieben.

Durch die Wahl dieser Grenzen dient die GMK-Analyse zur Überprüfung eines wichtigen Kriteriums bezüglich der Herstellbarkeit eines Ersatzteils mittels additiver Fertigung. Außerdem kann aufgrund der Abgrenzung zwischen M- und G-Teilen unter Berücksichtigung der abgeschätzten Transport- und Lagerkosten eine Empfehlung für bestimmte Versorgungsstrategien ausgesprochen werden (z.B. ist die Endbevorratung von G-Teilen aufgrund erhöhter Lagerkosten vergleichsweise nachteilig).

2.2.2.4 Ersatzteilbedarf

Während die ABC-Analyse (bezogen auf die Anzahl der Lagerabgänge) auf Vergangenheitsdaten zurückgreift, beschreibt dieser Abschnitt mögliche Ursachen für das Auftreten verschiedener Bedarfe in der Zukunft.

Der Ersatzteilbedarf darf nicht als isolierte Größe gesehen werden. Er ergibt sich vielmehr aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Faktoren, die ihn beeinflussen:

- Installierte Basis an Primärprodukten
- Zukünftiger Planverkauf von Primärprodukten
- Nutzungsintensität der Primärprodukte
- Angewandte Instandhaltungsstrategien der Betreiber
- Produktausfallkurven ähnlicher Produkte oder aus der Vergangenheit
- Frühinformationen zu Verschleiß durch Inspektionen⁷⁷

Dies sind Beispiele für einige der Informationen, die bei einer Prognose berücksichtigt werden müssen. Gekoppelt mit Bedarfsplanungsmethoden wie beispielsweise dem gleitenden Mittelwert, der Regressionsanalyse oder der exponentiellen Glättung öffnet sich ein eigener Forschungsbereich, der sich mit diesem Themengebiet auseinandersetzt. Aus diesem Grund werden Daten zu absoluten Zahlen bezüglich des Ersatzteilbedarfs als gegeben vorausgesetzt.

⁷⁷ Vgl. Pfohl, 2018, S.241

Vergangenheitsdaten sind i. d. R. wesentlich einfacher zu akquirieren als Prognosewerte, weshalb auf die ABC-Analyse nicht verzichtet wird. Falls Daten vorhanden sind, besteht die zusätzliche Eingabemöglichkeit der Bedarfszahlen im Excel-Tool. Die Definition der Klassifizierungsbereiche erfolgt individuell auf das jeweilige Unternehmen bezogen, da die Absatzzahlen stark branchenabhängig sind. Angelehnt an die ABC-Analyse wird hier ebenfalls eine Einteilung in drei Klassen empfohlen. Bei Bezeichnung des Ersatzteilbedarfs mit der Variable x kann dies z.B. folgendermaßen aussehen:

- 1) Geringer Bedarf: $x \leq 100$ Stück/Quartal
- 2) Mittlerer Bedarf: $100 \text{ Stück/Quartal} < x \leq 1000$ Stück/Quartal
- 3) Hoher Bedarf: $x > 1000$ Stück/Quartal

2.2.2.5 Lagerfähigkeit

Bei der Einlagerung von Bauteilen ist die Lagerfähigkeit ein weiteres Kriterium, das in Betracht gezogen werden muss. Abhängig von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen sowie den Eigenschaften des Bauteils selbst kann diese unterschiedlich ausgeprägt sein.

Wie unter Punkt 2.2.1.6 bereits beschrieben, ist die Fertigungsstufe eines Erzeugnisses einer der bauteilspezifischen Parameter, welcher mitbestimmend für dessen Lagerfähigkeit ist. So weisen Baugruppen i. d. R. eine bessere Lagerfähigkeit als Einzelteile auf. Aus technologischer Sicht sind elektronische gegenüber mechanischen Ersatzteilen generell als kritischer einzustufen. Während der Lagerung können beispielsweise durch Korrosion, Fließen oder Oxidation Schäden an Bauteilen entstehen, die zu einer begrenzt möglichen Lagerdauer führen. Abhilfe kann durch spezielle Lagerbedingungen geschaffen werden. Dazu zählen u.a. UV-Schutz, Regulation der Luftfeuchtigkeit (z.B. Verwendung von Drypacks), spezielle Lagerbehälter zum Schutz vor mechanischen Beschädigungen oder Klimatisierung/Heizung des Lagerraumes. Auch Behandlungen der zu lagernden Ersatzteile können deren Lagerfähigkeit erhöhen (z.B. Ölen von metallischen Bauteilen, um Korrosion zu verhindern). Die erwähnten Maßnahmen sind jedoch zumeist mit intensiven Kosten und erhöhtem Aufwand verbunden. Zusätzlich muss bei kritischen Bauteilen auch die Funktionsfähigkeit nach Ende der Lagerung mithilfe geeigneter Prüfvorrichtungen getestet werden, um einen problemlosen Einsatz zu garantieren.⁷⁸

Für die Implementierung im Excel-Tool werden drei Kategorien der Lagerfähigkeit verwendet:

- 1) Voll lagerfähig: Es treten keine beeinträchtigenden Schäden durch eine dauerhafte Lagerung auf und das Ersatzteil ist somit uneingeschränkt lagerfähig.

⁷⁸ Vgl. Bothe, 2003, S.72 ff.

- 2) Eingeschränkt lagerfähig: Eine eingeschränkte Lagerfähigkeit liegt vor, wenn das Bauteil nicht beliebig lange, jedoch länger als jene Zeitspanne gelagert werden kann, die zwischen der theoretischen Nachfertigung zweier Lose liegt.
- 3) Nicht lagerfähig: Ist das Ersatzteil kürzer lagerfähig als jene Zeitspanne, die zwischen der theoretischen Nachfertigung zweier Lose liegt, zählt es als nicht lagerfähig.

Die Zeitspanne zwischen zwei Fertigungslosen ist dabei natürlich von der Bestellmenge sowie dem Bedarf abhängig. Das Minimum dieser Dauer ergibt sich durch eine oft vorherrschende Mindestbestellmenge, die den Bedarf über einen gewissen Zeitraum abdeckt.

Für die Zuordnung eines Ersatzteils in eine der drei Klassen muss eben erwähnter Zeitraum mit der zugehörigen Lagerfähigkeit in quantifizierter Form verglichen werden. Dabei kann die Bestimmung der Lagerfähigkeit durch Erfahrungswerte bzw. empirische Ermittlung eruiert werden. Dieser Wert wird als verfügbar angenommen.

2.2.2.6 Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts

Führt das Versagen eines Bauteils zum Ausfall des Primärprodukts, entstehen unweigerlich zusätzliche Kosten aufgrund verschiedener Aspekte. Spezielle Aufmerksamkeit sollte den Ausfallfolgekosten gewidmet werden, da diese eng im Zusammenhang mit der Stillstandszeit einer Anlage stehen. Ersatzteile, die für den ungestörten Betrieb einer ausfallfolgekostenintensiven Anlage verantwortlich sind, genießen folglich eine höhere Priorität.⁷⁹

Einen großen Einfluss auf die Höhe der Ausfallfolgekosten hat die Einbindung der betroffenen Anlage in den Produktionsprozess. Erfolgt ein Einsatz beispielsweise im Taktbetrieb eines Fließbandprozesses, so besteht eine hohe Abhängigkeit der Maschinen untereinander. Aufgrund der verketteten Anlagen wirkt sich der Ausfall einer Maschine oft auch auf die vor- bzw. nachgelagerten Einheiten aus. In diesem Fall sind dem verursachenden Bauteil äußerst hohe Ausfallfolgekosten zuzuteilen. Viele Unternehmen ziehen den Maschinenstundensatz multipliziert mit der Stillstandszeit als Berechnungsgrundlage heran.⁸⁰ Ein großer Anteil der Kosten, die durch den Ausfall einer Anlage entstehen, sind im Stundensatz der Maschine jedoch nicht enthalten. Dazu zählen u.a.:

- Entgangene Deckungsbeiträge auf dieser sowie der gesamten Anlage
- Strafzahlungen für verspätete Fertigstellung und Anlieferung der Produkte
- Kosten für Umweltschäden
- Erhöhte Instandsetzungskosten aufgrund unvorbereiteter Maßnahmen⁸¹

⁷⁹ Vgl. Schuh/Stich/Wienholdt, 2013, S.180

⁸⁰ Vgl. Pawellek, 2016, S.71 f.

⁸¹ Vgl. Matyas, 2016, S.53

Aus diesem Grund ist es in der Praxis oft schwierig, einen quantitativen Wert zu bestimmen. Eine Möglichkeit der Ausfallkostenbestimmung, die nur auf messbaren und kalkulatorisch exakt feststellbaren Komponenten beruht, ist durch folgende Formel⁸² gegeben:

$$\text{Ausfallkosten} = \text{ungenutzte Verbräuche} + \text{Erfolgsausfall}$$

Formel 2: Bestimmung der Ausfallkosten

Die ungenutzten Verbräuche sind dem Produktionsbereich zuzuschreiben und bilden den ersten Teil der Ausfallkosten. Der ausgefallenen Maschine vorgelagerte Produktionsstufen liefern nach wie vor Halbfabrikate bzw. Rohstoffe, die jedoch nicht weiterverarbeitet werden können. I. d. R. ist dieser Anteil der Ausfallkosten gut messbar. Sind nach Wiederaufnahme des regulären Betriebs zusätzliche Arbeitsstunden in Form von Überstunden notwendig, um den Produktionsrückstand aufzuholen, fallen erhöhte Lohnkosten für die Mitarbeiter an. Diese sind ein Beispiel für zusätzliche Kosten, die ebenfalls den ungenutzten Verbräuchen zugeteilt werden. Auf der Absatzseite entstehen Kosten durch den Erfolgsausfall aufgrund der versäumten Produktion möglicher Absatzmengen. Erlösminderungen und Zukauf von Fertigprodukten sind weitere Faktoren, die diesen Teil der Ausfallkosten erhöhen. Erstere können beispielsweise durch Pönalzahlungen aufgrund von Terminverzug oder durch Vergabe von Lohnaufträge an konkurrierende Unternehmen verursacht werden.⁸³

In dieser Arbeit wird für das Klassifizierungsschema der Ausfall(folge)kosten die Differenz zwischen dem kostenintensivsten und dem kostenärmsten Bauteil eines Unternehmens gebildet. Anschließend erfolgt eine Gliederung der Differenz in drei gleichgroße Bereiche. Je nachdem wie hoch die Ausfall(folge)kosten eines einzelnen Bauteils nach Formel 2 sind, erfolgt eine Zuteilung in einen der drei Bereiche:

- 1) Geringe Ausfall(folge)kosten
- 2) Mittlere Ausfall(folge)kosten
- 3) Hohe Ausfall(folge)kosten

Die Klassifikation erfolgt auf diesem Weg, da es aufgrund firmenspezifischer Faktoren äußerst schwierig ist, eine Abgrenzung durch vordefinierte Zahlenwerte festzulegen. Durch das beschriebene Vorgehen wird eine Einteilung erreicht, die in Relation zum restlichen Teilespektrum eines Unternehmens steht.

Vom Hersteller ausgelieferte Anlagen werden vom Kunden in verschiedenen Arbeitsumgebungen und in unterschiedlicher Intensität genutzt. Aus diesem Grund ist es für die Einarbeitung der Daten in das Klassifikationsmodell Voraussetzung, dass der Kunde dem Hersteller die benötigten Daten bekannt gibt.

⁸² Vgl. Biedermann, 2008, S.78

⁸³ Vgl. ebenda, S.77 ff.

2.2.3 Übersicht der Klassifikationsmerkmale

Insgesamt wurden in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 vierzehn Klassifikationsmerkmale detailliert beschrieben. Tabelle 2 fasst diese übersichtlich zusammen und lässt auf einem Blick erkennen, welche Einteilungsbereiche (Ausprägungen) für die einzelnen Merkmale gewählt wurden, um eine geeignete Implementierung in der entwickelten Demoversion des Excel-Tools (siehe Kapitel 5.2) möglich zu machen.

	Nr.	Klassifikationsmerkmal	Bereichseinteilung (Ausprägung)			
qualitative Kriterien	1	Kritikalität	sehr kritisch	kritisch	unkritisch	
	2	Obsoleszenzrisiko	hohes Obsoleszenzrisiko	mittleres Obsoleszenzrisiko	niedriges Obsoleszenzrisiko	
	3	Ausfall- und Verschleißverhalten	Verbrauchsteile mit sukzessivem Verschleiß		Reserveteile mit spontanem Verschleiß	
	4	Lebenszyklusphase	Anlaufperiode	Arbeitsperiode	Abnutzungsperiode	
	5	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	Aufarbeit- bzw. reparierbare Teile		Nicht aufarbeit- bzw. reparierbare Teile	
	6	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Einzelteile	Baugruppen/Module	Systeme/Produkte	
	7	Beschaffungsbedingungen	gute Bedingungen	befriedigende Bedingungen	schlechte Bedingungen	
quantitative Kriterien	8	Lagerbestandswert	A-Teile	B-Teile	C-Teile	
	9	Anzahl der Lagerabgänge	A-Teile	B-Teile	C-Teile	
	10	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	X-Teile	Y-Teile	Z-Teile	S-Teile
	11	Ersatzteilmengen	G-Teile	M-Teile	K-Teile	
	12	Ersatzteilbedarf	geringer Bedarf	mittlerer Bedarf	hoher Bedarf	
	13	Lagerfähigkeit	voll lagerfähig	eingeschränkt lagerfähig	nicht lagerfähig	
	14	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	geringe Kosten	mittlere Kosten	hohe Kosten	

Tabelle 2: Klassifikationsmerkmale (eigene Darstellung)

2.3 Additive Fertigung mit metallischen Werkstoffen

Seit der Erfindung des 3D-Drucks im Jahre 1983 ist eine ständige Weiterentwicklung der Druckverfahren und eine laufende Verbesserung der Fertigungstoleranzen zu beobachten. 3D-Druck stellt den Überbegriff einer Fertigungsvariante dar, für die viele verschiedene Verfahren existieren. Zudem steht heute eine Vielzahl an unterschiedlichen Materialien, die sich alle durch spezielle Eigenschaften auszeichnen, am Markt zur Verfügung. Meist sind gewisse Werkstoffe nur nach bestimmten additiven Fertigungsprozessen verarbeitbar. Die Auswahl der richtigen Kombination aus Material und 3D-Druck-Verfahren spielt somit eine sehr entscheidende Rolle für die späteren Eigenschaften des erzeugten Produkts.⁸⁴

Im Zuge dieses Kapitels wird das generelle Funktionsprinzip der additiven Fertigung vorgestellt und anschließend genauer auf das für die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen wichtige Verfahren des selektiven Laserschmelzens eingegangen. Im letzten Abschnitt werden die einsetzbaren Materialien erläutert und deren Eigenschaften genauer beleuchtet.

2.3.1 Funktionsprinzip der additiven Fertigung

Um ein 3D-Objekt aus einem am Computer mittels CAD-Software generierten Modells erzeugen zu können, muss dieses Modell im ersten Schritt in viele dünne Schichten (engl.: layer) zerlegt werden. Dieser Vorgang wird als „Slicing“ bezeichnet und dient dazu, dass der 3D-Drucker das Modell Schicht für Schicht aufbauen kann. In der Praxis bedeutet dies, dass man ein geeignetes Dateiformat generieren muss, das die Informationen der einzelnen Layer enthält. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Formate sind *.AMF* und *.STL*.

Bevor es zum tatsächlichen Druck des Modells kommt, erfolgt eine Überprüfung der Herstellbarkeit durch eine geeignete Anlagenssoftware. Diese platziert das Modell imaginär im Bauraum und fügt eventuell notwendige Stützstrukturen hinzu. Des Weiteren müssen fertigungsrelevante Parameter des 3D-Druckers (z.B. Laserleistung, Belichtungsstrategie, Schichtdicke oder Brennfleckgeometrie) eingestellt werden. Nachdem der 3D-Drucker konfiguriert ist und ihm die eingespielten Modell-daten zur Verfügung stehen, kann der Fertigungsprozess gestartet und das Produkt Schicht für Schicht, wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, aufgebaut werden.

Im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsmethoden bietet die additive Fertigung den großen Vorteil einer äußerst hohen Designfreiheit, bei der die Konstruktion nur geringfügig durch die Fertigungstechnologie eingeschränkt wird. Außerdem können kleine Losgrößen zu angemessenen Stückkosten produziert werden und ein hohes Maß der Produktindividualisierung ist möglich.

⁸⁴ Vgl. Lachmayer/Lippert, 2016, S.5

2.3.2 Selektives Laserschmelzen (SLM-Verfahren)

Das selektive Laserschmelzen (engl.: Selective Laser Melting; kurz SLM) zählt zu den laserbasierten additiven Fertigungsverfahren und wird für die Herstellung von metallischen Bauteilen angewandt. Der Aufbau des Modells wird schichtweise aus einem Pulverbett, das sich auf einer Bauplattform befindet, generiert. Je nach Ausführung kann die Plattform beheizbar sein, um den Temperaturgradienten während des Druckvorgangs möglichst gering zu halten. Dadurch können Spannungsrisse vermieden werden. Durch den Laserstrahl wird dem Metallpulver die nötige Energie zugeführt, um dieses selektiv aufzuschmelzen. Dieser Vorgang findet oft in einer Schutzgasatmosphäre (z.B. Argon) statt und bewirkt eine Verschmelzung benachbarter Teilchen an den gewünschten Stellen zu einer ersten Schicht. Das nicht belichtete Pulver bleibt lose im Bauraum. Nachdem so der erste Layer des späteren Objekts erzeugt wurde, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke (typischerweise 20-50 μm) abgesenkt und eine neue, dünne Pulverschicht mithilfe einer Rake (Abstreifer) oder einer Walze gleichmäßig aufgetragen. Nun kann der zweite Layer durch den Laserstrahl bearbeitet werden, um diesen mit dem zuvor generierten Layer zu verbinden und das Modell weiter aufzubauen. Nach und nach entsteht so das gewünschte Bauteil durch Wiederholung dieses Vorgangs. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 19 zu sehen.⁸⁵

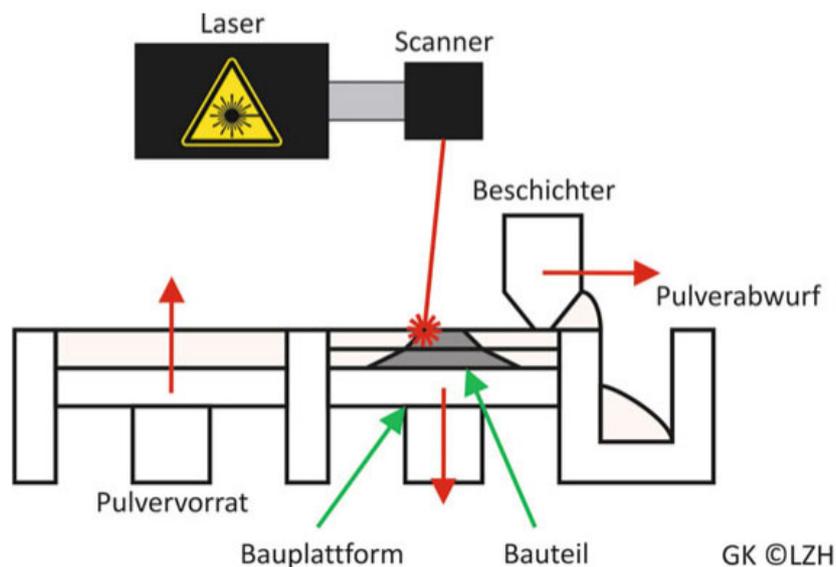


Abbildung 19: Schematische Darstellung des selektiven Laserschmelzverfahrens⁸⁶

Ist der 3D-Druck abgeschlossen, wird das gefertigte Objekt von der Bauplattform gelöst und nicht verschmolzenes Pulver entfernt. Anschließend können gegebenenfalls vorhandene Stützstrukturen, die für die Fertigung von überhängenden Strukturen (Modelle, die eine nach oben hin größere Querschnittsfläche aufweisen) notwendig sind, entfernt und Nachbearbeitungen durchgeführt werden. Beispielsweise

⁸⁵ Vgl. Gebhardt/Hötter/Fateri, 2013, S.157

⁸⁶ Gieseke u.a., 2016, S.26

kommen hier eine Oberflächenverbesserung durch Sandstrahlen oder eine Beeinflussung der Materialeigenschaften durch Wärmebehandlung zum Einsatz. Generell entstehen Teile mit nur geringer Porosität (Dichte > 99,9%) und mechanischen Eigenschaften, die gießtechnisch hergestellten Materialien ähnlich sind, da das Metallpulver bei der Bearbeitung komplett aufschmilzt.⁸⁷

Für das SLM-Verfahren existieren noch einige weitere Bezeichnungen, die sich jedoch auf denselben Prozess beziehen. Dazu zählen „Laser Metal Fusion“, „Direct Laser Metal Sintering“, „LaserCUSing“ oder „Direct Metal Printing“. Welche Bezeichnung verwendet wird, ist meist vom Anlagenhersteller abhängig.⁸⁸

Neben der Verwendung von Laserstrahlen können auch Elektronenstrahlen zum Einsatz kommen, um das Pulver zu schmelzen. Der Verfahrensablauf beim sogenannten Elektronenstrahlschmelzen (engl.: Electron Beam Melting, kurz: EBM) ist bis auf die veränderte Art der Energiezufuhr gleich zum SLM-Verfahren.

2.3.3 Pulverherstellung und verwendbare Materialien

Für die Anwendung des selektiven Laserschmelzens muss der zu verarbeitende Werkstoff in Pulverform vorliegen. Neben der Gasverdüsung zählt das Zerstäuben durch Plasma zu den gängigsten Herstellungsverfahren dieser Pulver. Beim Gasverdüsen wird der flüssige Werkstoff unter hohem Druck in eine Düse geleitet und dort durch einen Inertgasstrahl (meist Argon oder Stickstoff) zerstäubt. Durch diesen Vorgang erstarrt der flüssige Werkstoff wieder und landet in Form von sphärischen Partikeln in einer Auffangkammer am Boden der Maschine. Die Zerstäubung durch Plasma findet vor allem Anwendung für die Herstellung von hochreinen, reaktiven Metallen, die einen hohen Schmelzpunkt besitzen (z.B. Ti6Al4V). Der Werkstoff wird dabei nicht flüssig, sondern in Form eines Drahtes in den Zerstäuber eingeleitet und durch eine Plasmafackel aufgeschmolzen. Während des Absinkens des zerstäubten Materials kommt es zur Verfestigung der sphärischen Partikel.⁸⁹

Für zufriedenstellende Ergebnisse beim SLM-Verfahren sind die Pulvereigenschaften von entscheidender Bedeutung. Die Partikeldurchmesser des Metallpulvers liegen in einer Größenordnung von ca. 15-45 µm vor. Dies ist entscheidend, um eine ausreichende Auflösung bei der Fertigung zu gewährleisten. Weitere wichtige Merkmale sind eine geringe Packungsdichte, sphärische Partikelform und gute Fließfähigkeit der Pulver, um eine gleichmäßige und kalkulierbare Pulverdosierung zu erreichen.⁹⁰

⁸⁷ Vgl. Wohlers/Caffrey, 2015 (zit. nach: Wessargues u.a., 2017, S.9)

⁸⁸ Vgl. ebenda, S.10

⁸⁹ Vgl. Renishaw plc.: Metallpulver für AM (o.J),

<https://www.renishaw.de/de/metallpulver-fuer-am--31457> (zugegriffen am: 23.10.2018)

⁹⁰ Vgl. ebenda

Es gibt eine große Anzahl an Materialien, die verarbeitet werden können. Die verschiedenen Anlagenhersteller bieten diese gemeinsam mit den zur Verarbeitung nötigen Prozessparametern zum Verkauf an. Dazu zählen beispielsweise:

- Stähle
- Edelstähle (z.B. Werkstoffnummer 1.2709, 1.4543)
- Aluminium-, Kobalt-, Titan- und Chromlegierungen (z.B. AISI₁₀Mg, TiAl₆V₄, Co-Cr-Mo-Legierungen)
- Nickelbasislegierungen (z.B. IN625, IN718)
- Edelmetalle (z.B. Gold, Silber, Messing, Bronze, Kupfer)⁹¹

Mithilfe dieser Werkstoffe ist heutzutage eine Fertigung vieler Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften, die Anwendung in verschiedenen Industriesparten finden, möglich. Speziell für Leichtbauzwecke bieten sich SLM-gefertigte Produkte aus Aluminium bzw. Titan und deren Legierungen besonders gut an, da sie nur eine geringe Dichte aufweisen ($\rho_{Al} = 2,7 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Ti} = 4,5 \text{ kg/m}^3$). In Verbindung mit einer konstruktiv optimierten Geometrie, welche durch die additive Fertigung möglich ist, kann verglichen zu konventionell gefertigten Bauteilen trotz gleicher Belastbarkeit der Produkte eine erhebliche Gewichtsersparnis realisiert werden.⁹²

Der Flugzeughersteller *Airbus* verwendet das SLM-Verfahren beispielsweise in der Serienfertigung, um Kabinenhalterungen aus Titan zu produzieren. Das Ergebnis ist eine Gewichtseinsparung von 30% gegenüber dem zuvor verwendeten Bauteil.⁹³

Eine weitere positive Auswirkung hat die additive Fertigung auf die Zugfestigkeit. Während konventionell gegossenes Reintitan (Reinheitsgrad: Grad 2) eine Zugfestigkeit von 345 N/mm² aufweist, gelingt es, durch optimale Wahl der Prozessparameter diesen Wert bei SLM-gefertigten Bauteilen auf 757 N/mm² zu steigern (martensitische Gefügeumwandlung). Dieses positive Verhalten zeigt sich auch bei anderen Werkstoffen und Legierungen.⁹⁴

⁹¹ Vgl. Gebhardt, 2013, S.185 ff.

⁹² Vgl. Wessarges u.a., 2017, S.10 ff.

⁹³ Vgl. Quitter, D.: Additiv gefertigtes Titanbauteil für Airbus A350 XWB (13.11.2014), <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/additiv-gefertigtes-titanbauteil-fuer-airbus-a350-xwb-a-466780/> (zugegriffen am: 23.10.2018)

⁹⁴ Vgl. Attar u.a., 2014, S.176

3 Derzeitige Situation und Stand der Forschung

3.1 Bestehende Lösungsansätze zur Ersatzteilklassifikation

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht zum derzeitigen Stand der Wissenschaft bezogen auf die Thematik der Ersatzteilklassifikation. Auf der einen Seite beschreiben Autoren das Vorgehen, um Ersatzteile direkt nach spezifisch ausgewählten Kriterien in ein- oder mehrdimensionaler Weise einzuteilen. Auf der anderen Seite finden sich Publikationen, bei denen die Entwicklung mathematischer Modelle zur Wahl einer Nachserienversorgungsstrategie im Fokus steht. Letztere sollen hier nicht außer Acht gelassen werden, da eines der Klassifikationsziele darin liegt, die Festlegung eines geeigneten Versorgungsszenarios zu unterstützen.

Die ersten mathematischen Modelle beziehen sich auf die Problematik der Bestimmung einer entsprechenden Abschlusslosgröße für die Ersatzteilversorgung während der Nachserienphase. Unter der Annahme eines stochastischen, exponentiell fallenden Kundenbedarfs über einen genau spezifizierten Zeitraum (mit einer konstanten Rate von 0,7; d.h. der Bedarf wird mit 70% des Vorjahresbedarfs angenommen) veröffentlichte Fortuin im Jahr 1980 als erster einen solchen Modellansatz (Fortuin, 1980). Knapp 20 Jahre später präsentieren Teunter & Fortuine ein stochastisches, dynamisches Modell unter der Verwendung eines Minimalkostenansatzes. Dieses berücksichtigt zusätzlich zur Abschlusslosgröße, die über eine explizite Formel berechnet werden kann, auch eine Rücklieferung und Reparatur von Ersatzteilen. Bezüglich der Anwendbarkeit der Formel gibt es keine Einschränkungen in Hinsicht auf bestimmte Nachfrageverteilungen bzw. -muster. Die einzige Restriktion, die getroffen wird, ist eine höhere Nachfragerate im Vergleich zur Rate an rückgeführten Teilen. Eine Push-Strategie ohne Lagerhaltung wird also vorausgesetzt (Teunter & Fortuin, 1999). Zeitgleich befassen sich die beiden Autoren mit der praktischen Anwendung ihres heuristischen Modells im Bereich der Elektronikindustrie. Sie entwickeln außerdem eine auf Vergangenheitsdaten basierende Methode zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des zukünftigen Bedarfs einer Komponente zum Zeitpunkt der Abschlusslosbestellung (Teunter & Fortuin, 1998). Im Jahr 2003 konzentrieren sich Spengler & Schröter darauf, ein Systemdynamikmodell zur Steuerung einer geschlossenen Lieferkette („Closed-loop Supply Chain“) zu entwickeln. Verschiedene Möglichkeiten der Gebrauchtteilerückführung stehen im Fokus. Die entwickelten Ansätze gelten speziell in der letzten Phase des Produktlebenszyklus, in der Primärprodukte nicht mehr hergestellt werden und beziehen sich auf die Anwendung in der Elektrotechnik- und Elektronikbranche (Spengler & Schröter 2003). Inderfurth & Mukherjee sowie Inderfurth & Kleber betrachten neben der Endbevorratung und Gebrauchtteilerückführung zusätzlich die Nachfertigung von

Ersatzteilen. Ihr Ziel ist es, sowohl die Flexibilität als auch die Kosten bei einzelner oder kombinierter Betrachtung der Strategien zu optimieren. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems kommen ein Entscheidungsbaummodell und stochastisch-dynamische Programmierung zum Einsatz (Inderfurth & Mukherjee, 2008; Inderfurth & Kleber, 2010).

In der Literatur lassen sich wesentlich mehr Artikel zur Bedarfsprognose und Lagerlogistik als zur Klassifikation der Ersatzteile nach ihren Eigenschaften finden. Durch die zuvor beschriebenen Ansätze ist eine Strategiezuteilung zu verschiedenen Ersatzteilen aufgrund der Ausprägung ihrer Eigenschaften beispielsweise noch nicht möglich. Dies ist jedoch eine der zentralen Fragestellungen dieser Arbeit. Geeignete publizierte Ansätze sind nachfolgend angeführt.

Einige Autoren behandeln die Klassifikation nach nur einem Kriterium. So haben Gelders & Van Looy z.B. eine Studie in einer großen petrochemischen Fabrik durchgeführt. Sie schlugen eine ABC-Klassifizierung unter Verwendung der jährlich stattfindenden Lagerabgänge und eines geeigneten Bestandskontrollmodells für verschiedene Ersatzteilklassen vor (Gelders & Van Looy, 1978). Williams beschreibt eine Methode zur Klassifizierung der Ersatzteilmachfrage in die Kategorien *gleichmäßige*, *langsam ändernde* und *sporadische Nachfrage*. Er führte eine Studie durch, um die Nachfrageverteilung der einzelnen Ersatzteilkategorien zu identifizieren und um Prognosemethoden sowie Bestandskontrollrichtlinien für diese herzuleiten (Williams, 1984). Ein weiterer Ansatz zieht die Verwendung eines analytischen Hierarchieprozesses für eine dreistufige Einteilung von Ersatzteilen in Bezug auf ihre Kritikalität heran. Die Klassenzuweisung erfolgt durch den Vergleich absoluter Kritikalitätsmessungen mit vorgegebenen numerischen Grenzwerten (Gajpal et al., 1994). Syntetos et al. entwickelten 2009 ein Klassifikationsmodell, welches auf der Ersatzteilmachfrage basiert. Dieses zeigt Bestandskontrollmöglichkeiten auf, um das Servicelevel zu erhöhen und die Ersatzteilkosten zu reduzieren. Während einer sechsmonatigen Studie wurden für die Bestimmung des erforderlichen Ersatzteilbestandes Daten zur Nachfrageverteilung und Bestellungshäufigkeit gesammelt (Syntetos et al., 2009).

Ein wesentlich größerer Anteil an Veröffentlichungen behandelt jedoch mehrdimensionale Ansätze zur Ersatzteilklassifikation. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht von 25 ausgewählten Werken in Verbindung mit den darin behandelten Klassifikationsmerkmalen und fokussierten Inhalten. Es ist zu erkennen, dass der *Ersatzteilpreis* und die *Teilespezifität* als zusätzliche Klassifikationsmerkmale angeführt sind (grau eingefärbt). Ersterer ist in Kapitel 2.2.1.7 als eine der Einflussgrößen der Beschaffungsbedingungen beschrieben. Einige Autoren betrachten den Ersatzteilpreis jedoch als eigenständiges Merkmal, weshalb er in Tabelle 3 auch als solches angeführt wird.

Ein ähnliches Verhalten liegt bei der Teilespezifität vor. Diese beeinflusst den Ersatzteilbedarf (siehe Kapitel 2.2.2.4) und kann daher von diesem als auch von der Anzahl an Lagerabgängen abgeleitet werden (Massenprodukte fordern einen höheren Bedarf und führen zu einer höheren Anzahl an Lagerabgängen). In der ausgewerteten Literatur ist auch hier oft eine eigenständige Betrachtung vorzufinden, woraus die separate Darstellung dieses Merkmals in Tabelle 3 resultiert.

Weiters ist aus der Tabelle ersichtlich, ob der Autor das genaue Vorgehen zur Klasseneinteilung beschreibt, ob spezielle Abgrenzungen der einzelnen Ausprägungen eines Merkmales definiert wurden (z.B. absoluter Grenzwert zwischen den Klassen des Ersatzteilpreises) und ob die Ergebnisse Erkenntnisse für das Bestandsmanagement bzw. für die Festlegung geeigneter Nachserienversorgungsstrategien bringen.

Die Auswertung zeigt, dass das Ziel der Klassifikation oft der Kontrolle und Regelung des Lagerbestandes dient. Ableitungen für eine geeignete Strategiewahl während der Nachserie werden nur selten behandelt. In einigen Fällen wird auch kein konkretes Ableitungsziel genannt, sondern nur der Klassifikationsvorgang selbst beschrieben. Außerdem ist zu erkennen, dass nur in etwa einem Drittel der aufgelisteten Werke konkrete Angaben bezüglich genau definierter Bereichsabgrenzungen zwischen den einzelnen Ausprägungen der Merkmale erläutert werden. Dies lässt die Schwierigkeit erahnen, die hinter der Zuteilung von Ersatzteilen zu den verschiedenen Ausprägungsbereichen steht.

In Tabelle 3 wurden die Klassifikationsmerkmale nach qualitativen und quantitativen Merkmalen gegliedert. Das Merkmal *Beschaffungsbedingungen* fasst die von unterschiedlichen Autoren erwähnten Eigenschaften dieser Kategorie (Beschaffungszeit, Anzahl der Lieferanten und Bestellkosten) in einer Gruppe zusammen. In den meisten Fällen ist die Beschaffungszeit das genutzte Hauptmerkmal. Da es sich bei den erwähnten Eigenschaften um quantitative Größen handelt, werden die Beschaffungsbedingungen entgegen der in Kapitel 2.2 vorgenommenen Einteilung hier den quantitativen Merkmalen zugeschrieben. Diese Gruppe wird in 80% der aufgelisteten Veröffentlichungen behandelt und ist damit die am häufigsten erwähnte. Weitere Kriterien, die viel Beachtung finden, sind die Kritikalität und der Ersatzteilpreis (76% Berücksichtigung).

Einige weitere Klassifikationsmerkmale finden in der Literatur geringere Aufmerksamkeit und werden nur von einzelnen Autoren behandelt. Dazu zählen beispielsweise lagerspezifische Eigenschaften. Tabelle 4 zeigt einen Überblick der Autoren inklusive den von ihnen erwähnten, zusätzlichen Klassifikationsmerkmalen.

			Zusätzliche Klassifikationsmerkmale
Autor und Jahrgang	Kaiser et al.	2003	Anzahl der Lagerpositionen, Lagerhaltungskosten
	Braglia et al.	2004	Verfügbare Lagerplatz
	Cakir & Canbolat	2008	Verfügbarkeit von Substitutionsmaterialien
	Molenaers et al.	2012	Verfügbarkeit technischer Spezifikationen
	Bacchetti et al.	2013	Bestellungsanzahl
	Teixeira et al.	2017	Lagerhaltungsstrategie

Tabelle 4: Zusätzliche Klassifikationsmerkmale in der Literatur (eigene Darstellung)

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Modelle zur Klassifikation entwickelt. Bei vielen Autoren kommt die multidimensionale ABC-Analyse zum Einsatz. Die Ersatzteile werden dabei anhand mehrerer Kategorien mit unterschiedlicher Gewichtung bewertet und letztendlich in A-, B- und C-Artikel eingeteilt. Patrovi & Anandarajan verwendeten für die ABC-Klassifikation der Ersatzteile eines pharmazeutischen Unternehmens künstliche neuronale Netzwerke. Als Lernmethoden nutzten sie die Rückpropagierung (Backpropagation) und einen genetischen Algorithmus (Patrovi & Anandarajan, 2002). Mittels gewichteter linearer Optimierung entwarf Ramanathan ein als „R-Modell“ bekanntes Schema, welches auf die mehrdimensionale ABC-Klassifikation anwendbar ist (Ramanathan, 2006). Ein Jahr später entwickelten Zhou & Fan dieses Modell weiter (ZF-Modell). Durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Gewichtungen (für den günstigsten und den ungünstigsten Fall), hilft dieser Ansatz dabei, eine besser zutreffende Einteilung vorzunehmen (Zhou & Fan, 2007). Ebenfalls 2007 stellt Ng ein weiteres Modell für eine multidimensionale ABC-Analyse vor (Ng-Modell). Die Kennzahlen der einzelnen Kriterien werden in einer skalaren Größe zusammengefasst. Bei richtiger Transformation geschieht dies ohne linearer Optimierung. Anschließend erfolgt die Klassifikation nach dem ABC-Prinzip (Ng, 2007). Chen verwendet in seiner 2011 erschienenen Veröffentlichung einen sogenannten Peer-estimation Ansatz. Dieser Ansatz bildet aus der Kombination von zwei Bewertungskriterien ebenfalls den günstigsten und ungünstigsten Fall. Subjektivität wird durch diese Vorgehensweise ausgeschlossen (Chen, 2011).

Neben der in Tabelle 3 angeführten Literatur, deren spezifisches Ziel in der Klassifikation liegt, finden sich andere Werke, in denen Merkmale beschrieben und Herausforderungen der Klassifizierung erwähnt sind. Biedermann erklärt in seinem Buch die Thematik der Ausfallswahrscheinlichkeit, der Ausfallfolgekosten, der Beschaffungsbedingungen, der Bedarfsprognose und des Lagerbestandswertes ausführlich. Außerdem erwähnt er Merkmale wie Lagebedingungen, Reparierbarkeit und Einteilung nach der Wertschöpfungsstufe eines Artikels (Biedermann, 2008). Das von Hermann veröffentlichte Buch geht detailliert auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsstufen eines Produktes, das Verschleißverhalten, die Lagerfähigkeit und den Bedarf an Ersatzteilen ein (Hermann, 2010). Mit den Lebens-

zyklusphasen und dem Verschleißverhalten beschäftigen sich auch Schuh, Stich & Wienholdt. Sie erläutern zusätzlich die Kritikalität, die Ausfallfolgekosten, die Prognostizierbarkeit des Bedarfs und den Lagerbestandswert (Schuh et al., 2013).

An dieser Stelle soll ebenfalls die 2005 von Dombrowski, Horatzek & Wrehde vorgeschlagene ganzheitliche, qualitative Planungssystematik für ein lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement erwähnt werden. In zwei Beiträgen werden zum einen „Zukunftsgestaltungsaspekte“ und zum anderen „Aspekte der Vergangenheitsbewältigung“ erläutert (Dombrowski et al., 2005a; Dombrowski et al. 2005b).

Im Zuge der Vergangenheitsbewältigung wird ein aus fünf Schritten bestehendes System vorgeschlagen. Im ersten Schritt werden Basismerkmale ermittelt (z.B. Lagerfähigkeit), um anschließend eine Vorauswahl möglicher Versorgungsszenarien treffen zu können (Schritt 2). Die verbliebenen Szenarien werden im Rahmen einer Feinplanung bewertet und im vierten Schritt gegenübergestellt und verglichen. Der letzte Schritt dient der Festlegung eines geeigneten Versorgungsszenarios für die Nachserienphase (ebenda).

Die Zukunftsgestaltung zielt auf die Beeinflussung der Rahmenbedingungen für die Ersatzteilversorgung in nachgelagerten Phasen ab. Durch getroffene Maßnahmen in der Gegenwart, die mit einem Mehraufwand verbunden sind, können zukünftig eventuell Einsparungen erzielt werden. Eine kritische Gegenüberstellung ist notwendig, um eine wirtschaftliche Bewertung durchführen und Vorgehensschritte ableiten zu können (Dombrowski et al., 2005a).

3.2 Verbreitung der additiven Fertigung im Ersatzteilmanagement

Maschinen- und Anlagenbauunternehmen haben immer mehr das Bestreben, die Effizienz im Service durch die rasche Bereitstellung von Ersatzteilen zu steigern. Für das Erreichen dieses Ziels bietet die additive Fertigung viele Grundeigenschaften, die dafür vonnöten sind. Wichtig ist es jedoch, eine Abgrenzung zwischen den in Kapitel 2.1 beschriebenen Versorgungsstrategien und dem Einsatz des 3D-Drucks für die Herstellung von Ersatzteilen zu definieren. Bei der additiven Fertigung handelt es sich um keine zusätzliche Ergänzung der sechs beschriebenen Strategien, sondern um eine Möglichkeit diese Strategien durch einen innovativen Produktionsprozess zu unterstützen. Dies bedeutet, dass die additive Fertigung beispielsweise im Zuge der internen oder externen Nachfertigung zum Einsatz kommen kann, jedoch nicht als alleinige Versorgungsstrategie anzusehen ist.

Der Digitalverband *Bitkom* hat im November 2018 eine Studie durchgeführt, an der 553 deutsche Industrieunternehmen teilnahmen, die mindestens 100 Mitarbeiter beschäftigen. Das Ergebnis hat gezeigt, dass sich bei 28% der befragten Firmen der

3D-Druck bereits im Einsatz befindet. Dies entspricht einem Plus von 8% im Vergleich zum Jahr 2016. Knapp jedes dritte Industrieunternehmen (32%), das die additive Fertigung im Einsatz hat, benutzt diese zur Herstellung von Ersatzteilen.⁹⁵

Es ist anzunehmen, dass dieser positive Trend mit den Vorteilen, die das 3D-Druck Verfahren liefert, zusammenhängt. Mithilfe der additiven Fertigung gelingt es, eine Effizienzsteigerung im Service durch die zeitnahe Bereitstellung benötigter Ersatzteile zu erreichen. Für Maschinen- und Anlagenbauer ist dies sehr wichtig, da aufgrund von Ertragseinbußen bei Maschinenstillständen schnelle Reaktionszeiten oft wichtiger als die eigentlichen Reparaturkosten sind. Die sogenannte „Materialisierung vor Ort“ macht dies möglich und bringt innovative Nachserienversorgungskonzepte wie die „digitale Lagerhaltung“ zum Vorschein. Anstatt das Ersatzteil an einem zentralen Ort zu lagern und bei Bedarf zu verschicken, erfolgt eine virtuelle Zustellung der Konstruktionsdatei. Das Ersatzteil kann dann ortsnah entweder bei einer Zweigstelle des Herstellers, bei einem 3D-Druck Dienstleister oder beim Kunden selbst additiv gefertigt werden. Neben der kurzfristigen und bedarfsgerechten Bereitstellung vor Ort können zusätzlich Lager- und Transportkosten sowie Kosten für sonst benötigtes Spezialwerkzeug eingespart werden. Weitere Vorteile bieten die Möglichkeiten, dass auch historische Bauteile nicht länger auf Lager gehalten werden müssen und Qualitätsversprechen wie eine lebenslange Ersatzteilgarantie ausgesprochen werden können.⁹⁶

Die positiven Aspekte machen sich auch bei der Umsetzung in der Industrie bemerkbar. *Siemens Mobility*, die Bahnsparte von *Siemens*, hat beispielsweise im Frühjahr 2018 in Dortmund sein erstes Instandhaltungsdepot mit einem 3D-Drucker ausgerüstet. Nach und nach soll eine Ausweitung auf ein globales Netzwerk erfolgen. Das Unternehmen spricht von einer Reduktion der Fertigungszeit um bis zu 95% durch den Einsatz der additiven Fertigung.⁹⁷

Eine Industrialisierungsstudie zur additiven Fertigung mit 25 teilnehmenden Unternehmen hat als marktbezogenes Hauptziel die Umsatzsteigerung und als ressourcenbezogene Hauptziele eine Reduktion der Entwicklungszeiten, der Durchlaufzeiten sowie der Herstellungskosten identifiziert. Zur Erreichung dieser Ziele lassen sich neue Geschäftstätigkeiten ableiten. Auf Platz eins, mit einem Anteil von 18% der abgegebenen Stimmen (Mehrfachnennungen waren möglich), landete „die Fertigung

⁹⁵ Vgl. Bitkom e.V.: Mehr als jedes vierte Industrieunternehmen setzt auf 3D-Druck (13.06.2018), <http://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-jedes-vierte-Industrieunternehmen-setzt-auf-3D-Druck.html#item-close-479> (zugegriffen am: 23.11.2018)

⁹⁶ Vgl. Varwig/Kammler/Thomas, 2017, S.134 ff.

⁹⁷ Vgl. Schröder, T.: Vom Drucker auf die Schiene (21.11.2018), <https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/industrie-und-automatisierung/additive-fertigung-ersatzteile-fuer-zuege.html> (zugegriffen am 23.11.2018)

von Ersatzteilen“ als besonders attraktive Möglichkeit zur Zielerreichung.⁹⁸ Dieses Ergebnis wird durch eine Umfrage der Strategieberatung *PwC* untermauert. Demnach gaben 85% der Ersatzteilhersteller an, innerhalb der nächsten fünf Jahre die additive Fertigung in ihr Unternehmen zu integrieren.⁹⁹

Doch bei der Umsetzung der erwähnten Ziele treten auch Blockaden und Hindernisse auf. Die Umfrageteilnehmer der Industrialisierungsstudie sehen die größten Herausforderungen in den folgenden Punkten:

- Einführung neuer Fertigungstechnologien: Akzeptanz, Basiswissen, hohe Kosten (18 von 25 Stimmen)
- Produktivität einer Prozesskette: Standardisierung, Automatisierung (13 von 25 Stimmen)
- Fertigungsgerechtes Produktdesign: Neue Denkweisen gefordert, Automatisierung (13 von 25 Stimmen)
- Qualitätssicherung: Verständnis, Vielzahl der Fertigungsparameter, Produktqualitätsnormen (13 von 25 Stimmen)¹⁰⁰

Speziell bei KMU stellen die hohen Anschaffungskosten ein Hemmnis dar, das meist nur über Kooperationen mit anderen Unternehmen überwunden werden kann. In solchen Fällen spielt jedoch immer der Verlustgedanke eigener Konstruktionsdaten eine Rolle, weshalb es nur selten zur tatsächlichen Umsetzung eines solchen Modells kommt. Neben Materialfragestellungen (Materialeigenschaften, Formabweichungstoleranzen), die durch den 3D-Druck erfüllbar sein müssen, müssen auch Produktionsstandards geschaffen werden, die für einen zuverlässigen Rückschluss auf Qualität und Verschleißigenschaften notwendig sind. Außerdem wird ein Mitarbeiter vor Ort benötigt, der die produzierte Komponente einbauen kann.¹⁰¹

Wie die folgenden Beispiele zeigen, findet die additive Fertigung trotz der oben erwähnten Herausforderungen bereits in einigen Industriezweigen Anwendung:

- Übergangsstück für einen hocheffizienten Wärmetauscher: Für die Produktion wurde ein rostfreier Warmarbeitsstahl mit guten Wärmeleit- und Korrosionseigenschaften sowie Wandstärken von nur 0,2mm verarbeitet.

⁹⁸ Vgl. Möhrle, M./Müller, J./Emmelmann, C.: Industrialisierungsstudie Additive Fertigung – Herausforderungen und Ansätze (2017),

<https://www.rtejournal.de/ausgabe-14-2017/4493> (zugegriffen am: 24.11.2018)

⁹⁹ Vgl. Adorno, M.: Für welche Ersatzteile lohnt sich der Einsatz von 3D-Druck? (02.07.2018),

<https://www.industry-of-things.de/fuer-welche-ersatzteile-lohnt-sich-der-einsatz-von-3d-druck-a-729525/> (zugegriffen am: 24.11.2018)

¹⁰⁰ Vgl. Möhrle, M./Müller, J./Emmelmann, C.: Industrialisierungsstudie Additive Fertigung – Herausforderungen und Ansätze (2017),

<https://www.rtejournal.de/ausgabe-14-2017/4493> (zugegriffen am: 24.11.2018)

¹⁰¹ Vgl. Varwig/Kammler/Thomas, 2017, S.140 f.

- Ionisierer zur Reinigung von Chip-Bonding-Substraten (Halbleiterindustrie):
Dabei handelt es sich um ein in Serie gefertigtes Produkt aus Edelstahl zur Verhinderung von statischen Oberflächenspannungen und damit einhergehender Anziehung von Staub bei der Verklebung von Siliziumchips auf ein Trägermaterial.
- Strukturkomponenten für das «Chairless Chair» Exoskelett (Fließbandarbeit):
Um die hohen Herstellungskosten durch CFK-laminierte Teile zu reduzieren, wurden Teile des Exoskeletts additiv aus Titan (Ti_6Al_4V) gefertigt.¹⁰²

¹⁰² Vgl. Meboldt, M. (hrsg.): Additive Fertigung in der industriellen Serienproduktion – ein Statusreport (04.10.2016), <https://de.slideshare.net/filolfo/additive-fertigung-in-der-industriellen-serienproduktion-ein-statusreport> (zugegriffen am: 25.11.2018)

4 Dateninput | Identifikation von entscheidungsrelevanten Parametern für die Ersatzteilklassifikation

4.1 Experteninterviews

4.1.1 Methodisches Vorgehen und verfolgte Ziele

Einen Teil der empirischen Untersuchung bildete die Befragung von Experten in den Gebieten des Ersatzteilmanagements und der additiven Fertigung. Wie in Abbildung 20 dargestellt, gliedert sich diese Vorgangsweise dabei in drei Hauptprozessschritte.

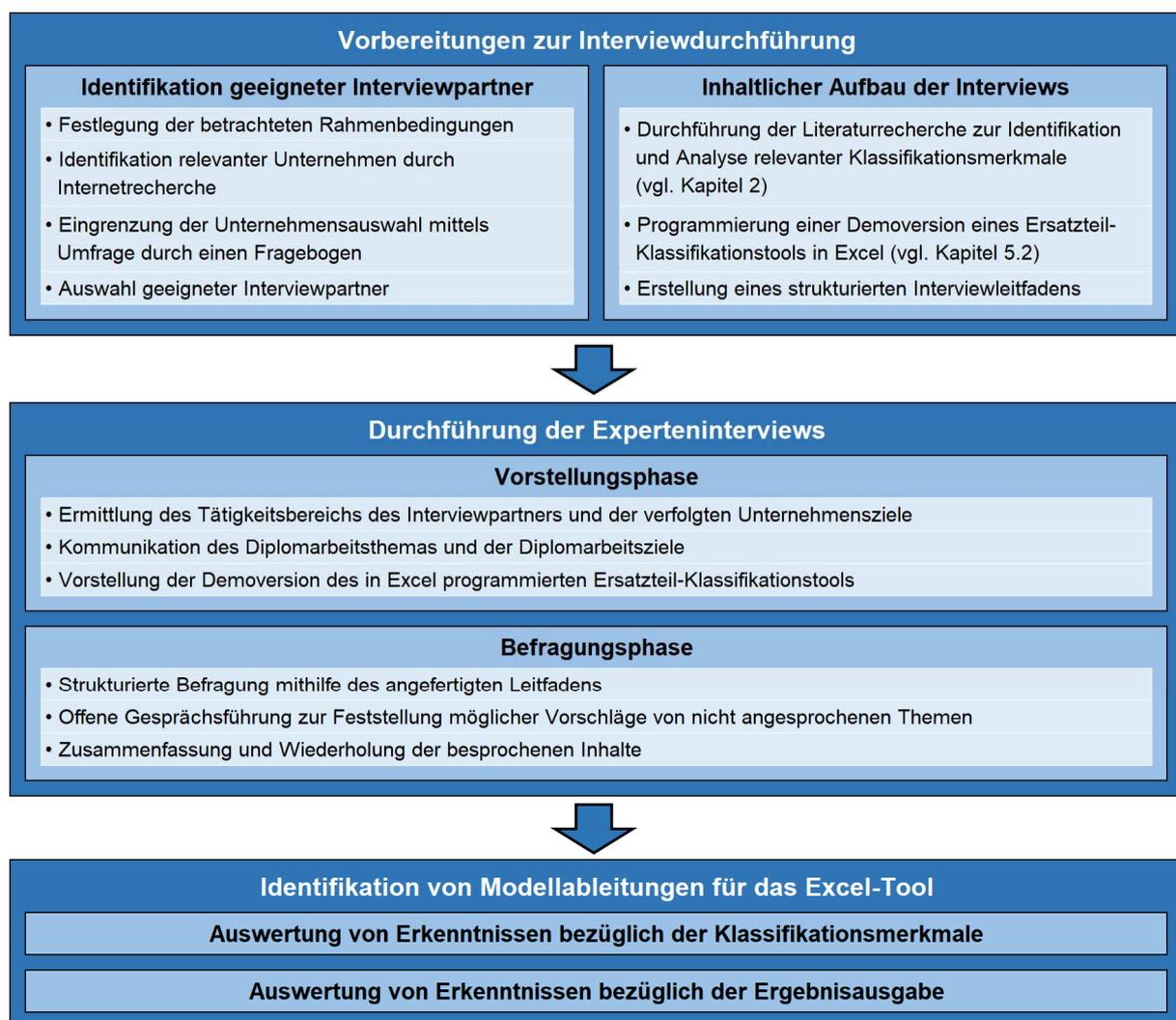


Abbildung 20: Methodisches Vorgehen zur Durchführung der Experteninterviews (eigene Darstellung)

Im ersten Schritt wurden Interviewvorbereitungen durchgeführt, bei welchen der Fokus auf der Identifikation geeigneter Gesprächspartner und der Festlegung des inhaltlichen Aufbaus für die Expertenbefragungen stand. Diese Teilprozesse liefen

parallel ab, wobei die zu jenem Zeitpunkt bereits durchgeführte Literaturrecherche (siehe Kapitel 2) Teil der inhaltlichen Vorbereitung war.

Um relevante Interviewpartner zu identifizieren, wurden zu Beginn die erforderlichen Rahmenbedingungen festgelegt. Diese resultierten aus der markt- und technologie-seitigen Betrachtungsweise, um sowohl Erkenntnisse zu den Bedürfnissen und Anforderungen des Marktes als auch zu den technischen Möglichkeiten der additiven Fertigung zu erlangen. Bei der Vorselektion geeigneter Interviewpartner mittels Internetrecherche wurde die Suche auf Maschinen- bzw. Anlagenbauunternehmen (marktseitig) und 3D-Druck Dienstleister bzw. Forschungseinrichtungen (technologie-seitig) eingegrenzt.

Marktseitig wurden vierzig österreichische Unternehmen ausgewählt, an welche ein Fragebogen versendet wurde (siehe Anhang A.1). Anhand der rückgesendeten Fragebögen konnte einerseits die Relevanz der Ersatzteilversorgung für die jeweiligen Unternehmen beurteilt werden und andererseits wurde der Vergleich allgemeiner Firmendaten (z.B. Mitarbeiteranzahl und Tätigkeitsbereich) untereinander ermöglicht. Im Anschluss wurden drei Unternehmen ausgewählt, für die das Ersatzteilmanagement eine äußerst wichtige Rolle spielt, die sich jedoch in Hinsicht auf Unternehmensgröße, Produktangebot und strategischer Vorgehensweise bei der Ersatzteilbereitstellung unterscheiden. Dies hat zum Ziel, eine möglichst breite Sichtweise aus den Experteninterviews in das Modell einfließen zu lassen.

In Bezug auf die technologie-seitige Betrachtungsweise wurden zur Befragung geeignete Unternehmen direkt mittels Internetrecherche identifiziert und ausgewählt. Aufgrund einer vergleichsweise kleinen Zahl an Dienstleistungsanbietern im Bereich der additiven Fertigung mittels SLM-Verfahren ist die Anzahl möglicher Interviewpartner hier relativ gering. Außerdem weisen eben erwähnte Anbieter typischerweise ein ähnliches Tätigkeitsprofil auf. Aus diesem Grund wurde keine weitere Eingrenzung mittels Fragebogen vorgenommen. Letztendlich kam es hier zur Auswahl von zwei Interviewpartnern.

Somit wurden die folgenden fünf Gesprächspartner identifiziert:

- 1) Kleinunternehmen mit Spezialisierung auf Ersatzteilbeschaffung
- 2) Großunternehmen mit Tätigkeit im Sondermaschinenbau
- 3) Großunternehmen mit Tätigkeit im Schienenfahrzeugbau
- 4) Dienstleistungsunternehmen mit Spezialisierung auf die additive Fertigung nach dem SLM-Verfahren
- 5) Professor der Technischen Universität Wien

Als Teilprozess zur Festlegung des inhaltlichen Interviewaufbaus wurde eine Demoversion eines Ersatzteil-Klassifizierungstools in Excel programmiert (siehe Kapitel 5.2). Wie in Abbildung 21 auf Seite 69 zu sehen ist, wurde das Demo-Tool als

Grundmodell genutzt und basierend auf den aus Kapitel 4 gewonnen Erkenntnissen weiterentwickelt.

Abgestimmt auf den jeweiligen Interviewpartner wurde ein strukturierter Interviewleitfaden mit definierten Fragen für die einzelnen Gespräche erstellt, der unter anderem das Demo-Tool betreffende Fragen enthielt. Dieser diente der Sicherstellung eines geordneten Gesprächsablaufs und der Generierung von Informationen in ausreichender Qualität.

Neben der Validierung des bestehenden Excel-Modells lag das Ziel vor allem in der Identifikation von möglichen Ergänzungen bzw. Verbesserungsvorschlägen bezüglich des bestehenden Tools, damit im Anschluss entsprechende Weiterentwicklungen daran vorgenommen werden konnten.

Die Experteninterviews gliederten sich in eine Vorstellungsphase und eine darauffolgende Befragungsphase.

Erstere diente zum einen dem besseren Kennenlernen des Unternehmens, der Bestimmung näherer Details zu Prozessen im Ersatzteilwesen sowie der Identifikation des Aufgaben- und Tätigkeitsbereichs des befragten Mitarbeiters. Zum anderen wurden den Ansprechpartnern die verfolgten Ziele der vorliegenden Diplomarbeit vermittelt sowie die Demoversion des in Excel implementierten Ersatzteilklassifikationstools und die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der bereits bestimmten Klassifikationsmerkmale nähergebracht.

In der anschließenden Befragungsphase wurde dem Leitfaden gefolgt, um die gewünschten Erkenntnisse aus den Interviews durch eine strukturierte Vorgehensweise zu erhalten. Nachdem die Fragen abgehandelt waren, folgte ein offener Gesprächsteil, in dem eventuell nicht angesprochene Themengebiete bzw. sonstige Verbesserungsvorschläge und Fragen besprochen werden konnten. Am Ende jedes Interviews wurden die vom Gesprächspartner getätigten Aussagen in prägnanter Form zusammengefasst und nochmals wiederholt, damit Kommunikationsmissverständnisse ausgeschlossen werden konnten. Nähere Hintergrundinformationen zu den einzelnen Gesprächspartnern und den Inhalten der Interviews sind in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 sowie im Anhang A.2 zu finden.

Der letzte in Abbildung 20 dargestellte Hauptprozess umfasste die Ableitung von Erkenntnissen aus den Experteninterviews. Dazu wurden einerseits Erkenntnisse zu den Klassifikationsmerkmalen und deren Ausprägungen analysiert. Andererseits wurden Ableitungen bezüglich des im Excel-Tool implementierten Analyseprozesses und der dazugehörigen Ausgabedarstellung getroffen. Die identifizierten Schlussfolgerungen aus den Experteninterviews sind in Kapitel 4.1.4 detailliert behandelt und beschrieben.

4.1.2 Interviews zur Identifikation von marktseitigen Rahmenbedingungen

4.1.2.1 Interview 1: Kleinunternehmen mit Spezialisierung auf Ersatzteilbeschaffung

Das erste Interview zur Erlangung von marktseitigen Erkenntnissen wurde am 21. März 2019 von 09.00 - 10.30 Uhr mit *Herrn Dipl.-Ing.(FH) Hopfner* von der Firma *FAIS GmbH* geführt. Das Unternehmen mit Sitz in Leobersdorf ist auf das Engpassmanagement und die Bereitstellung von schwer erhältlichen Ersatzteilen spezialisiert. Die Firma arbeitet mit vielen produzierenden Industrie- und Maschinenbauunternehmen zusammen, um das Ziel einer bedarfsdeckenden und rechtzeitigen Ersatzteilversorgung ihrer Kunden zu gewährleisten. Speziell im Bereich von Gleitlagern und Kontaktmaterialien aus hochlegierten Kupfer- und Kupferberylliumlegierungen werden technische Lösungen nach Kundenanforderungen umgesetzt und gemeinsam mit Partnerunternehmen das so entwickelte Endprodukt hergestellt. Eine direkte Herstellung von Primärprodukten wird von *FAIS* derzeit nicht vorgenommen und zählt daher nicht zum Aufgabenspektrum.

Aufgrund dieses Unternehmensprofils sind durch das Interview vor allem Erkenntnisse im Bereich der externen Ersatzteilbeschaffung sowie zu beschaffungsmarktrelevanten Details in Bezug auf das Ersatzteilgeschäft von Bedeutung.

Die Zusammenfassung des Interviews ist in Anhang A.2.1 zu finden.

4.1.2.2 Interview 2: Großunternehmen mit Tätigkeit im Sondermaschinenbau

Ein weiteres Interview wurde mit *Herrn Christian Heidenreich, MSc.* am 09. April 2019 von 10.00 - 11.20 Uhr geführt. Er ist Mitarbeiter beim international tätigen Großunternehmen *Franz Haas Waffelmaschinen GmbH (FHW)*, welches Sondermaschinen für die Produktion von Waffel- und Kekspeprodukten herstellt. Innerhalb des Unternehmens ist *Herr Heidenreich* im Bereich *Global Services* tätig und arbeitet an Projekten im Ersatzteilsektor. Gerade im Sondermaschinenbau handelt es sich dabei um einen wichtigen Sektor, weshalb dieses Interview speziell auf Erkenntnisse bezüglich in der Praxis tatsächlich angewandter Klassifikationsmerkmale und deren Ausprägungsbereiche abzielt.

Die Zusammenfassung des Interviews ist in Anhang A.2.2 zu finden.

4.1.2.3 Interview 3: Großunternehmen mit Tätigkeit im Schienenfahrzeugbau

Am 19. April 2019 von 12.00 - 13.15 Uhr wurde das letzte Interview zur Identifikation von marktseitigen Rahmenbedingungen geführt. Interviewpartner war ein Vertreter eines in Wien ansässigen Großunternehmens, welches im Sektor des Schienenfahrzeugbaus tätig ist. Der Experte ist als Projektleiter im *Supply Chain Management*

tätig und betreut strategische und innovative Projekte, darunter auch die additive Fertigung.

Aufgrund der Anwendung des 3D-Drucks im betrachteten Unternehmen zielt dieses Interview darauf ab, Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der additiven Fertigung auf die Entscheidungsfindung einer Bereitstellungsstrategie zu erlangen.

Die Zusammenfassung des Interviews ist in Anhang A.2.3 zu finden.

4.1.3 Interviews zur Identifikation von technologischen Rahmenbedingungen

4.1.3.1 Interview 4: Dienstleistungsunternehmen mit Spezialisierung auf die additive Fertigung nach dem SLM-Verfahren

Mit *Herrn Hofer* wurde das Interview am 26. März 2019 von 09.10 - 10.30 Uhr geführt. Er ist Einzelunternehmer und gründete die Firma *MostTech - Technologie Agentur*, welche das alleinige Vertriebsrecht von 3D-Druck Anlagen der *SLM Solutions Group AG* in Österreich besitzt. *MostTech* selbst ist nicht in Besitz additiver Fertigungsanlagen. Durch die erwähnte Kooperation haben Kunden jedoch die Möglichkeit, Fertigungsdienstleistungen in Anspruch zu nehmen. Außerdem bietet Herr Hofer Beratungstätigkeiten an, welche seine Kunden während des gesamten Produktentstehungsprozesses unterstützen. Dies reicht von der Idee über die Konstruktion und Prozessoptimierung bis hin zur Fertigstellung eines Produktes.

Durch die jahrelange Erfahrung von Herrn Hofer im Bereich der additiven Fertigung und den starken Praxisbezug in seinen Tätigkeiten zielt das Interview sowohl auf Erkenntnisse bezüglich der Funktionsweise und des Prozessablaufs beim 3D-Druck als auch auf die Ableitung von Merkmalen, die zur Eignungsüberprüfung des SLM-Verfahrens herangezogen werden können, ab.

Die Zusammenfassung des Interviews ist in Anhang A.2.4 zu finden.

4.1.3.2 Interview 5: Professor der Technischen Universität Wien

Das Interview mit *Prof. Stampfl* wurde am 03. April 2019 von 10.00 - 11.00 Uhr geführt. Er ist Leiter des Forschungsbereiches *Polymer- und Verbundwerkstoffe* sowie der Forschungsgruppe *Werkstoffe und Additive Fertigung* am Institut für *Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie* der *TU Wien*. Im Laufe seiner Karriere hat sich Professor Stampfl unter anderem mit der additiven Fertigung von Modellen aus keramischen und metallischen Werkstoffen als auch mit Anwendungen des 3D-Drucks im Nanobereich beschäftigt. Er ist Mitbegründer verschiedener Unternehmen (z.B. *Lithoz GmbH* bzw. *Cubicure GmbH*) und Leiter zahlreicher Forschungsprojekte. Heute liegt sein Hauptforschungsgebiet im Bereich der additiven Fertigung mit Photopolymeren.

Durch das Gespräch mit Professor Stampfl soll eine Betrachtungsweise von Seite der Forschung in die Erstellung des Excel-Tools miteinfließen.

Die Zusammenfassung des Interviews ist in Anhang A.2.5 zu finden.

4.1.4 Ableitungen aus den Experteninterviews

In Bezug auf die Feststellung der 3D-Druckbarkeit wurden durch die Gespräche im technologieseitigen Rahmen zu den vier ursprünglich im Demo-Tool definierten Kriterien weitere vier Merkmale identifiziert, die zu einer besseren Beurteilbarkeit führen (siehe Tabelle 5).

Klassifikationskriterien (3D-Druck)	
Ursprünglich definierte Kriterien	Neu identifizierte Kriterien
• Ersatzteilmengen	• Anzahl der Funktionsflächen
• CAD-Datei vorhanden	• Materialeignung
• Geringste Wandstärke	• Losgröße
• Oberflächenrauigkeit	• Volumenverhältnis

Tabelle 5: Klassifikationskriterien des 3D-Drucks (eigene Darstellung)

Die Interviews mit den Gesprächspartnern zur Identifikation der marktseitigen Rahmenbedingungen zeigten, dass die Relevanz der einzelnen Klassifikationsmerkmale je nach Tätigkeitsbereich der Unternehmen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Bei der *Kritikalität* und den *Beschaffungsbedingungen* handelt es sich um die einzigen Merkmale, die von allen drei Interviewpartnern als besonders wichtig beurteilt wurden. Übereinstimmungen von je zwei Unternehmen gab es in Hinsicht auf als wichtig eingestufte Merkmale bei der *Prognostizierbarkeit des Bedarfs* sowie dem Volumen des *Ersatzteilbedarfs*. In Hinsicht auf weniger relevant eingestufte Kriterien gab es eine Übereinstimmung von ebenfalls je zwei Interviewpartnern bezüglich der *Lagerfähigkeit* und den *Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts*.

Tabelle 6 stellt diese Aussagen durch Farbcodierung übersichtlich dar. Während grün hinterlegte Merkmale von den Gesprächspartnern als wichtigste Hauptkriterien zur Klassifikation identifiziert wurden, wurden rot hinterlegte Merkmale als Kriterien mit geringem Einfluss auf die Wahl der Nachserienversorgungsstrategie beurteilt. Orange markierte Felder deuten auf Merkmale hin, die im vorgestellten Demo-Tool noch nicht enthalten waren und von den jeweiligen Experten als Ergänzung zur bestehenden Merkmalliste vorgeschlagen wurden.

Ein weiterer Umstand in dem eine starke Übereinstimmung im Zuge der Interviews erkennbar wurde, ist die Vorteilhaftigkeit einer detaillierteren Aufschlüsselung der *Beschaffungsbedingungen* hinsichtlich der folgenden Kriterien:

- Wiederbeschaffungszeit
- Beschaffungskosten

- Bestellbedingungen
- Bestellrestriktionen
- Einkaufsvorteile

	FAIS	Franz Haas Waffelmaschinen	Unternehmen im Bereich Schienenfahrzeugbau
qualitative Kriterien	Kritikalität	Kritikalität	Kritikalität
	Obsoleszenzrisiko	Obsoleszenzrisiko	Obsoleszenzrisiko
	Ausfall- und Verschleißverhalten	Ausfall- und Verschleißverhalten	Ausfall- und Verschleißverhalten
	Lebenszyklusphase	Lebenszyklusphase	Lebenszyklusphase
	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit
	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad
	Beschaffungsbedingungen	Beschaffungsbedingungen	Beschaffungsbedingungen
quantitative Kriterien	-----	-----	Art der Lagerung
	Lagerbestandswert	Lagerbestandswert	Lagerbestandswert
	Anzahl der Lagerabgänge	Anzahl der Lagerabgänge	Anzahl der Lagerabgänge
	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	Prognostizierbarkeit des Bedarfs
	Ersatzteilmengen	Ersatzteilmengen	Ersatzteilmengen
	Ersatzteilbedarf	Ersatzteilbedarf	Ersatzteilbedarf
	Lagerfähigkeit	Lagerfähigkeit	Lagerfähigkeit
	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts
	Lieferantenanzahl	-----	-----
	-----	Einkaufsvorteile von Lieferanten	-----
	-----	Kaufabschlussquote	-----
-----	Verkaufspreis an Kunden	-----	

Tabelle 6: Klassifikationsmerkmalbeurteilung durch die Interviewpartner (eigene Darstellung)

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Klassifikationskriterien wurde das Ersatzteil-Klassifikationstool entsprechend angepasst. In der finalen Grundversion sind die in Tabelle 7 angeführten Merkmale zur Klassifizierung implementiert.

Die Befragungen zeigten weiters, dass die Merkmalausprägungen der einzelnen Kriterien von den Unternehmen unterschiedlich definiert sind. Während FAIS die Ausprägungseinteilung der beim Unternehmen eingesetzten Merkmale im Vergleich zum Klassifikationstool äquivalent vornimmt, kommt es bei Franz Haas Waffelmaschinen und dem Schienenfahrzeugbauunternehmen teils zu anderen Ansätzen. Diese Unterschiede sind ebenfalls in Tabelle 7 dargestellt. Grau hinterlegte Felder deuten darauf hin, dass es sich um Kriterien handelt, zu deren Ausprägungen keine genaueren Details erfragt werden konnten, da diese erst im Zuge der Interviews identifiziert wurden.

Die geführten Gespräche zeigten außerdem auf, dass eine individuelle Anpassbarkeit des Excel-Tools notwendig ist, um eine Anwendung in verschiedenen Unternehmensbereichen zu ermöglichen. Laut den Erkenntnissen sind sogar durch produktgruppenbezogene Modifikationen Vorteile beim Einsatz zu erwarten.

Klassifikationskriterien	Ausprägungen		
	Demo-Tool	Franz Haas Waffelmaschinen	Schienenfahrzeugbauunternehmen
Kritikalität	sehr kritisch / kritisch / unkritisch	Anwendung zukünftig geplant - Ausprägungsgrenzen N/A	Mobilitätsbezogene/Sicherheitsbezogene Kritikalität (2/4 Kategorien)
Obsoleszenzrisiko	hoch / mittel / niedrig	-----	obsolet / nicht obsolet
Ausfall- und Verschleißverhalten	Verbrauchsteile / Reserveteile	Verbrauchsteile / Reserveteile	Verbrauchsteile / Reserveteile
Lebenszyklusphase	Anlauf- / Arbeits- / Abnutzungsperiode	Einteilung nach Durchsatz, Schaltzyklen, Monate oder Betriebsstunden	Überprüfung ob Überholung notwendig ist
Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	aufarbeitbar / nicht aufarbeitbar	nicht aufarbeitbar / geringer Aufwand / hoher Aufwand	aufarbeitbar / nicht aufarbeitbar
Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Einzelteil / Baugruppe / Produkt	-----	Einzelteil / Baugruppe / Produkt
Beschaffungsbedingungen	gut / befriedigend / schlecht	Detaillierte Betrachtung von Wiederbeschaffungszeit und Beschaffungskosten	Detaillierte Betrachtung von Wiederbeschaffungszeit und Beschaffungskosten
CAD-Datei vorhanden	Ja / leicht erzeugbar / Nein	-----	-----
Materialeignung für additive Fertigung	geeignet (Standardpulver) / geeignet (Sonderpulver) / nicht geeignet		
Art der Lagerung	Standard / Schüttgut / stapelbar		
Lagerbestandswert	A-Teile / B-Teile / C-Teile	A-Teile / B-Teile / C-Teile	A-Teile / B-Teile / C-Teile
Anzahl der Lagerabgänge	A-Teile / B-Teile / C-Teile	Anwendung von quantitativen Grenzwerten (4 Kategorien)	A-Teile / B-Teile / C-Teile
Prognostizierbarkeit des Bedarfs	X-Teile / Y-Teile / Z-Teile / S-Teile	Anwendung in Produktionslogistik - Ausprägungsgrenzen N/A	X-Teile / Y-Teile / Z-Teile
Ersatzteilmengen	G-Teile / M-Teile / K-Teile	Anwendung in Produktionslogistik - Ausprägungsgrenzen N/A	Findet Anwendung - Ausprägungsgrenzen N/A
Ersatzteilbedarf	gering / mittel / hoch	-----	Anwendung eines rollierenden Systems
Lagerfähigkeit	voll / eingeschränkt / nicht lagerfähig	Findet keine Anwendung - Abwertungskennziffer empfohlen	Nach Ablaufdatum für z.B. Lacke oder Öle
Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	hoch / mittel / gering	-----	-----
Lieferantenanzahl	gering / mittel / hoch		
Kaufabschlussquote	< 20% / 20%-50% / 51%-80% / > 80%		
Verkaufspreis an Kunden	gering / mittel / hoch		
Oberflächenrauigkeit	fein / mittel / grob	-----	-----
Geringste Wandstärke	< 0,3mm / >= 0,3mm	-----	-----
Anzahl der Funktionsflächen	gering / mittel / hoch		
Volumenverhältnis	< 3 / 3 bis 5 / > 5		
Losgröße	gering / mittel / hoch		

Tabelle 7: Vergleich der Merkmalausprägungen (eigene Darstellung)

Im vorgestellten Demo-Tool ist eine direkte Eingabe der Merkmalausprägungen vorgesehen. Es wird also angenommen, dass bereits im Vorfeld eine Auswertung der Stammdaten erfolgte, die eine Einstufung bezüglich der einzelnen Klassifikationskriterien zulässt. Die jeweiligen Ausprägungsinformationen werden somit als gegeben vorausgesetzt.

Die Experten empfahlen durch Implementierung zusätzlicher Module eine Möglichkeit zu schaffen, um die Merkmalausprägungen durch Eingabe der Stammdaten über eine Schnittstelle direkt zu eruieren. Beispielsweise könnte so eine automatische ABC-Analyse des *Lagerbestandswertes* bzw. der *Anzahl an Lagerabgängen* durchgeführt werden. Ersteres Beispiel wurde zur besseren Veranschaulichung in der finalen Version des Klassifikationstools implementiert. Ebenso wurde für eine Beurteilung der *Beschaffungsbedingungen* nach den zuvor erwähnten Subkriterien ein zusätzliches Modul entwickelt.

Dieses Modulkonzept wäre in weiterer Folge auf mehrere der identifizierten Klassifi-

kationsmerkmale übertragbar. Nähere Informationen zu den zusätzlichen Datenmodulen sind in Kapitel 5.5.2 zu finden.

Im Bereich der Anwendbarkeitsanalyse bezüglich der additiven Fertigung konnten ebenfalls Anpassungsvorschläge identifiziert werden. Die Einführung eines Punktesystems, das nach einem der Strategieanalyse ähnlichem Schema funktioniert, ist laut den Experten von Vorteil, da eine eindeutige Aussage über die 3D-Druckbarkeit in vielen Fällen nicht möglich sei. Zusätzlich ist die Einführung einer Matrix, die sowohl einen wirtschaftlichen als auch einen technologischen Punktwert beinhalten würde, vorteilhaft, da auf diese Weise für die betrachteten Ersatzteile auch eine ökonomische Beurteilung der additiven Fertigung möglich wäre. Aufgrund der hohen Komplexität und thematischen Reichweite wurde von der Implementierung eines solchen Punktesystems und der damit verbundenen Matrix in der vorliegenden Arbeit abgesehen. Dies ist jedoch ein äußerst sinnvoller Ansatz für anschließende Abhandlungen zur funktionalen Erweiterung des Excel-Tools.

Bezüglich der Ergebnisausgabe des Klassifikationstools konnten ebenfalls Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. Zusätzlich zum Ranking der Versorgungsstrategien wurde empfohlen, den im Zuge der Analyse berechneten Punktwert in die Ausgabemaske miteinzubeziehen, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Dieser Vorschlag wurde im weiteren Verlauf der Arbeit umgesetzt (siehe Kapitel 5.6).

Während der Gespräche stellte sich zudem heraus, dass eine automatische Gesamtanalyse aller Artikel zu einem höheren Nutzen des Excel-Tools beitragen könne. Anstatt einzelne Ersatzteile isoliert zu betrachten, gäbe es so die Möglichkeit, Vergleiche des gesamten Artikelspektrums vorzunehmen und durch statistische Auswertungen Beziehungen zwischen Klassifikationsmerkmalen und Bereitstellungsstrategien aufzuzeigen. Diese Auswertungen könnten beispielsweise zeigen, welche Nachserienversorgungsstrategie am häufigsten empfohlen wird, für welchen Sortimentsanteil nur eine einzige Strategie anwendbar ist oder wie groß der durchschnittliche Punktwert einer Strategie ist.

Je nach Wunsch des Anwenderunternehmens müsse ebenso wie beim anfänglichen Konfigurationsprozess des Merkmal- und Ausprägungskatalogs eine Adaption der gewünschten statistischen Ausgaben vor dem Ersteinsatz des Excel-Tools erfolgen, um die unternehmensspezifischen Anforderungen zu erfüllen.

Auch dieses Feedback wurde als zusätzliche Funktion in das Ersatzteil-Klassifikationstool eingearbeitet. Neben einer tabellarischen Ergebnisübersicht der Strategieanalyse aller gelisteten Ersatzteile wurde auch ein Beispiel bezüglich der statistischen Auswertung umgesetzt (siehe Kapitel 5.6).

Nähere Details zum finalen Klassifikationstool und eine genaue Beschreibung aller implementierten Funktionen sind in Kapitel 5 zu finden.

4.2 Spezifikationsanalyse von 3D-Druck-Systemen verschiedener Hersteller

Entscheidet sich ein Unternehmen dafür, die additive Fertigung als Strategieoption zur Bereitstellung von Ersatzteilen zu nutzen, muss im Falle einer unternehmensinternen Erzeugung ein geeignetes 3D-Druck System angeschafft werden. Das am Markt verfügbare Sortiment an Herstellern und Modellen ist äußerst vielfältig und die Eigenschaften der einzelnen Anlagen sind sehr individuell. Die Auswahl reicht von Präzisionsdruckern mit nur kleinem Bauraum und exzellenter Detailauflösung bis zu riesigen Anlagen, die mit multiplen Lasern eine schnelle Erzeugung der gewünschten Bauteile ermöglichen.

Aufgrund der großen Bandbreite an Möglichkeiten wird im Zuge dieses Kapitels näher auf die nach dem derzeitigen Stand der Technik realisierbaren Ersatzteileigenschaften bei der additiven Fertigung in Abhängigkeit des verwendeten 3D-Druckers eingegangen.

Als Grundlage dazu dient die in Tabelle 8 dargestellte Auflistung ausgewählter 3D-Drucker. Insgesamt handelt es sich hierbei um 37 verschiedene Modelle von 10 der renommiertesten Hersteller.

Neben der Druckerbezeichnung sind außerdem Details zu den Bauraumdimensionen (Abmessungen, Grundfläche und Volumen) sowie den Lasereigenschaften (Anzahl, Leistung und Fokusbereich der Laser), der minimalen Schichtdicke und dem ungefähren Preis ersichtlich.

Ziel der Analyse ist die Identifikation geeigneter Merkmale, die es ermöglichen, die Eignung eines Bauteils für die additive Fertigung festzustellen, da das Excel-Tool unabhängig von der Bewertung der einzelnen Bereitstellungsstrategien auch zur Beurteilung der additiven Herstellbarkeit genutzt werden soll. Bei der Angabe von quantitativen Werten zur Abgrenzung der Merkmalausprägungen können keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden, da eine starke Abhängigkeit vom verwendeten 3D-Druckermodell vorliegt. Die Ergebnisse dienen vor allem dazu, den Zusammenhang zwischen den Druckeigenschaften und den verschiedenen Preissegmenten der Drucker besser abschätzen zu können und um eine Einschätzung bezüglich der Anwendbarkeit des 3D-Drucks zu ermöglichen.

Untersucht wird neben den Bauraumdimensionen auch der Preis, die Anzahl an unabhängigen Lasereinheiten als auch der mögliche Detaillierungsgrad eines additiv gefertigten Ersatzteils in Abhängigkeit der geringsten Schichtdickenauflösung und des Laserfokusbereichs.

Hersteller und Modell	Bauraum			Schichtdicke [µm]	Min. Fokusbereich des Lasers [µm]	Lasernzahl und Laserleistung	Preis [Tsd. USD]					
	x [mm]	y [mm]	z [mm]				Fläche [cm²]	Volumen [l]	<100	100-250	250-500	500-1000
SLM Solutions	SLM 125	125	125	156	1,95	70	1 x 400W					
	SLM 280 2.0	280	365	784	28,62	20 - 75	1 od. 2 x 400W/700W			x		
	SLM 500	500	280	1400	51,10	20 - 75	2 od. 4 x 400W/700W					x
	SLM 800	500	280	1400	119,00	20 - 90	4 x 400W/700W					x
Trumpf	TruPrint 1000	Ø 100	100	79	0,79	10 - 50	1 od. 2 x 200W			x		
	TruPrint 3000	Ø 300	400	707	28,27	20 - 150	1 x 500W				N/A	
	TruPrint 5000	Ø 300	400	707	28,27	30 - 150	3 x 500W				N/A	
EOS	EOS M100	Ø 100	95	79	0,75	min. 20	1 x 200W		x			
	EOS M290	250	250	625	20,31	min. 20	1 x 400W					x
	EOS M300-4	300	300	400	900	min. 100	4 x 400W					x
	EOS M400	400	400	400	1600	min. 90	1 x 1000W					x
Concept Laser	EOS M400-4	400	400	400	1600	min. 100	4 x 400W					x
	Prescious M080	80	80	95	64	min. 30	1 x 100W					x
	Mlab cusing / Mlab cusing R	90	90	80	81	15 - 50	1 x 100W			x		
	Mlab cusing 200R	100	100	100	100	15 - 30	1 x 200W			x		
3D-Systems	M1 cusing	250	250	625	15,63	20 - 80	1 x 200W/400W					x
	M2 cusing	250	250	350	625	20 - 80	2 x 200W/400W					x
	X line 2000R	800	400	500	3200	30 - 150	1-4 x 1000W					x
	DMP Flex 100	100	100	80	100	10 - 100	1 x 100W			x		
Xact Metal	DMP Flex 350	275	275	380	756	10 - 100	1 x 500W					x
	Pro X DMP 200	140	140	100	196	10 - 100	1 x 300W					x
	Pro X DMP 300	250	250	300	625	10 - 100	1 x 500W					x
	Pro X DMP 320	275	275	380	756	10 - 100	1 x 500W					x
Renishaw	DMP Factory 350	275	275	380	756	10 - 100	1 x 500W					x
	XM 200C	127	127	127	161	20 - 100	1 x 100W/200W					x
	XM 200S	127	127	127	161	20 - 100	1 x 200W					x
	XM 300C	254	330	330	838	20 - 100	2 od. 4 x 100W					x
Arcam	RenAM 500M	250	250	350	625	20 - 100	1 x 500W					x
	RenAM 500Q	245	245	336	600	20 - 100	4 x 500W					N/A
	AM 250	245	245	300	600	20 - 100	1 x 200W/400W					x
	AM 400	250	250	300	625	20 - 100	1 x 400W					N/A
AddUp	Q10 Plus	200	200	180	400	50 - 200	1 x 3000W (EBM)					x
	Q20 Plus	Ø 350	380	962	36,56	50 - 200	1 x 3000W (EBM)					x
DMG Mori	A2X	200	200	380	400	50 - 200	1 x 3000W (EBM)					x
	FormUp 350	350	350	350	1225	20 - 100	1 od. 2 x 500W					x
Quellen*	Lasertec 12	125	125	200	156	min. 20	1 x 200W/400W					N/A
	Lasertec 30 2nd Gen	300	300	300	900	min. 20	1 x 600W/1000W					x

Tabelle 8: Spezifikationen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

Quellen*
 • <https://www.slm-solutions.com/de/>
 • <https://www.trumpf.com/de/AT/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/>
 • https://www.eos.info/systeme_loesungen/metal/systeme_unc_zubehoer
 • <https://www.concept-laser.de/produkte/maschinen.html>
 • <https://www.3c-systems.com/3c-printers#metal-3c-printers>
 • <https://www.xactmetal.com/>
 • <https://www.renishaw.de/de/additive-fertigungssysteme-auf-metallbasis-3d-druck-37011>
 • <http://www.arcam.com/technology/products/>
 • <https://www.addupsolutions.com/en/systems/>
 • <https://rat.dmgmori.com/produkte/maschinen/additive-manufacturing/pulverbetriebsverfahren>
 • <http://servo1.com/machine-search/>
 • <https://www.amiwaa.com/best-of-3d-printers/>
 • <http://www.pactinc.com/downloads/Vebnar-3dmp-1.pdf>
 • Gebhardt, 2017, S. Abschnitt 3.2
 * Zugelassen am: 15.03.2019

4.2.1 Bauraumgröße

Die in Tabelle 8 angegebenen Bauraumdetails umfassen die Abmessungen in x-, y- und z-Richtung sowie die Größe der Grundfläche und das zur Verfügung stehende Bauraumvolumen. Die z-Achse ist als jene Achse definiert, die vertikal orientiert ist. Betrachtet man die Bauraumabmessungen in x- und y-Richtung, aus deren Produkt die maximale Grundfläche errechnet wird, ist erkenntlich, dass die Modelle der *TruPrint-Serie* des Herstellers *Trumpf* als auch die Modelle *EOS M100* und *Q20 Plus* der Firmen *EOS* und *Arcam* als einzige einen kreisförmigen Bauraum besitzen.

Einige Hersteller bieten verschiedene Bauraumgrößen für dasselbe Modell an. Beim Akquirieren der Daten wurde immer der größtmögliche Bauraum der Modelle herangezogen, um eine Vergleichbarkeit in Bezug auf die maximal herstellbaren Bauteilabmessungen zu gewähren. Grund für die Verfügbarkeit kleinerer Bauräume ist die höhere Effizienz bei der Produktion kleiner Teile. Dabei bietet das Ausweichen auf einen angepassten Bauraum sowohl den Vorteil eines geringeren Bedarfs an Metallpulver, da nur ein kleineres Volumen an Pulver bereitgestellt werden muss, als auch einen geringeren Verbrauch an Schutzgas, da nur ein kleineres Bauraumvolumen damit geflutet werden muss.

Tabelle 9 zeigt die Maximalwerte, Minimalwerte und arithmetischen Mittelwerte bezüglich der Bauraumdimensionen. Als Grundmenge dienen die Daten der ausgewählten Druckermodelle aus Tabelle 8. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse der einzelnen Parameter dabei von unterschiedlichen Druckern stammen können.

	Bauraum				
	x [mm]	y [mm]	z [mm]	Fläche [cm ²]	Volumen [l]
Maximalwert	800	400	850	3200	160
Mittelwert	256	235	294	691	27
Minimalwert	80	80	80	64	0,61

Tabelle 9: Analyse der Bauraumdimensionen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

Der zwischen den Maximal- und Minimalwerten auftretende Vergleichsfaktor ist auffallend groß. Während dieser bei den Dimensionen der drei Raumrichtungen einen Wert von bis zu knapp über 10 erreicht, liegt er bei der Grundfläche bei genau 50 und beim Volumen sogar bei über 260. Das angebotene Sortiment deckt also ein weites Spektrum an Optionen bei der Wahl eines 3D-Druckers ab.

Wie in Abschnitt 2.2.2.3 zum Thema Ersatzteilmengen bereits erwähnt wurde, besteht eine mögliche Vorgehensweise zur Abgrenzung zwischen K- und M-Teilen darin, das maximale Bauraumvolumen des zur Verfügung stehenden 3D-Druckers heranzuziehen. Zur Veranschaulichung der maximal möglichen Ersatzteilabmessungen, die eine additive Fertigung zulassen, sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 jene fünf Druckermodelle angeführt, die die größte Grundfläche (Tabelle 10) bzw. das größte Bauraumvolumen (Tabelle 11) besitzen.

	Hersteller	Modell	Fläche [cm ²]	Volumen [l]
1	Concept Laser	X line 2000R	3200	160,00
2	EOS	EOS M400(-4)	1600	64,00
3	SLM Solutions	SLM 800	1400	119,00
3	SLM Solutions	SLM 500	1400	51,10
5	AddUp	FormUp 350	1225	42,88

Tabelle 10: Größte Bauraumgrundfläche ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

	Hersteller	Modell	Fläche [cm ²]	Volumen [l]
1	Concept Laser	X line 2000R	3200	160,00
2	SLM Solutions	SLM 800	1400	119,00
3	EOS	EOS M400(-4)	1600	64,00
4	SLM Solutions	SLM 500	1400	51,10
5	AddUp	FormUp 350	1225	42,88

Tabelle 11: Größtes Bauraumvolumen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

Das Modell *X line 2000R* von *Concept Laser* weist mit Abstand die größten Dimensionen auf. Gegenüber dem jeweils nächstgrößeren Modell ist die Grundfläche um 100% und das Volumen um knapp 35% größer.

Beim Vergleich der auf Platz zwei liegenden 3D-Drucker ist zu erkennen, dass das Modell *SLM 800* von *SLM Solutions* trotz kleinerer Grundfläche ein größeres Bauraumvolumen als der von *EOS* verfügbare 3D-Drucker *EOS M400(-4)* besitzt. Die Plätze vier und fünf werden in beiden Vergleichskategorien vom selben Druckermode belegt.

4.2.2 Druckeigenschaften

Das Thema Druckeigenschaften behandelt in diesem Abschnitt sowohl den möglichen Detaillierungsgrad beim Strukturaufbau als auch die erreichbare Fertigungsgeschwindigkeit, die stark mit der vorhandenen Anzahl an unabhängig arbeitenden Lasereinheiten korreliert.

In Bezug auf die Fertigungsgeschwindigkeit ist laut Tabelle 8 festzustellen, dass sieben Modelle (~19%) mit bis zu vier Lasereinheiten konfigurierbar sind. Die zur Verfügung stehende Auswahl wird von den Firmen *SLM Solutions* und *EOS* mit je zwei Modellen angeführt, gefolgt von *Concept Laser*, *Xact Metal* und *Renishaw* mit je einem Modell. Offensichtlich ist der Zusammenhang zwischen Preis und Laseranzahl. Die Mehrheit der mit vier Lasereinheiten ausgestatteten 3D-Drucker kostet über 500.000 USD. Einzig das Modell *XM 300C* von *Xact Metal* ist in einem niedrigeren Preissegment angesiedelt (250.000 – 500.000 USD). Grund dafür ist die im Vergleich gering ausfallende Laserleistung von nur 100 W/Laser. Weitere fünf Modelle (~14%) werden mit zwei bzw. drei Lasern angeboten. Die restlichen fünfundzwanzig 3D-Drucker (~67%) sind mit nur einer Lasereinheit erhältlich.

Bevor hier näher auf den möglichen Detaillierungsgrad eingegangen wird, folgt eine Erläuterung des Unterschiedes zwischen Schichtdicke, Druckauflösung und der Größe des kleinstmöglichen Details.

Die Schichtdicke kann als Auflösung der z-Achse beschrieben werden. Sie definiert beim Setup des Druckprozesses, in wie viele einzelne Schichten das Modell zerlegt wird. Je feiner die Schichtdicke gewählt wird, desto mehr Schichten müssen vom Laser des 3D-Druckers bearbeitet werden und dementsprechend kommt es in diesem Fall auch zu längeren Fertigungszeiten.

Somit handelt es sich hierbei, wie beim Interview mit Herrn Hofer (siehe Kapitel 4.1.3.1) bereits erwähnt, um einen weiteren Parameter (neben der Laseranzahl), der die Fertigungsgeschwindigkeit mitbestimmt. Im Regelfall ist von Schichtdicken zwischen 10 µm und 150 µm auszugehen (siehe Tabelle 8).

Auf keinen Fall darf die Schichtdicke mit der Druckauflösung bzw. der Größe des kleinstmöglichen Details verwechselt werden. Unter dem Begriff *Druckauflösung* wird die Größe des kleinsten druckbaren Volumenkörpers verstanden. Hier besteht eine direkte Beziehung zum Fokusbereich des Laserstrahls.

Je kleiner der Fokus ist, desto kleiner können die Details theoretisch ausfallen. In der Praxis ist jedoch meistens eine Einschränkung aufgrund der Größe des kleinstmöglichen Details gegeben. Diese Größe ist materialabhängig und bestimmt beispielsweise wie dick eine Wandstärke ausfallen muss, um den späteren Schritten der Oberflächenbehandlung standhalten zu können.¹⁰³

In Tabelle 12 ist eine Übersicht jener Druckermodelle zu sehen, deren Laser den kleinsten Fokusbereich besitzen. Damit einhergehend ist mithilfe dieser Geräte auch die kleinste theoretische Druckauflösung realisierbar.

	Hersteller	Modell	Min. Fokusbereich des Lasers [µm]
1	Xact Metal	XM 200C	20
1	Xact Metal	XM 300C	20
3	EOS	Prescious M080	30
4	AddUp	FormUp 350	35
4	DMG Mori	Lasertec 12	35

Tabelle 12: Kleinster Laserfokusbereich ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es sich bei den Modellen des Herstellers *Arcam* um solche handelt, die das EBM-Verfahren anwenden. Aus diesem Grund haben sie im Vergleich zu den anderen Modellen höhere Fokusbereich (140 µm bzw.

¹⁰³ Sculpteo: Die Schichtdicke im 3D-Druck: ein wesentliches Element der additiven Fertigung, <https://www.sculpteo.com/de/glossar/schichtstaerke-genauigkeit-der-3d-druck/> (zugegriffen am: 17.03.2019)

250 µm) und erzielen nur relativ große Schichtdicken (50 µm – 200 µm). Für die restlichen Modelle ist ein Fokusbereich von bis zu 100 µm üblich.

4.2.3 Preis

Tabelle 13 zeigt eine nach Preisklassen sortierte Auswertung von den auf Seite 62 angeführten 3D-Druckern. Für fünf Modelle sind keine Preisangaben ersichtlich, da diese nur nach direkter Angebotsnachfrage zur Verfügung stehen. Sie sind durch die Abkürzung N/A (nicht verfügbar) gekennzeichnet.

Während für die additive Fertigung mit Kunststoffmaterialien bereits eine hohe Anzahl an preiswerten Systemlösungen für Privatanwender zur Verfügung stehen, finden sich im Bereich der additiven Metallverarbeitung derzeit nur Modelle für den industriellen Gebrauch.

Erkennbar ist dies an den vergleichsweise hohen Kosten. Mehr als 50% der Modelle liegen preislich über 500.000 USD, während einzig einer der in Tabelle 8 angeführten 3D-Drucker in einem Bereich von unter 100.000 USD liegt.

		Anzahl [1]	Anteil [%]	Bauraumvolumen [l]
Preis [Tsd. USD]	<100	1	2,71	2,05
	100-250	7	18,92	0,65 - 2,05
	250-500	4	10,81	0,61 - 27,66
	500-1000	15	40,54	7,20 - 42,88
	>1000	5	13,51	51,10 - 160,00
	N/A	5	13,51	3,13 - 28,27
	Gesamt	37	100,00	0,61 - 160,00

Tabelle 13: Preis ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)

Die rechte Spalte von Tabelle 13 zeigt, welcher Bereich an möglichen Bauraumvolumina in den einzelnen Preissegmenten abgedeckt wird. Erkennbar ist die starke Korrelation zwischen Preis und Bauraumvolumen. Letzteres ist somit eine die Anschaffungskosten stark beeinflussende Komponente. Die in Abschnitt 4.2.1 dargestellten Druckermodelle, welche die größte Bauraumgrundfläche bzw. das größte Bauraumvolumen aufweisen, sind alle in den oberen Preissegmenten angesiedelt und unterstreichen demnach diese Aussage.

4.2.4 Ableitungen aus der Spezifikationsanalyse

Durch den Vergleich verschiedener Eigenschaften zeigt die Spezifikationsanalyse der 3D-Drucker, dass jedes Modell sehr individuell ist und eine Verallgemeinerung von Aussagen bezogen auf die Einflüsse der Ersatzteilerfertigung nur sehr beschränkt möglich ist. Aus diesem Grund sind die im Excel-Tool berücksichtigten Ausprägungsgrenzen einiger Klassifikationsmerkmale, welche in Zusammenhang mit der 3D-Druckbarkeit stehen, je nach Druckermodell anzupassen. Eine mögliche Lösung zur automatischen Anpassung der Grenzwerte wäre über die Hinterlegung einer

Datenbank, welche die erforderlichen Spezifikationen im Excel-Tool integriert, realisierbar. Durch Auswahl des verfügbaren 3D-Druckers vor Beginn der Analyse könnten die zur Berechnung notwendigen Parameter automatisch angepasst werden.

Klar erkennbar wurde weiters der Zusammenhang des Anschaffungspreises zur Bauraumgröße und Druckgeschwindigkeit. Soll die additive Fertigung nicht nur zur Prototypen-, sondern auch für die Kleinserienfertigung angewandt werden, bietet ein Druckermodell aus dem hochpreisigen Sektor in Anbetracht seiner Eigenschaften klare Vorteile. In diesem Fall hat das betroffene Unternehmen mit hohen Investitionskosten zu rechnen, weshalb eine genaue Untersuchung der Anwendbarkeit im Vorfeld unbedingt notwendig ist. Dazu kann das Excel-Tool ebenfalls behilflich sein.

5 Erstellung des Excel-Tools zur automatischen Ersatzteilklassifikation

Neben dem Prozessablauf zur Entwicklung des Excel-Tools wird in diesem Kapitel weiters der Aufbau und die Funktion des finalen Modells beschrieben sowie die korrekte Anwendung des Tools genauer erläutert.

5.1 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der weiten Verbreitung und guten Kompatibilität mit anderen Datenbanken wurde für die Umsetzung des Ersatzteil-Klassifikationstools *Microsoft Excel* verwendet. Der Programmcode wurde dabei im *Visual Basic for Applications Editor (VBA Editor)* implementiert. Das methodische Vorgehen für die Erstellung des Excel-Tools zur automatischen Ersatzteilklassifikation gliederte sich in drei Hauptabschnitte:

- 1) Dateninput (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 4)
- 2) Modellerstellung
- 3) Modellvalidierung

Abbildung 21 zeigt die mit diesen Abschnitten im Zusammenhang stehenden Prozesse im zeitlichen Verlauf. Dabei ist zu beachten, dass die Größe der eingezeichneten Aktivitäten nicht maßstabsgetreu ist und somit nicht in Relation zur Aktivitätsdauer steht. Die Positionen lassen hingegen auf die chronologische Abfolge der Start- und Endzeitpunkte rückschließen.

Durch die anfangs durchgeführte *Literaturrecherche* (vgl. Kapitel 2) wurde der notwendige Dateninput für die *Erstellung des grundlegenden Modells* generiert (gelber Pfeil in Abbildung 21).

Zu Beginn der Modellerstellung wurde das Layout der Dateneingabemasken sowie der Ergebnisfenster festgelegt und anschließend die zuvor eruierten Klassifikationskriterien und deren Ausprägungen in das Tool eingepflegt. Dieser erste Modellentwurf diente als Basis für die nachfolgenden *Experteninterviews*. Mehr Details zur Erstellung des Demo-Tools sind in Kapitel 5.2 zu finden.

Im Zuge der Gespräche wurden das Demo-Tool und die darin enthaltenen Beurteilungskriterien vorgestellt. Nach dem jeweiligen Interview erfolgte ein *Abgleich der gewonnenen Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Literaturrecherche*.

Festgestellte Differenzen führten zu entsprechenden *Anpassungen und Erweiterungen des Excel-Modells*. Die Neuerungen fanden bereits bei den folgenden Befragungen Berücksichtigung. Dieser Vorgang lief während der Interviewphase als iterativer Prozess ab und wird durch die grün dargestellten Pfeile in Abbildung 21 visualisiert.

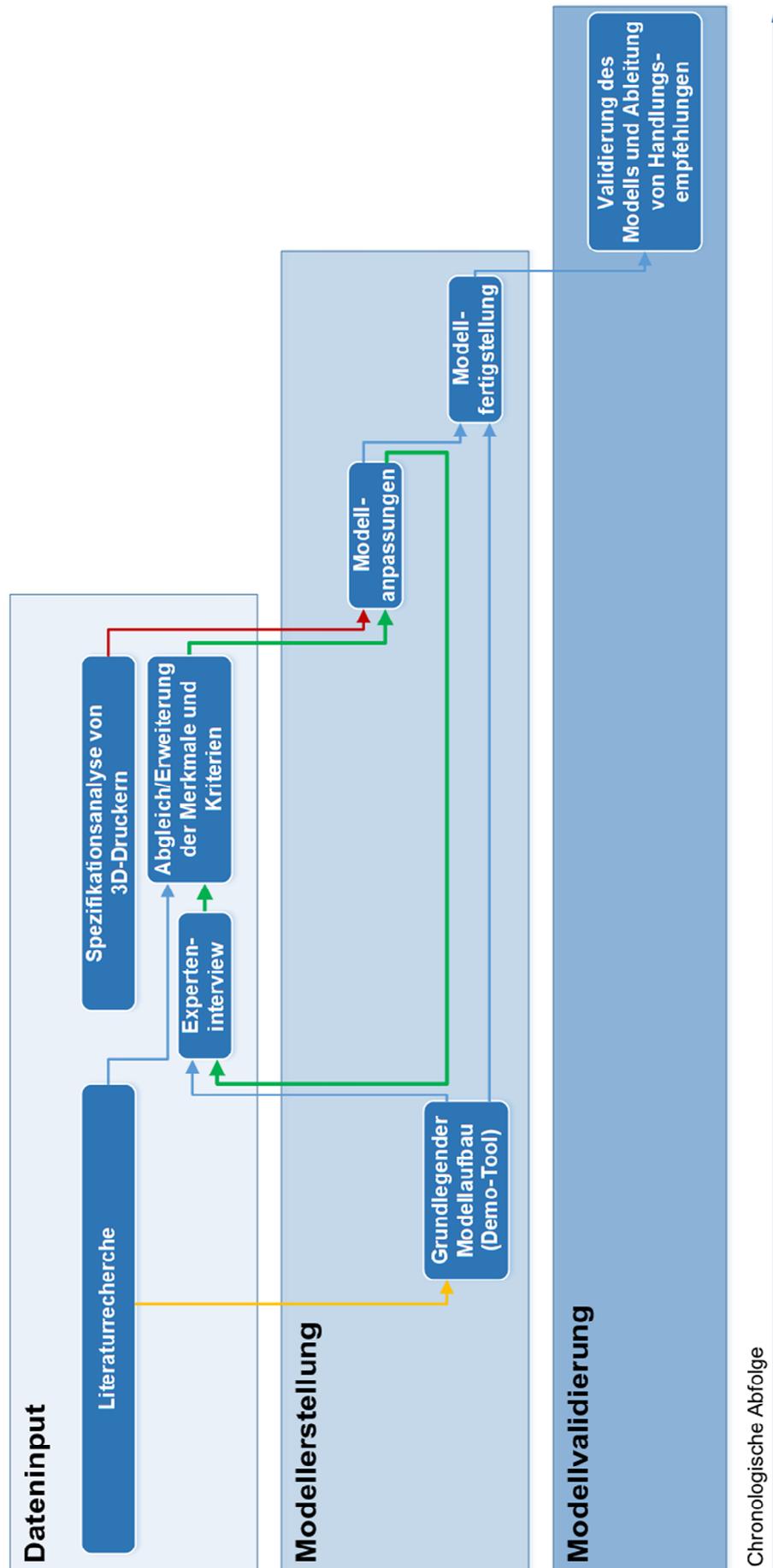


Abbildung 21: Methodisches Vorgehen zur Erstellung des Excel-Tools (eigene Darstellung)

Zusätzlich zu den Experteninterviews flossen die gewonnen Erkenntnisse aus der *Spezifikationsanalyse verschiedener Datenblätter von 3D-Druckern* in das Modell ein (roter Pfeil in Abbildung 21).

Nach Beendigung des letzten Experteninterviews wurde das Excel-Tool im Zuge der *Modellfertigung* einer finalen Anpassung unterzogen und das Layout überarbeitet. Des Weiteren wurde in dieser Phase der VBA-Code erweitert und optimiert, um einen stabilen und schnellen Ablauf des Programms zu gewährleisten.

Wie in Kapitel 5.7 beschrieben, wurde das entwickelte Excel-Tool im letzten Abschnitt einer *Validierung* unterzogen. Diese erfolgte anhand von Testläufen mit Datensätzen verschiedener Ersatzteile. Die Plausibilität der Ergebnisse konnte so überprüft und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

5.2 Demoversion des Ersatzteil-Klassifikationstools

Anfänglich wurde im Zuge der Entwicklung des Demo-Tools das geplante Design festgelegt und eine unabhängige Bewertungsmöglichkeit der betrachteten Ersatzteile für jedes der in Kapitel 2.2 eruierten Klassifikationsmerkmale in Form einer Eingabetabelle geschaffen (vgl. Abbildung 40 auf Seite 85).

Um die Eignung für den 3D-Druck beurteilen zu können, wurden zusätzlich zum *Ersatzteilvermögen* die Merkmale *CAD-Datei vorhanden*, *Oberflächenrauigkeit* und *Geringste Wandstärke* hinzugefügt.

Ebenso wurde eine Eingabemaske für die Festlegung der gewünschten Programmparameter vor Durchführung der Strategieanalyse gestaltet (siehe Abbildung 22).

Analyse starten

Artikelnummer Fortlaufende Nummer

Relevante Strategien:

- Nutzung kompatibler Teile
- Endbevorratung
- Interne Nachfertigung
- Externe Nachfertigung
- Altteilewiederverwendung
- Wiederinstandsetzung

3D-Druck berücksichtigen:

Start Zurücksetzen Abbrechen

Abbildung 22: Erstentwurf der Eingabemaske des Ersatzteil-Klassifizierungstools in Excel (eigene Darstellung)

Diese bietet dem Anwender folgende Einstellungsmöglichkeiten zu Beginn der Analyse:

- Eingabe der zu analysierenden Artikelnummer bzw. fortlaufenden Nummer
- Definition der zu berücksichtigenden Strategien bei der Analyse
- Auswahl zur Überprüfung der 3D-Druckbarkeit

Für die Darstellung der Analyseergebnisse wurde außerdem ein Ausgabefeld gestaltet, welches in Abbildung 23 in Form eines Beispiels dargestellt ist.

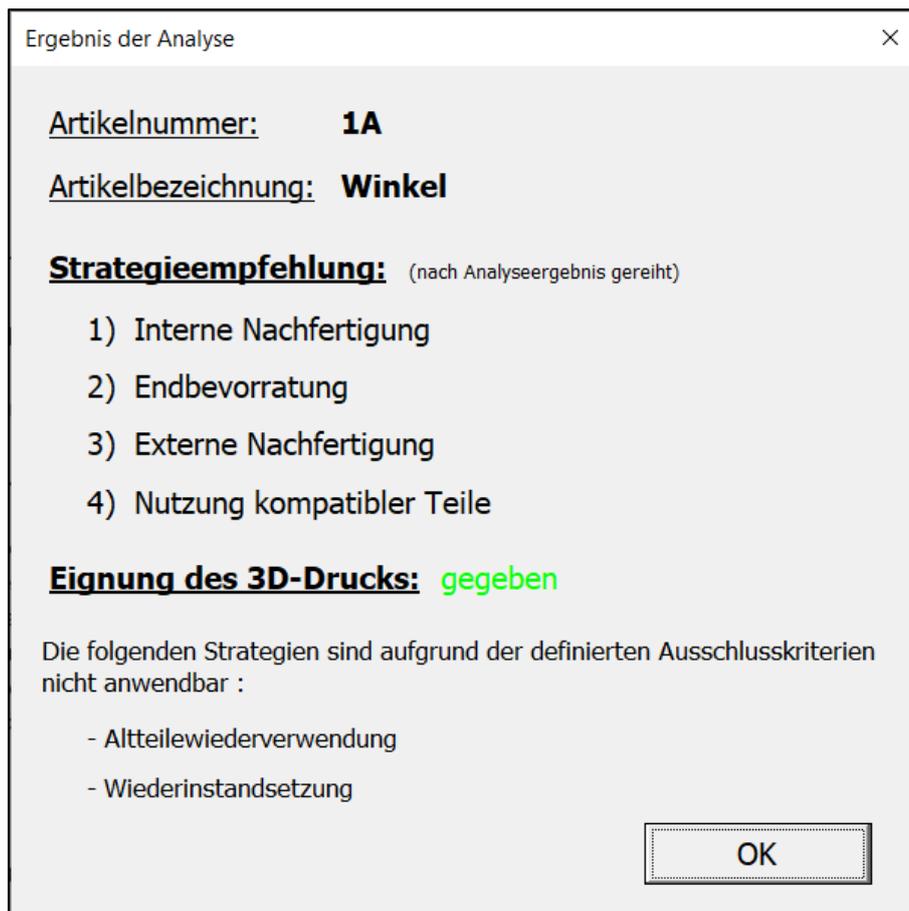


Abbildung 23: Erstentwurf des Ausgabefeldes des Ersatzteil-Klassifizierungstools in Excel – Beispiel (eigene Darstellung)

In diesem sind neben den Stammdaten des analysierten Ersatzteils folgende Informationen ersichtlich:

- Eine empfohlene Reihung der in Frage kommenden Bereitstellungsstrategien
- Die Beurteilung der Herstellbarkeit mittels SLM-Verfahren (Eignung gegeben bzw. Eignung nicht gegeben)
- Eine Liste der ausgeschlossenen Strategien

5.3 Modellaufbau und Bewertungsschema

Das entwickelte Excel-Tool besteht aus einzelnen Modulen, die in verschiedenen Tabellenblättern implementiert sind. Wie in Abbildung 24 dargestellt, sind diese durch farbliche Markierungen in vier Kategorien eingeteilt.

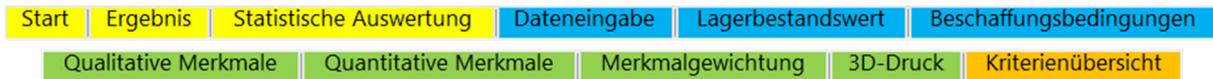


Abbildung 24: Tabellenblätter des Excel-Tools (eigene Darstellung)

- Gelb markierte Tabellenblätter („Start“, „Ergebnis“, „Statistische Auswertung“): Diese kennzeichnen Module, die mit der Durchführung der Analyse sowie der Ausgabe und Auswertung von Ergebnissen im Zusammenhang stehen.
- Blau markierte Tabellenblätter („Dateneingabe“, „Lagerbestandswert“, „Beschaffungsbedingungen“): Module dieser Kategorie dienen der Versorgung des Tools mit relevanten Daten bezüglich der einzelnen zu analysierenden Ersatzteile. Eine nähere Beschreibung erfolgt in Kapitel 5.5 - *Eingabe der benötigten Daten*.
- Grün markierte Tabellenblätter („Qualitative Merkmale“, „Quantitative Merkmale“, „Merkmalgewichtung“, „3D-Druck“): Diese Tabellenblätter dienen der in Kapitel 5.4 beschriebenen Modellkonfiguration. Anhand der eingegebenen Daten in diesen Modulen kann definiert werden, welche Merkmalausprägungen vor- bzw. nachteilig für die verschiedenen Bereitstellungsstrategien sind.
- Orange markiertes Tabellenblatt („Kriterienübersicht“): Die hier enthaltenen Informationen bieten eine Übersicht der im Zuge des Modellkonfigurationsprozesses definierten Klassifikationsmerkmale inklusive deren Ausprägungen. Durch farbliche Hinterlegungen sind im Tabellenblatt spezielle Eigenschaften der Ausprägungen gekennzeichnet (z.B. Ausschlusskriterien). Nähere Details sind in Abschnitt 5.4.4 zu finden.

Bevor das Excel-Tool zur Verwendung bereit ist, muss dieses nach den Ansprüchen des jeweiligen Unternehmens konfiguriert werden. Weiters ist es notwendig, die gewünschten Ersatzteildaten zu importieren. Danach kann die Analyse gestartet und die Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden. Der Prozess zur Strategieauswahl kann vereinfacht in vier Schritte unterteilt werden und ist in Abbildung 25 dargestellt.

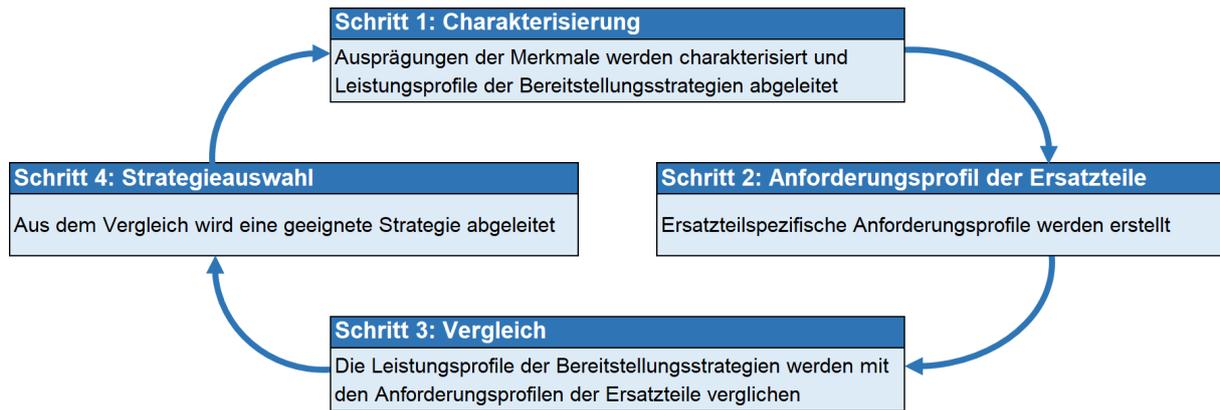


Abbildung 25: Prozess zur Auswahl einer Bereitstellungsstrategie (eigene Darstellung)

Im ersten Schritt werden die Ausprägungen der jeweils definierten Ersatzteilmerkmale systematisch erfasst und in zwei grundlegende Ausprägungsgruppen differenziert. Dieser Vorgang ist Teil der Modellkonfiguration, die in Kapitel 5.4 näher beschrieben wird.

In der ersten Gruppe werden diejenigen Ausprägungen erfasst, die zur Unterbindung einer der Nachserienversorgungsstrategien führen (Ausschlusskriterien). Beispielsweise führt die Ausprägung *nicht lagerfähig* des Merkmals *Lagerfähigkeit* zur Unterbindung der Strategie *Endbevorratung*. Durch dieses Ausschlussverfahren kann der Aufwand beim Beurteilungsvorgang der Strategieeignungen reduziert werden, da für betroffene Ersatzteile von einer Bewertung abgesehen wird.

Die restlichen Merkmalausprägungen bilden die zweite Gruppe. In dieser sind somit jene Ausprägungen enthalten, die bei der Analyse in den Folgeschritten bewertet werden müssen.

Um eine Unterscheidung zwischen strategiebegünstigenden bzw. -erschwerenden Ausprägungen vornehmen zu können, ist es zusätzlich möglich, eine Kennzeichnung von nachteiligen Ausprägungen durchzuführen. Betrachtet man z.B. das Merkmal *Fertigungsstufe*, so ist die Ausprägung *System/Produkt* für die Strategie *Endbevorratung* nachteilig, da es zu einer großen Kapitalbindung während der Lagerung kommen würde.

Durch diesen Gruppierungsvorgang werden Leistungsprofile der einzelnen Bereitstellungsstrategien abgeleitet.

Der *zweite Schritt* dient der Erstellung von Anforderungsprofilen für die zu analysierenden Ersatzteile. Hierbei wird für jedes Klassifikationsmerkmal eines Bauteils eine Einteilung in eine der definierten Ausprägungen vorgenommen (vgl. Kapitel 5.5). Für jedes Ersatzteil entsteht durch die Zuweisung der Merkmalausprägungen ein individuelles Anforderungsprofil.

Die so entstandenen Anforderungsprofile werden im *dritten Schritt* mit den Leistungsprofilen der Bereitstellungsstrategien verglichen.

Aufgrund der zuvor definierten Leistungsprofile kann eine Bewertung der einzelnen

Versorgungsstrategien in Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen erfolgen. Dies passiert automatisch durch den im Excel-Tool hinterlegten Programmcode. Als Grundlage zur Bewertung dient die folgende Formel:

$$\text{Strategiebewertung} = \sum_{i=1}^n \text{Merkmalgewichtung}_i \cdot \text{Ausprägungskategorie}_i$$

Formel 3: Bewertung der Strategieeignung

Die Strategiebewertung spiegelt einen Punktwert wider, der sich aus der Summe der Produkte von Merkmalgewichtungen und den jeweils dazugehörigen Ausprägungskategorien berechnet. Nachfolgend werden die einzelnen Variablen der Formel näher erläutert:

- Anzahl der Klassifikationsmerkmale n :
Die Variable n entspricht der Gesamtanzahl an qualitativen und quantitativen Merkmalen, die im Zuge der Konfiguration des Excel-Tools definiert wurden.
- Merkmalgewichtung:
Die Merkmalgewichtung wird ebenfalls während der Modellkonfiguration bestimmt. Dabei kann ein Wert zwischen null und zehn gewählt werden. Je höher der Wert, desto höher fällt der Anteil der Punktebewertung des betrachteten Merkmals aus.
 - Bewertung von 0:
Das Merkmal findet in der Auswertung keine Berücksichtigung. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn ein Merkmal ausschließlich zur Beurteilung der 3D-Druckbarkeit definiert wurde.
 - Bewertung von 10:
Das Merkmal wird in der Auswertung sehr stark berücksichtigt.
- Ausprägungskategorie:
Diese kann den Wert eins oder zwei annehmen und steht in Korrelation mit der im ersten Schritt des Auswahlprozesses getroffenen Einteilung.
 - Bewertung von 1:
Dabei handelt es sich um eine Ausprägung, die nachteilig für die betrachtete Bereitstellungsstrategie ist.
 - Bewertung von 2:
Ausprägungen die nicht als nachteilig für eine Strategie eingestuft wurden, erhalten eine Bewertung von zwei.

Wie oben erwähnt, ist z.B. die Ausprägung *System/Produkt* des Merkmals *Fertigungsstufe* für die Strategie *Endbevorratung* nachteilig und erhält somit eine Bewertung von 1. Die Ausprägungen *Einzelteil* und *Gruppe/Modul* sind demnach mit 2 zu bewerten.

Im vierten *Schritt* findet die Auswahl der geeignetsten Strategie statt. Dazu werden die erreichten Punktwerte aufsteigend gereiht und der Anwender erhält eine entsprechende Empfehlung über die zu wählende Nachserienversorgungsstrategie.

Da es sich bei der Auswahl einer geeigneten Bereitstellungsstrategie um einen dynamischen Prozess handelt, müssen die vier beschriebenen Schritte regelmäßig durchlaufen werden, um sicherzustellen, dass die getroffenen Einstellungen am aktuellen Stand sind. Daher stellt Abbildung 25 die vier Schritte als geschlossenen, iterativen Kreislauf dar.

Eine zusätzliche Option im Auswertungsverfahren stellt die Überprüfung der 3D-Druckbarkeit dar. Da diese vor allem vom verwendeten Modell des 3D-Druckers abhängt, ist auch hier eine individuelle Konfiguration vor der Erstanwendung des Excel-Tools notwendig. Im Zuge dieser Konfiguration wird ein Anforderungsprofil bezüglich verschiedener Bauteileigenschaften definiert, das zur Beurteilung der Druckbarkeit herangezogen wird.

Das Anforderungsprofil spiegelt die Limitationen des verwendeten 3D-Drucker Modells wider und ist dadurch sehr spezifisch. Beispielsweise könnten darin die minimal zulässige Wandstärke bzw. eine Liste der verwendbaren Werkstoffe enthalten sein.

Beim Analyseprozess wird Schritt für Schritt verglichen, ob die beurteilungsrelevanten Ausprägungen des betrachteten Ersatzteils mit dem Anforderungsprofil übereinstimmen. Ist dies für alle Merkmale der Fall, handelt es sich um ein additiv herstellbares Ersatzteil. Sobald es allerdings zu einer Abweichung während des Vergleichs kommt, wird das betroffene Ersatzteil sofort als „nicht druckbar“ eingestuft und der Prozess abgebrochen. Von einer Überprüfung der restlichen Kriterien wird somit abgesehen, um den Beurteilungsprozess so schnell und effizient wie möglich zu durchlaufen.

5.4 Modellkonfiguration

Jedes Unternehmen hat individuelle Ansprüche bezüglich der Ersatzteilklassifikation. Dies zeigten speziell die Experteninterviews mit den jeweiligen Firmenvertretern. Aus diesem Grund ist vor der ersten Verwendung des Excel-Tools eine anfängliche Modellkonfiguration nach dem in Abbildung 26 dargestellten Schema durchzuführen. Der Anwender erkennt die in diesem Zusammenhang relevanten Tabellenblätter an der grünen Einfärbung (vgl. Abbildung 24).

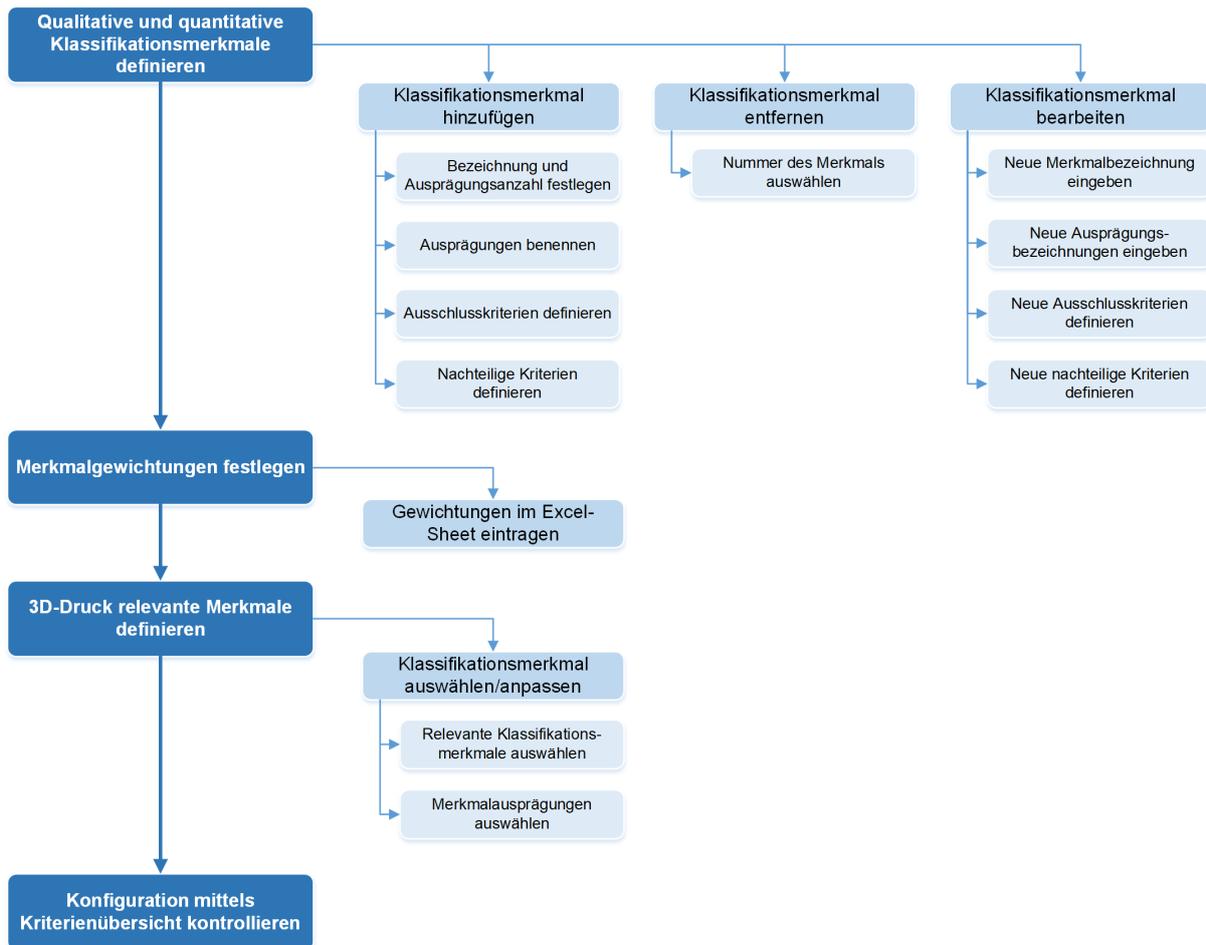


Abbildung 26: Modellkonfigurationsprozess (eigene Darstellung)

Nachfolgend werden die einzelnen Konfigurationsschritte durch Screenshots des entwickelten Tools sowie durch Anwendungsbeschreibungen genauer erläutert.

5.4.1 Klassifikationsmerkmale

Zuerst müssen die Klassifikationsmerkmale und ihre Ausprägungen definiert werden. Für eine einfache Differenzierung zwischen qualitativen und quantitativen Merkmalen, erfolgt das Setup auf zwei separaten Tabellenblättern, die als „Qualitative Merkmale“ und „Quantitative Merkmale“ bezeichnet sind. Das Layout und die zur Verfügung stehenden Funktionsschaltflächen sind ident und die Bedienung erfolgt für beide Tabellenblätter nach demselben Prinzip. Dies ist in den Abbildungen 27 und 28

zu erkennen. Weiters sind jene Merkmale dargestellt, die im Zuge der vorliegenden Arbeit als mögliche Klassifikationskriterien identifiziert wurden.

Qualitative Merkmale		Klassifikationsmerkmal hinzufügen	Klassifikationsmerkmal entfernen	Klassifikationsmerkmal bearbeiten
Nr.	Klassifikationsmerkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
1	Kritikalität	sehr kritisch	kritisch	unkritisch
2	Obsoleszenzrisiko	gering	mittel	hoch
3	Ausfall- und Verschleißverhalten	Reserveteil	Verbrauchsteil	
4	Lebenszyklusphase	Anlaufperiode	Arbeitsperiode	Abnutzungsperiode
5	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	reparierbar	nicht reparierbar	
6	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Einzelteil	Gruppe/Modul	System/Produkt
7	Beschaffungsbedingungen	gut	befriedigend	schlecht
8	CAD-Datei vorhanden	Ja	leicht erzeugbar	Nein
9	Materialeignung für additive Fertigung	geeignet / Standardpulver	geeignet / Sonderpulver	nicht geeignet
10	Art der Lagerung	Standard	Schüttgut	stapelbar

Abbildung 27: Konfigurationsbeispiel der qualitativen Merkmale (eigene Darstellung)

Quantitative Merkmale		Klassifikationsmerkmal hinzufügen	Klassifikationsmerkmal entfernen	Klassifikationsmerkmal bearbeiten	
Nr.	Klassifikationsmerkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
1	Lagerbestandswert	A-Teile	B-Teile	C-Teile	
2	Anzahl der Lagerabgänge	A-Teile	B-Teile	C-Teile	
3	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	X-Teile	Y-Teile	Z-Teile	S-Teile
4	Ersatzteilvermögen	G-Teile	M-Teile	K-Teile	
5	Ersatzteilbedarf	geringer Bedarf	mittlerer Bedarf	hoher Bedarf	
6	Lagerfähigkeit	voll lagerfähig	eingeschränkt lagerfähig	nicht lagerfähig	
7	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	geringe Kosten	mittlere Kosten	hohe Kosten	
8	Oberflächenrauigkeit	fein	mittel	grob	
9	Geringste Wandstärke	< 0.3 mm	>= 0.3 mm		
10	Lieferantenanzahl	gering	mittel	hoch	
11	Kaufabschlussquote	< 20%	20% - 50%	51% - 80%	> 80%
12	Verkaufspreis	geringer Preis	mittlerer Preis	hoher Preis	
13	Anzahl der Funktionsflächen	gering	mittel	hoch	
14	Volumenverhältnis	< 3	3 bis 5	> 5	
15	Losgröße	gering	mittel	groß	

Abbildung 28: Konfigurationsbeispiel der quantitativen Merkmale (eigene Darstellung)

Auf den beiden Tabellenblättern sind jeweils die folgenden drei Funktionsschaltflächen zu finden:

1) Klassifikationsmerkmal hinzufügen:

Nach Festlegung der neuen Klassifikationsmerkmalbezeichnung sowie der gewünschten Ausprägungsanzahl, müssen im zweiten Schritt die einzelnen Ausprägungsbezeichnungen definiert werden (siehe Abbildungen 29 und 30).

Klassifikationsmerkmal hinzufügen ✕

Bezeichnung des Klassifikationsmerkmals:

Anzahl der Merkmalausprägungen:

Abbildung 29: Klassifikationsmerkmal hinzufügen - Schritt 1 (eigene Darstellung)

Abbildung 30: Klassifikationsmerkmal hinzufügen - Schritt 2 (eigene Darstellung)

Im Anschluss müssen für jede Merkmalausprägung diejenigen Nachversorgungsstrategien ausgewählt werden, die bei Vorliegen der betrachteten Ausprägung ausgeschlossen werden sollen.

Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 31 dargestellt. Wird ein Ersatzteil bezogen auf seine *Kritikalität* als *sehr kritisch* eingestuft, so werden die Strategien *Altteilewiederverwendung* und *Wiederinstandsetzung* ausgeschlossen.

Abbildung 31: Ausschlusskriterien definieren (eigene Darstellung)

Über eine ident aufgebaute Eingabemaske erfolgt im letzten Schritt die Auswahl nachteiliger Strategien für die jeweiligen Ausprägungen. Danach wird das neue Klassifikationsmerkmal in der Übersichtstabelle hinzugefügt und der Prozess ist abgeschlossen.

2) Klassifikationsmerkmal entfernen:

Wird die Schaltfläche „*Klassifikationsmerkmal entfernen*“ geklickt, öffnet sich die in Abbildung 32 dargestellte Eingabemaske. Hier muss einzig die fortlaufende Referenznummer, welche jedem Klassifikationsmerkmal zugewiesen ist (siehe Abbildung 27 bzw. Abbildung 28), für das zu löschende Merkmal eingegeben und die Aktion durch Klick auf „*Bestätigen*“ gestartet werden. Nach erneuter Bestätigungsaufforderung wird das Klassifikationskriterium aus der Tabelle entfernt und alle in Verbindung stehenden Daten anderer Tabellenblätter werden gelöscht.

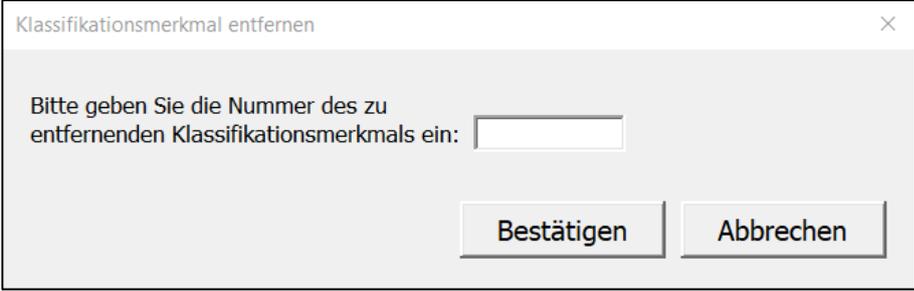
The image shows a dialog box titled "Klassifikationsmerkmal entfernen" with a close button (X) in the top right corner. The main text reads: "Bitte geben Sie die Nummer des zu entfernenden Klassifikationsmerkmals ein:". Below this text is a single-line text input field. At the bottom of the dialog, there are two buttons: "Bestätigen" and "Abbrechen".

Abbildung 32: Klassifikationsmerkmal entfernen (eigene Darstellung)

3) Klassifikationsmerkmal bearbeiten:

Auch beim Ausführen dieser Aktion muss im ersten Schritt angegeben werden, welches Merkmal bearbeitet werden soll. Dies erfolgt nach demselben Prinzip wie beim Entfernen eines Klassifikationskriteriums über Eingabe der fortlaufenden Referenznummer des gewünschten Merkmals (vgl. Abbildung 32). Anschließend ist zwischen zwei Bearbeitungsmöglichkeiten zu wählen. Mithilfe der ersten Funktion kann die Merkmalbezeichnung geändert werden (siehe Abbildung 33).

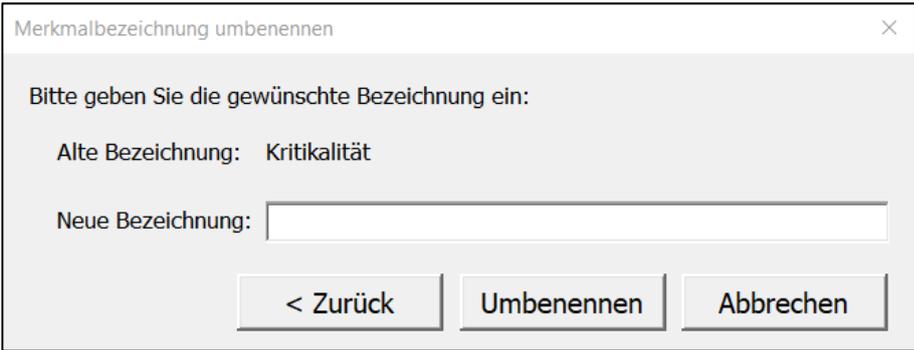
The image shows a dialog box titled "Merkmalbezeichnung umbenennen" with a close button (X) in the top right corner. The main text reads: "Bitte geben Sie die gewünschte Bezeichnung ein:". Below this text, there are two lines of information: "Alte Bezeichnung: Kritikalität" and "Neue Bezeichnung:" followed by a single-line text input field. At the bottom of the dialog, there are three buttons: "< Zurück", "Umbenennen", and "Abbrechen".

Abbildung 33: Merkmalbezeichnung umbenennen (eigene Darstellung)

Die zweite Funktion bietet die Möglichkeit, Änderungen an den Merkmalausprägungen vorzunehmen. Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, können Ausprägungen durch die Schaltflächen "+" und "-" hinzugefügt bzw. entfernt als auch die Bezeichnungen der einzelnen Ausprägungen geändert werden.

Nach Klick auf "*Weiter* >" können Anpassungen bezüglich der definierten Aus-

schlusskriterien bzw. der als nachteilig definierten Merkmale getroffen werden. Dies erfolgt erneut über die in Abbildung 31 vorgestellte Eingabemaske.

Merkmalausprägungen bearbeiten

Ausgewähltes Klassifikationsmerkmal:
Kritikalität

Bitte geben Sie die gewünschten Bezeichnungen ein:

Alte Bezeichnung		Neue Bezeichnung
Ausprägung 1: sehr kritisch	-->	<input type="text"/>
Ausprägung 2: kritisch	-->	<input type="text"/>
Ausprägung 3: unkritisch	-->	<input type="text"/>

- + < Zurück Weiter > Abbrechen

Abbildung 34: Merkmalausprägungen bearbeiten (eigene Darstellung)

5.4.2 Merkmalgewichtung

Nachdem die qualitativen und quantitativen Merkmale festgelegt wurden, muss jedem Merkmal eine Gewichtung zugeteilt werden. Aufgrund unternehmensspezifischer Betrachtungen erfolgt dieser Vorgang basierend auf Inputs von firmeninternen Experten über das Tabellenblatt *Merkmalgewichtung*. Wie bereits weiter oben beschrieben, kann diese einen Wert zwischen 0 und 10 annehmen. Je höher die Gewichtung ausfällt, desto stärker wirkt sich das Merkmal auf die Strategieberatung aus. Merkmale, die nur zur Beurteilung der 3D-Druckbarkeit angeführt sind, erhalten einen Wert von null.

Zu beachten ist, dass vor allem die Relation der einzelnen Gewichtungen untereinander entscheidend ist.

Werden Ersatzteilmerkmale, wie unter Kapitel 5.4.1 beschrieben, hinzugefügt, entfernt oder umbenannt, so erfolgt eine automatische Anpassung der Tabelle zur Festlegung der Merkmalgewichtungen.

In Abbildung 35 ist ein Beispiel einer abgeschlossenen Merkmalgewichtung im Excel-Tool dargestellt.

Merkmalgewichtung		Geben Sie bitte für jedes Merkmal eine Gewichtung im Bereich von 0 - 10 an. 0.....Merkmal wird nicht in die Auswertung miteinbezogen 10.....Merkmal wird sehr stark in die Auswertung miteinbezogen			
		Klassifikationsmerkmal	Merkmalgewichtung		
qual.	Kritikalität	5			
	Obsoleszenzrisiko	3,5			
	Ausfall- und Verschleißverhalten	2			
	Lebenszyklusphase	1			
	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	3			
	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	1,5			
	Beschaffungsbedingungen	4,5			
	CAD-Datei vorhanden	0			
	Materialeignung für additive Fertigung	0			
	Art der Lagerung	0,5			
quant.	Lagerbestandswert	3			
	Anzahl der Lagerabgänge	3,5			
	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	2,5			
	Ersatzteilmengen	1			
	Ersatzteilbedarf	4			
	Lagerfähigkeit	1,5			
	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	2			
	Oberflächenrauigkeit	0			
	Geringste Wandstärke	0			
	Lieferantenzahl	2,5			
	Kaufabschlussquote	3			
	Verkaufspreis	3,5			
	Anzahl der Funktionsflächen	0			
	Volumenverhältnis	0			
Losgröße	0				

Abbildung 35: Konfigurationsbeispiel der Merkmalgewichtung im Excel-Tool (eigene Darstellung)

5.4.3 Relevante Merkmale der additiven Fertigbarkeit

Eine weitere Option der Modellkonfiguration wird über das Tabellenblatt *3D-Druck* geboten. Wie in Abbildung 36 dargestellt, werden hier jene Merkmale angezeigt, die für die Beurteilung der additiven Fertigbarkeit von Bedeutung sind. Außerdem ist durch grün hinterlegte Ausprägungen ersichtlich, welche Voraussetzungen ein Ersatzteil erfüllen muss, um die Herstellung mittels additiver Fertigung zu ermöglichen. Nur Ersatzteile, deren Ausprägungen mit dem Anforderungsprofil aller gelisteten Merkmale übereinstimmen, werden im Zuge der Analyse in Bezug auf die Herstellbarkeit mittels additiver Fertigung als geeignet eingestuft.

3D-Druck			
Klassifikationsmerkmale auswählen/anpassen			
Klassifikationsmerkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
CAD-Datei vorhanden	Ja	leicht erzeugbar	Nein
Materialeignung für additive Fertigung	geeignet / Standardpulver	geeignet / Sonderpulver	nicht geeignet
Ersatzteilmengen	G-Teile	M-Teile	K-Teile
Oberflächenrauigkeit	fein	mittel	grob
Geringste Wandstärke	< 0.3 mm	>= 0.3 mm	
Anzahl der Funktionsflächen	gering	mittel	hoch
Volumenverhältnis	< 3	3 bis 5	> 5
Losgröße	< 10	10-100	> 100

Abbildung 36: Konfigurationsbeispiel der 3D-Druck Kriterien im Excel-Tool (eigene Darstellung)

Durch Klicken der Schaltfläche „Klassifikationsmerkmale auswählen/anpassen“ kann das Anforderungsprofil individuell in zwei Schritten konfiguriert werden.

Im ersten Schritt können aus einer Liste, welche die zuvor definierten qualitativen und quantitativen Ersatzteilmerkmale beinhaltet (siehe Abschnitt 5.4.1), jene Merkmale ausgewählt werden, die während der 3D-Druckbarkeitsanalyse berücksichtigt werden sollen. Die einzelnen Klassifikationskriterien können durch einen Klick ausgewählt und markiert werden, wodurch das Häkchen vor dem Merkmal erscheint und eine blaue Einfärbung zu erkennen ist (siehe Abbildung 37).

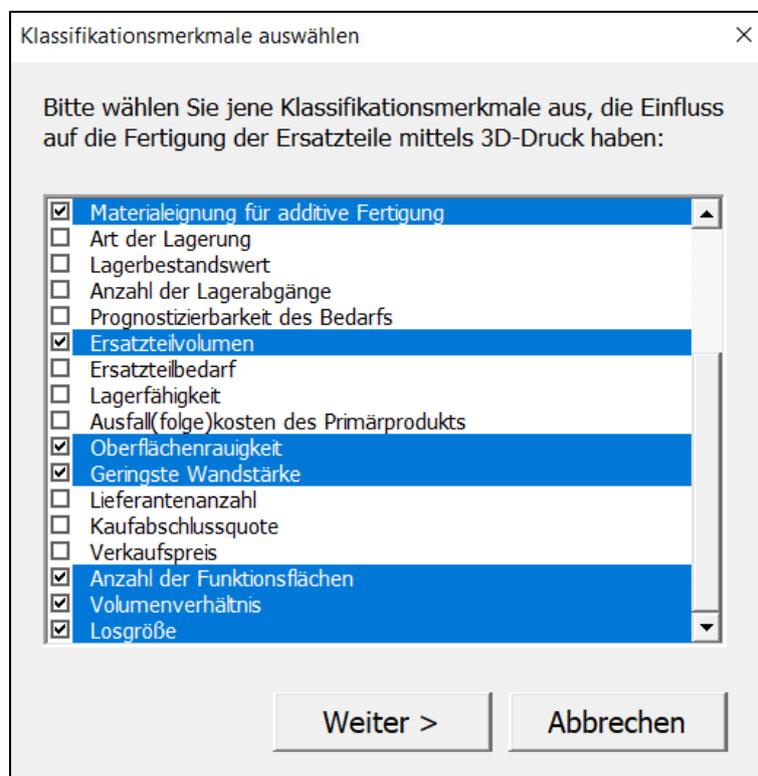


Abbildung 37: Definition der für den 3D-Druck relevanten Klassifikationsmerkmale - Schritt 1 (eigene Darstellung)

Anschließend erfolgt die Auswahl jener Merkmalausprägungen, die vorliegen müssen, um die additive Fertigung für ein Ersatzteil zu ermöglichen. Dazu gibt es für jedes zu berücksichtigende Merkmal ein Übersichtsblatt, in dem die Auswahl in gleicher Weise wie im vorigen Schritt erfolgt. Dies ist in Abbildung 38 ersichtlich. Um den zweiten Schritt der Konfiguration abzuschließen, muss die Schaltfläche „Fertigstellen“ geklickt werden. Das Fenster schließt sich und die Übersicht am Tabellenblatt *3D-Druck* wird automatisch aktualisiert.

Werden die Klassifikationskriterien bzw. deren Merkmale, wie unter Punkt 5.4.1 beschrieben, geändert, so weist das Excel-Tool durch eine Nachrichtenbox automatisch darauf hin, dass eventuell ein Update des Tabellenblatts *3D-Druck* notwendig ist. Für die in den Abbildungen 37 und 38 dargestellten Konfigurationsmasken erfolgt in diesem Fall ebenfalls eine automatische Anpassung entsprechend den getätigten Änderungen.

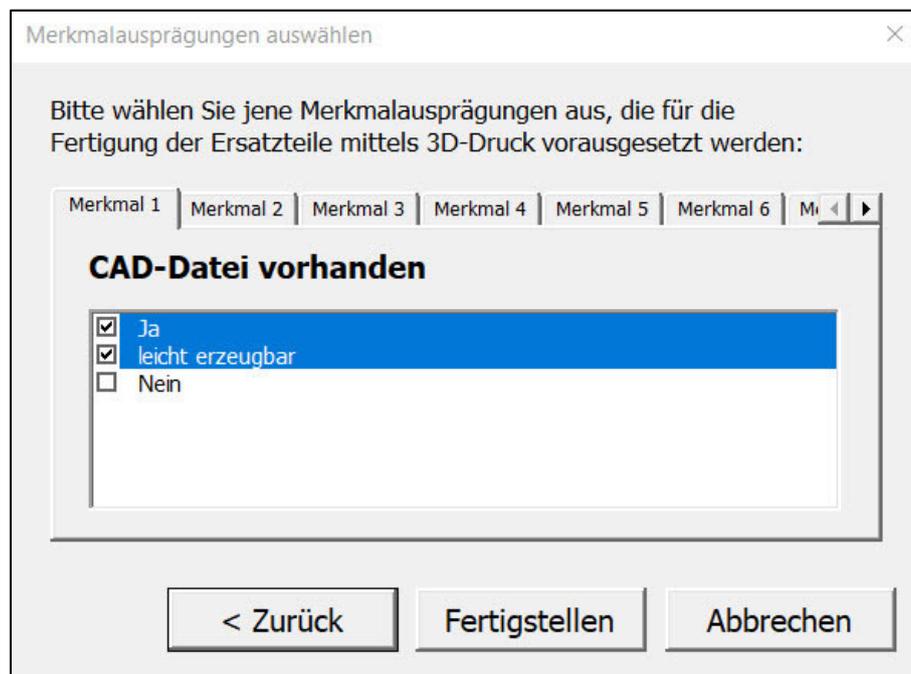


Abbildung 38: Definition der für den 3D-Druck relevanten Klassifikationsmerkmale - Schritt 2 (eigene Darstellung)

5.4.4 Kriterienübersicht

Das orange markierte Tabellenblatt *Kriterienübersicht* (vgl. Abbildung 24) bietet einen automatisch generierten Gesamtüberblick bezüglich des unter Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Konfigurationsschrittes. Dabei wird für jede der sechs Versorgungsstrategien eine Auflistung aller Klassifikationsmerkmale inklusive deren Ausprägungen angezeigt. Für die Kennzeichnung von Ausprägungen, die zum Ausschluss einer Strategie führen bzw. nachteilig für diese sind, wird die folgende farbliche Codierung angewandt:

- Orange markierte Ausprägungen: Diese wurden als nachteilig für die betroffene Strategie konfiguriert.
- Rot markierte Ausprägungen: Diese wurden als Ausschlusskriterium für die betroffene Strategie konfiguriert.

Abbildung 39 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt der Kriterienübersicht für die Bereitstellungsstrategie „Endbevorratung“.

Es ist zu erkennen, dass Ersatzteile, deren Lagerfähigkeit als *eingeschränkt lagerfähig* bzw. *nicht lagerfähig* eingestuft werden, zum Ausschluss der Endbevorratung führen. Weiters ist zum Beispiel ersichtlich, dass Ersatzteile mit großem Volumen (G-Teile) oder hohem Wertschöpfungsgrad (System/Produkt) nachteilig für diese Strategie sind. Dies liegt in dem damit verbundenen Anstieg der Lagerhaltungskosten begründet.

Kriterienübersicht		<table border="1"> <tr> <td>NKT:</td><td>Nutzung kompatibler Teile</td> <td>ENF:</td><td>Externe Nachfertigung</td> </tr> <tr> <td>EBV:</td><td>Endbevorratung</td> <td>AWV:</td><td>Altteilwiederverwendung</td> </tr> <tr> <td>INF:</td><td>Interne Nachfertigung</td> <td>WII:</td><td>Wiederinstandsetzung</td> </tr> </table>				NKT:	Nutzung kompatibler Teile	ENF:	Externe Nachfertigung	EBV:	Endbevorratung	AWV:	Altteilwiederverwendung	INF:	Interne Nachfertigung	WII:	Wiederinstandsetzung
NKT:	Nutzung kompatibler Teile	ENF:	Externe Nachfertigung														
EBV:	Endbevorratung	AWV:	Altteilwiederverwendung														
INF:	Interne Nachfertigung	WII:	Wiederinstandsetzung														
Strategie	Klassifikationsmerkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4												
EBV	qual.	Kritikalität	sehr kritisch	kritisch	unkritisch												
		Obsoleszenzrisiko	gering	mittel	hoch												
		Ausfall- und Verschleißverhalten	Reserveteil	Verbrauchsteil													
		Lebenszyklusphase	Anlaufperiode	Arbeitsperiode	Abnutzungsperiode												
		Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	reparierbar	nicht reparierbar													
		Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Einzelteil	Gruppe/Modul	System/Produkt												
		Beschaffungsbedingungen	gut	befriedigend	schlecht												
		CAD-Datei vorhanden	Ja	leicht erzeugbar	Nein												
		Materialeignung für additive Fertigung	geeignet / Standardpulver	geeignet / Sonderpulver	nicht geeignet												
		Art der Lagerung	Standard	Schüttgut	stapelbar												
	quant.	Lagerbestandswert	A-Teile	B-Teile	C-Teile												
		Anzahl der Lagerabgänge	A-Teile	B-Teile	C-Teile												
		Prognostizierbarkeit des Bedarfs	X-Teile	Y-Teile	Z-Teile	S-Teile											
		Ersatzteilmengen	G-Teile	M-Teile	K-Teile												
		Ersatzteilbedarf	geringer Bedarf	mittlerer Bedarf	hoher Bedarf												
		Lagerfähigkeit	voll lagerfähig	eingeschränkt lagerfähig	nicht lagerfähig												
		Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	geringe Kosten	mittlere Kosten	hohe Kosten												
		Oberflächenrauigkeit	fein	mittel	grob												
		Geringste Wandstärke	< 0.3 mm	>= 0.3 mm													
		Lieferantanzahl	gering	mittel	hoch												
Kaufabschlussquote	< 20%	20% - 50%	51% - 80%	> 80%													
Verkaufspreis	< 1000€	1000€ - 5000€	> 5000€														
Anzahl der Funktionsflächen	gering	mittel	hoch														
Volumenverhältnis	< 3	3 bis 5	> 5														
Losgröße	< 10	10-100	> 100														

Abbildung 39: Beispiel der Kriterienübersicht im Excel-Tool für die Strategie „Endbevorratung“ (eigene Darstellung)

Die Kriterienübersicht sollte nach Abschluss der Modellkonfiguration genutzt werden, um die eingegebenen Daten zu überprüfen, bevor die Analyse gestartet wird.

5.5 Eingabe der benötigten Daten

Nach Abschluss der Konfiguration des Excel-Tools müssen im nächsten Schritt die Ersatzteildaten eingespeist werden. Diese stellen die Ausgangsbasis für die Analyse zur Ermittlung einer geeigneten Nachserienversorgungsstrategie dar. Zur Orientierung dienen die blau eingefärbten Tabellenblätter im Excel-Tool (vgl. Abbildung 24).

5.5.1 Haupteingabemodul

Das Tabellenblatt *Dateneingabe* fungiert als Haupteingabeblatt und gliedert sich in zwei Datenbereiche.

1) Ersatzteilklassifikation:

Neben der *fortlaufenden Nummer* können *Artikelnummer* und *Artikelbezeichnung* festgelegt werden. Es gilt zu beachten, dass die Entität *Artikelnummer* eindeutig sein muss. Auf etwaige Duplikate wird im Zuge der Eingabe hingewiesen.

2) Merkmaldaten:

Entsprechend der zuvor durchgeführten Konfiguration wird für jedes qualitative und quantitative Kriterium automatisch eine Spalte im Tabellenblatt *Dateneingabe* vorgesehen. Einträge für ein Merkmal eines Artikels sind durch eine mit den entsprechenden Ausprägungen konfigurierte Dropdown-Liste möglich. Von den vorgegebenen Werten (zuvor definierte Ausprägungen) abweichende Eingaben werden verhindert.

Abbildung 40 zeigt einen Auszug der Dateneingabe mit beispielhaft eingetragenen Ersatzteildaten. In Anschluss zur rechten Seite der Tabelle sind im Excel-Tool alle weiteren Spalten der insgesamt 10 qualitativen und 15 quantitativen Klassifikationsmerkmale, welche zuvor konfiguriert wurden, angeführt.

Dateneingabe							
Fortl. Nr.	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	qualitative Merkmale				
			Kritikalität	Obsoleszenzrisiko	Ausfall- und Verschleißverhalten	Lebenszyklusphase	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit
1	1A	Winkel	kritisch	gering	Reserveteil	Anlaufperiode	nicht reparierbar
2	1B	Düse	sehr kritisch	mittel	Reserveteil	Arbeitsperiode	reparierbar
3	1C	Lager	unkritisch	gering	Verbrauchsteil	Abnutzungsperiode	reparierbar
4	2A	Grundplatte	unkritisch	hoch	Reserveteil	Abnutzungsperiode	reparierbar
5	2B	Klammer	kritisch	mittel	Reserveteil	Arbeitsperiode	nicht reparierbar
6	3A	Rohr	unkritisch	gering	Reserveteil	Arbeitsperiode	reparierbar
7	4	Teil 1	kritisch	mittel	Verbrauchsteil	Anlaufperiode	nicht reparierbar
8	5	Teil 2	sehr kritisch	gering	Verbrauchsteil	Abnutzungsperiode	reparierbar
9	6	Teil 3	unkritisch	hoch	Verbrauchsteil	Arbeitsperiode	reparierbar
10	7	Teil 4	unkritisch	mittel	Reserveteil	Arbeitsperiode	reparierbar

Abbildung 40: Beispiel der Dateneingabe im Excel-Tool (eigene Darstellung)

Wie zu erkennen ist, setzt das Haupteingabemodul des Excel-Tools voraus, dass die Merkmalausprägungen der Ersatzteile bekannt sind. Es lässt nur eine Kategorisierung nach diesen zu. Möchte ein Unternehmen jedoch eine stammdatenbasierte Klassifikation für ein bestimmtes Merkmal im Excel-Tool integrieren, so muss ein zusätzliches Dateneingabemodul hinzugefügt werden. Weitere Details sind im Abschnitt 5.5.2 zu finden.

5.5.2 Weitere Dateneingabemodule

Oft sind die verfügbaren Ersatzteildaten eines Unternehmens nicht in jener Form verfügbar, die es erlaubt, eine genaue Kategorisierung nach den gewünschten

Merkmale ohne Zutun durchführen zu können.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, muss in solchen Fällen auf Stammdaten der Ersatzteile zurückgegriffen werden, die nach erfolgter Aufbereitung eine passende Einteilung ermöglichen.

Die für eine stammdatenbasierte Klassifikation benötigten Dateneingabemodule müssen individuell angepasst werden, da die Ersatzteilkategorisierung für jedes Merkmal nach einem anderen Prinzip erfolgt und dementsprechend zum Teil vorgeschaltete Berechnungen erforderlich sind.

In den zusätzlichen Modulen erfolgt die Zuteilung zu den Merkmalausprägungen durch gesonderte Analysen. Die Resultate werden anschließend automatisch an das Haupteingabemodul übertragen.

Auf diese Weise kann für jedes gewünschte Merkmal ein eigenes Dateneingabemodul erzeugt und zur Auswertung vorhandener Stammdaten benutzt werden.

In der finalen Version des Ersatzteil-Klassifikationstools wurden zwei Zusatzmodule implementiert, die als Beispiel für mögliche Erweiterungen dienen.

In Abbildung 41 ist das erste der zwei zusätzlichen Dateneingabemodule dargestellt. In diesem Fall wird für das Klassifikationskriterium *Lagerbestandswert* eine ABC-Analyse anhand der Stammdaten *Verbrauch* und *Einheitspreis* durchgeführt, um eine Einteilung der Ersatzteile nach den Ausprägungen *A-*, *B-* bzw. *C-Teil* zu erzielen.

Lagerbestandswert			ABC-Analyse durchführen							
Fortl. Nr.	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	Verbrauch [STK]	Einheitspreis [€]	Lagerbestandswert [€]	Anteil Lagerbestandswert [%]	Gruppe			
1	1A	Winkel	200	€ 15,00	€ 3 000,00	2,8%	C-Teil	Anzahl A-Teile:	2	
2	1B	Düse	75	€ 90,00	€ 6 750,00	6,2%	B-Teil	Anzahl B-Teile:	3	
3	1C	Lager	360	€ 5,00	€ 1 800,00	1,7%	C-Teil	Anzahl C-Teile:	5	
4	2A	Grundplatte	210	€ 180,00	€ 37 800,00	34,8%	A-Teil			
5	2B	Klammer	500	€ 14,00	€ 7 000,00	6,4%	B-Teil			
6	3A	Rohr	20	€ 100,00	€ 2 000,00	1,8%	C-Teil			
7	4	Teil 1	40	€ 200,00	€ 8 000,00	7,4%	B-Teil			
8	5	Teil 2	110	€ 25,00	€ 2 750,00	2,5%	C-Teil			
9	6	Teil 3	350	€ 7,00	€ 2 450,00	2,3%	C-Teil			
10	7	Teil 4	195	€ 190,00	€ 37 050,00	34,1%	A-Teil			
					€ 108 600,00					

Abbildung 41: Beispiel des Dateneingabemoduls für die ABC-Analyse des Lagerbestandswerts im Excel-Tool (eigene Darstellung)

Werden im Haupteingabemodul Datensätze hinzugefügt, entfernt oder geändert, so werden die Ersatzteilidentifikationsdaten im Zusatzmodul ebenfalls angepasst. Dies führt dazu, dass die Daten des Moduls nicht mehr auf dem neuesten Stand sind. Die Tabelle verliert ihre farbliche Codierung und die Ergebnisspalte („Gruppe“) wird gelöscht. In diesem Fall weist das Excel-Tool vor dem Start einer neuen Analyse darauf hin, dass ein Update des betroffenen Dateneingabemoduls notwendig ist.

Um die ABC-Analyse durchzuführen bzw. um sie zu aktualisieren, muss die Auswertung durch Klicken auf die Schaltfläche „ABC-Analyse durchführen“ gestartet werden. In einem weiteren Eingabefeld erfolgt die Definition der für die Analyse notwendigen prozentualen Abgrenzungswerte zwischen A-, B- und C-Teilen.

Das zweite Dateneingabemodul bezieht sich auf das Klassifikationskriterium *Beschaffungsbedingungen*. Wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben, wurde aufgrund der Expertenmeinungen die Notwendigkeit einer detaillierteren Aufspaltung der in diesem Merkmal beinhalteten Kriterien abgeleitet. Durch die Analyse erfolgt eine Einteilung der *Beschaffungsbedingungen* in die Gruppen *gut*, *befriedigend* und *schlecht* (siehe Abbildung 42). Gestartet wird die Analyse durch einen Klick auf die Schaltfläche „Analyse starten“. Weitere Eingaben sind nicht notwendig.

Beschaffungsbedingungen			Analyse starten					
Fortl. Nr.	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	Wiederbeschaffungszeit	Beschaffungskosten	Bestellbedingungen	Bestellrestriktionen	Einkaufsvorteile	Gruppe
1	1A	Winkel	0 - 4 Wochen	0 - 5000€	erschwerend	keine Restriktionen	Vorteile vorhanden	gut
2	1B	Düse	> 4 Wochen	0 - 5000€	standard	keine Restriktionen	keine Vorteile	befriedigend
3	1C	Lager	0 - 4 Wochen	0 - 5000€	erschwerend	Restriktionen vorhanden	keine Vorteile	schlecht
4	2A	Grundplatte	> 4 Wochen	> 5000€	standard	keine Restriktionen	Vorteile vorhanden	befriedigend
5	2B	Klammer	> 4 Wochen	> 5000€	erschwerend	Restriktionen vorhanden	keine Vorteile	schlecht
6	3A	Rohr	0 - 4 Wochen	0 - 5000€	standard	Restriktionen vorhanden	Vorteile vorhanden	gut
7	4	Teil 1	0 - 4 Wochen	0 - 5000€	standard	keine Restriktionen	Vorteile vorhanden	gut
8	5	Teil 2	> 4 Wochen	0 - 5000€	standard	keine Restriktionen	Vorteile vorhanden	gut
9	6	Teil 3	> 4 Wochen	0 - 5000€	standard	keine Restriktionen	keine Vorteile	befriedigend
10	7	Teil 4	0 - 4 Wochen	> 5000€	erschwerend	Restriktionen vorhanden	keine Vorteile	schlecht

Abbildung 42: Beispiel des Dateneingabemoduls für die Analyse der Beschaffungsbedingungen im Excel-Tool (eigene Darstellung)

Auch in diesem Zusatzmodul werden die Ersatzteilidentifikationsdaten bei Änderungen im Haupteingabemodul aktualisiert und in Übereinstimmung mit dem Tabellenblatt *Dateneingabe* synchronisiert.

Neu hinzugefügte Ersatzteile weisen anfänglich keine Einfärbung auf. Ebenso verliert ein bereits analysiertes Ersatzteil seine Einfärbung, wenn mindestens eine der Ausprägungen im Zusatzmodul geändert wird. In beiden Fällen werden die betroffenen Ersatzteile erst nach der Durchführung einer erneuten Analyse wieder aktualisiert. Sind nicht alle Daten am Letztstand, weist das Excel-Tool auch hier vor dem Start einer neuen Strategie-Analyse darauf hin, dass ein Update des Zusatzmoduls notwendig ist.

5.6 Ausgabe der Analyseergebnisse

Die Analyse einer geeigneten Nachserienversorgungsstrategie für die gewünschten Ersatzteile erfolgt nach Abschluss der in den Abschnitten 5.4 und 5.5 beschriebenen Schritte. Das gelb markierte Registerblatt *Start* (vgl. Abbildung 24) zeigt eine kompakte Kurzanleitung zur richtigen Verwendung des Excel-Tools (siehe Anhang A.3) sowie eine Schaltfläche zum Starten der Analyse.

Durch einen Klick auf „Analyse durchführen“ öffnet sich das in Abbildung 43 dargestellte Fenster. Es besteht die Möglichkeit, einen einzigen Artikel anhand seiner Artikelnummer bzw. seiner fortlaufenden Nummer zu analysieren oder eine Gesamtauswertung aller gelisteten Artikel durchzuführen.

Wie die Expertengespräche gezeigt haben, kommen in verschiedenen Unternehmen nicht immer alle im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Ersatzteilstrategien zum

Einsatz. Daher bietet die Eingabemaske die Möglichkeit, jene Strategien zu wählen, die für den Anwender relevant sind und bei der Analyse Berücksichtigung finden sollen. Außerdem kann entschieden werden, ob die 3D-Druckbarkeit ebenfalls untersucht werden soll.

Nachdem alle Parameter festgelegt sind, kann die Analyse über einen Klick auf „Start“ begonnen werden.

Analyse starten

Einen Artikel analysieren

Artikelnummer | Fortlaufende Nummer

1A

Alle Artikel analysieren

Relevante Strategien:

Nutzung kompatibler Teile	<input type="checkbox"/>
Endbevorratung	<input checked="" type="checkbox"/>
Interne Nachfertigung	<input type="checkbox"/>
Externe Nachfertigung	<input checked="" type="checkbox"/>
Alteilewiederverwendung	<input checked="" type="checkbox"/>
Wiederinstandsetzung	<input type="checkbox"/>

3D-Druck berücksichtigen:

Start Zurücksetzen Abbrechen

Abbildung 43: Analyse starten (eigene Darstellung)

Für den Fall, dass nur ein Artikel analysiert wird, erfolgt die Darstellung des Ergebnisses in Form einer Ausgabemaske. Ein Beispiel ist in Abbildung 44 zu sehen.

Diese Art der Auswertung ist vor allem dann relevant, wenn im Excel-Tool eine große Menge an Artikeldaten hinterlegt ist und keine Gesamtauswertung gewünscht ist. Durch Auswahl der Option zur Analyse eines einzigen Artikels wird Rechenzeit gespart und die Effizienz somit gesteigert.

Im oberen Teil des Fensters sind generelle Informationen zum analysierten Artikel zu finden. Darunter werden die in Frage kommenden Strategien angezeigt. Diese sind entsprechend ihres erreichten Punktwerts sortiert und spiegeln somit die empfohlene Reihenfolge wider. Weiters wird das Ergebnis zur Eignung des 3D-Drucks (*gegeben* oder *nicht gegeben*) sowie eine Übersicht der ausgeschlossenen Strategien angezeigt.

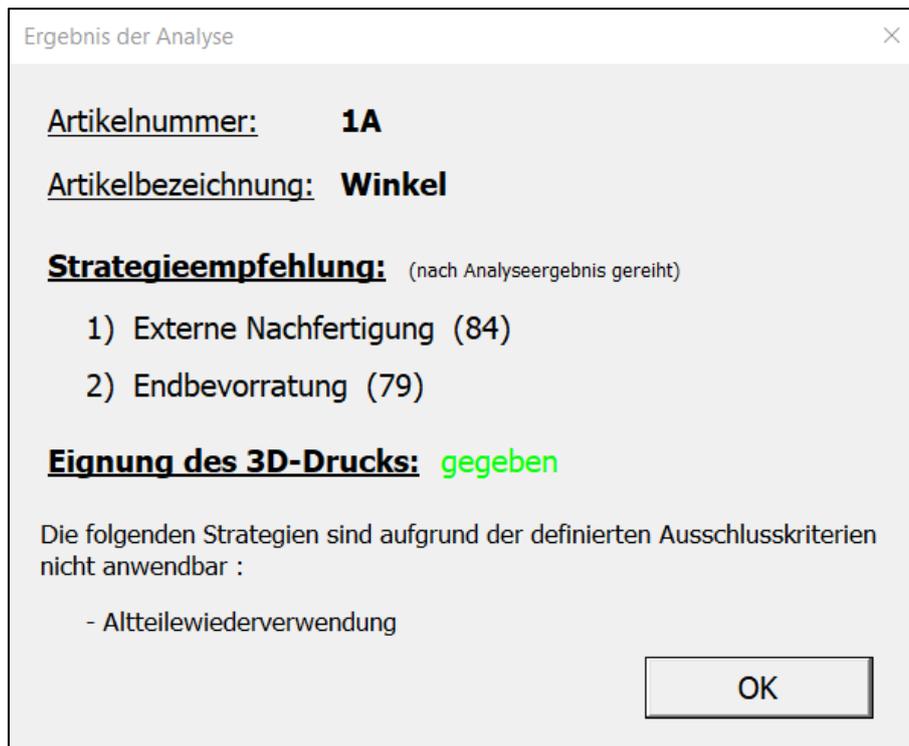


Abbildung 44: Beispiel für das Ergebnis der Analyse eines Artikels (eigene Darstellung)

Wird die Analyse für das gesamte Artikelspektrum gestartet, wechselt das Excel-Tool nach Abschluss der Auswertung automatisch zum Tabellenblatt *Ergebnis*, um die Resultate anzuzeigen. In Abbildung 45 ist ein Beispiel der Ergebnisausgabe für zehn Artikel dargestellt. Diese wurden in Bezug auf die Strategien *Endbevorratung*, *Externe Nachfertigung* und *Alteilewiederverwendung* sowie auf die *3D-Druckbarkeit* analysiert.

Die ersten drei Spalten zur Ersatzteilidentifikation sind ident mit den im Haupteingabemodul angegebenen Daten (siehe Abschnitt 5.5.1). Die Anzahl der angeführten Ränge hängt davon ab, wie viele Strategien im Zuge der Analyse Berücksichtigung fanden. Wurde bei der in Abbildung 43 dargestellten Eingabemaske die Option „3D-Druck berücksichtigen“ ausgewählt, so kommt es zusätzlich zur Erweiterung der Ergebnisdarstellung um die Spalte „Eignung 3D-Druck“.

Ergebnis		Statistische Auswertung									
Fortl. Nr.	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	Rang 1		Rang 2		Rang 3		Eignung 3D-Druck		
			Bezeichnung	Punkte	Bezeichnung	Punkte	Bezeichnung	Punkte			
1	1A	Winkel	Externe Nachfertigung	84	Endbevorratung	79	Alteilewiederverwendung	-----	gegeben		
2	1B	Düse	Endbevorratung	87	Externe Nachfertigung	78,5	Alteilewiederverwendung	-----	nicht gegeben		
3	1C	Lager	Externe Nachfertigung	86	Endbevorratung	-----	Alteilewiederverwendung	-----	nicht gegeben		
4	2A	Grundplatte	Alteilewiederverwendung	86	Externe Nachfertigung	84,5	Endbevorratung	82,5	nicht gegeben		
5	2B	Klammer	Endbevorratung	84,5	Externe Nachfertigung	80,5	Alteilewiederverwendung	-----	gegeben		
6	3A	Rohr	Externe Nachfertigung	89	Alteilewiederverwendung	84,5	Endbevorratung	80,5	nicht gegeben		
7	4	Teil 1	Alteilewiederverwendung	84,5	Endbevorratung	-----	Externe Nachfertigung	-----	nicht gegeben		
8	5	Teil 2	Externe Nachfertigung	86,5	Alteilewiederverwendung	81,5	Endbevorratung	-----	nicht gegeben		
9	6	Teil 3	Endbevorratung	89	Externe Nachfertigung	-----	Alteilewiederverwendung	-----	gegeben		
10	7	Teil 4	Endbevorratung	86	Externe Nachfertigung	84,5	Alteilewiederverwendung	-----	nicht gegeben		

Abbildung 45: Beispiel für das Ergebnis der Analyse aller gelisteten Artikel im Excel-Tool (eigene Darstellung)

Rot markierte Strategien deuten darauf hin, dass diese für das betroffene Ersatzteil ausgeschlossen wurden. In diesem Fall wird auch kein Punktwert angezeigt. Nicht ausgeschlossene Strategien werden anhand des erzielten Punktwerts gereiht. „Rang 1“ stellt somit die empfohlene Bereitstellungsstrategie für die einzelnen Ersatzteile dar.

Die Resultate können weiters einer statistischen Auswertung unterzogen werden. Diese wird über einen Klick auf die Schaltfläche „*Statistische Auswertung*“ ausgeführt. Im gleichnamigen Tabellenblatt werden die Ergebnisse in Form von zwei Diagrammen dargestellt:

- 1) Häufigkeitsverteilung der Versorgungsstrategien sortiert nach Empfehlungsrängen (siehe Abbildung 46)
- 2) Häufigkeitsverteilung der Empfehlungsränge sortiert nach Versorgungsstrategien (siehe Abbildung 47)

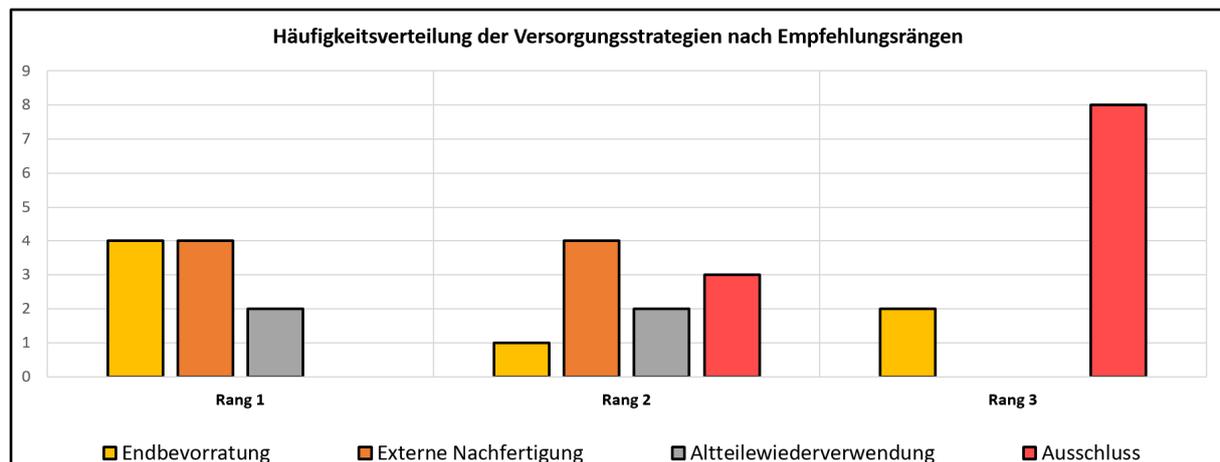


Abbildung 46: Beispiel einer statistischen Auswertung der Analyseergebnisse - Diagramm 1 (eigene Darstellung)

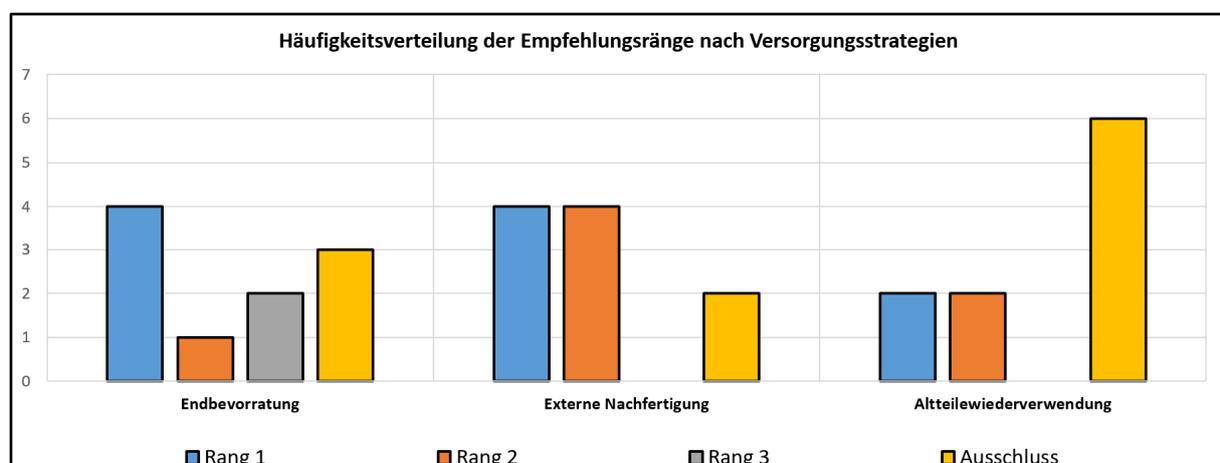


Abbildung 47: Beispiel einer statistischen Auswertung der Analyseergebnisse - Diagramm 2 (eigene Darstellung)

Diese Diagramme dienen als beispielhafte Grundlage möglicher Auswertungsszenarien. Wie auch bei der Definition verschiedener Ersatzteilmerkmale ist anzunehmen, dass Unternehmen spezielle Ansprüche in Bezug auf die statistische Auswertung stellen. Daher wird eine individuelle Anpassung dieser Option vor der erstmaligen Verwendung empfohlen. Nachfolgend werden weitere Beispiele für mögliche Auswertungsszenarien aufgelistet:

- Merkmalausprägungsbezogene Auswertung:
Häufigkeitsverteilung der Versorgungsstrategien bzw. Empfehlungsränge sortiert nach Ausprägungen eines Merkmals (z.B. A-, B- und C-Teile des Lagerbestandwerts).
- Artikelnummernkreisbezogene Auswertung:
Häufigkeitsverteilung im ersten Empfehlungsrang von Artikelnummernkreisen (z.B. für verschiedene Produktgruppen) sortiert nach Versorgungsstrategien.

Kommt es nach der Analyse zu Änderungen der Modellkonfiguration oder Ergänzung/Anpassung der eingegebenen Ersatzteildaten, so findet keine automatische Aktualisierung der Auswertungsergebnisse in den gelb hinterlegten Tabellenblättern (vgl. Abbildung 24) statt. Daher ist darauf zu achten, dass eine Neuberechnung der Resultate durchgeführt werden muss, sobald eine Variation der Eingangsparameter vorgenommen wurde.

5.7 Modellvalidierung

Zur Validierung des im Ersatzteil-Klassifikationstool implementierten Strategiebewertungsmodells sowie zur Überprüfung eines fehlerfreien und stabilen Ablaufs der entwickelten Anwendung wurden mehrere Testläufe mit verschiedenen Einzelteilen durchgeführt. Wie Abbildung 48 zeigt, erfolgte dies methodisch in drei Schritten.

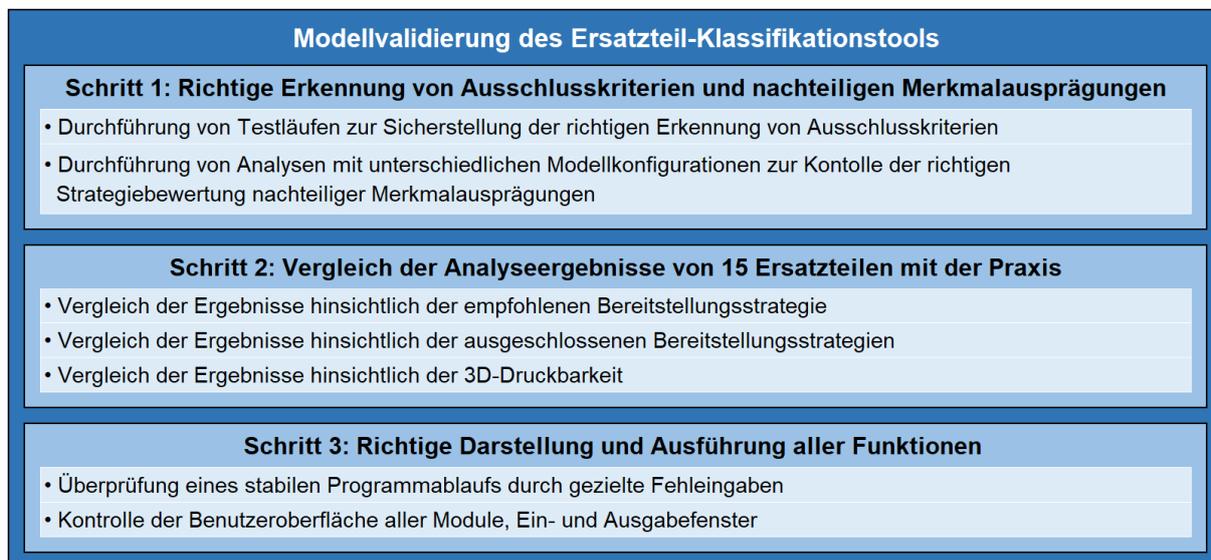


Abbildung 48: Methodik zur Modellvalidierung des Ersatzteil-Klassifikationstools (eigene Darstellung)

Im ersten Schritt wurde eruiert, ob Ausschlusskriterien als auch nachteilige Merkmalausprägungen vom Programm richtig erkannt werden.

Ersteres wurde durch Testläufe festgestellt, bei denen zumindest eine Ausprägung des Ersatzteils so gewählt wurde, dass diese entsprechend der Modellkonfiguration, den Ausschluss mindestens einer Strategie bewirkte. Der Bewertungsvorgang führte für die betroffene(n) Strategie(n) zum Ausschluss, wodurch die korrekte Funktion nachgewiesen werden konnte.

Um die richtige Bewertung von nachteiligen Merkmalausprägungen zu kontrollieren, wurden mit einem Ersatzteil mehrere Analysen mit unterschiedlichen Modellkonfigurationen (bezogen auf die Wahl der nachteiligen Kriterien) durchgeführt. Durch den Vergleich der Punktebewertungen konnte der Einfluss der Modellkonfiguration dargestellt und die Richtigkeit der Auswertung sichergestellt werden.

Der zweite Schritt diente dem Vergleich der Analyseergebnisse des Excel-Tools mit den in der Praxis tatsächlich angewandten Bereitstellungsstrategien, um die Plausibilität der Auswertungen zu überprüfen. Dabei wurden Ersatzteildaten eines Maschinenbauunternehmens in das Klassifikationstool eingespielt und die Grundkonfiguration des Modells bestmöglich an den betrachteten Betrieb angepasst.

Die *Endbevorratung* findet keine Anwendung im Unternehmen und wurde daher bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurden 15 Ersatzteile analysiert und es stellte sich heraus, dass die Ergebnisse zur Identifikation der besten Nachserienversorgungsstrategie in über 85% der Fälle mit den tatsächlich in der Praxis angewandten Strategien korrelieren. Bei Betrachtung der durch die Analyse ausgeschlossenen Strategien kam es lediglich zu einer Abweichung aufgrund des falschen Ausschlusses der *Altteilwiederverwendung* für eines der Bauteile. Begründet lag dies allerdings in einer fehlerhaften Ausprägungseinteilung der *Reparierbarkeit* aufgrund einer Beurteilung auf falscher Stücklistenebene. Da einzelne Komponenten der betroffenen Baugruppe nur komplett austauschbar sind, wurde fälschlicherweise eine Einstufung als *nicht reparierbar* vorgenommen. Dies führte zum inkorrekten Strategieausschluss.

Bezogen auf die 3D-Druckbarkeit wurden keine Differenzen zwischen den Erkenntnissen aus der Praxis und der Auswertung des Klassifikationstools festgestellt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Ersatzteile, die als *geeignet* identifiziert wurden, auch tatsächlich durch additive Fertigung erzeugt werden. Aus Seite des Unternehmens spricht allerdings nichts gegen eine theoretische Anwendung des 3D-Drucks, weshalb die Ergebnisse als richtig bewertet werden können.

Wie oben erwähnt, wurde für die Validierung des Modells eine angepasste Grundkonfiguration des Tools verwendet. Generell ist zu erwarten, dass durch eine detailliertere Anpassung der Modellkonfiguration an das Unternehmen eine Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit des Modells erzielt werden kann. Da dies eine ausführliche Analyse der internen Unternehmensstrategien und -prozesse voraussetzt,

konnte die Umsetzung im Zuge dieser Arbeit nicht in diesem Detailgrad durchgeführt werden.

Zuletzt wurde im dritten Schritt überprüft, ob alle Funktionen der Anwendung richtig dargestellt und ausgeführt werden. Durch fehlerhafte Eingaben wurde gezielt getestet, ob das Programm stabil läuft und den Benutzer entsprechend auf notwendige Korrekturen hinweist. Außerdem wurde die Benutzeroberfläche aller Module sowie der Ein- und Ausgabefenster einer Kontrolle unterzogen, um sicherzustellen, dass das Tool alle Informationen korrekt verarbeitet und dem Nutzer richtig anzeigt.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

- **Nach welchen Kriterien können Bauteile eines Industrieunternehmens, das im Maschinen- und Anlagenbau tätig ist, klassifiziert werden, um festzustellen, welche Strategien im Ersatzteilmanagement für die Nachserienversorgung (NSV) der betrachteten Teile angewandt werden können?**

Die Klassifikation von Ersatzteilen ist trotz der eingeschränkten Betrachtung auf den Maschinen- und Anlagenbausektor je nach Unternehmen sehr individuell durchzuführen. Bei der Wahl von geeigneten Klassifikationskriterien spielen mehrere Faktoren eine entscheidende Rolle. Beispielsweise ist es wichtig zu wissen, ob das Unternehmen Sonder- oder Massenprodukte fertigt und ob es sich dabei um komplexe, hochpreisige Fabrikate oder einfache Erzeugnisse eines niedrigeren Preissegments handelt. Weiters ist von Interesse, ob das unternehmensinterne Know-How an Dritte weitergegeben werden kann und ob alle vorgestellten Bereitstellungsstrategien umsetzbar sind oder Einschränkungen bestehen.

Aufgrund dieser Einflüsse wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit Klassifikationskriterien identifiziert, die für ein möglichst breites Feld an Unternehmen als Grundlage zur Einteilung der Ersatzteile verwendet werden können. Außerdem wurde das entwickelte Ersatzteil-Klassifikationstool so gestaltet, dass eine individuelle Anpassungsmöglichkeit aller Parameter gegeben ist. Unternehmensspezifisch können daher individuell Kriterien angelegt bzw. entfernt werden, um die Aussagekraft der Anwendung hoch zu halten.

In der Grundkonfiguration des Excel-Tools wurden die nachfolgenden Klassifikationskriterien implementiert, um dem Benutzer eine detaillierte Ausgangskonfiguration für die Analyse geeigneter Bereitstellungsstrategien anzubieten:

- Quantitative Merkmale
 - Lagerbestandswert
 - Anzahl der Lagerabgänge
 - Prognostizierbarkeit des Bedarfs
 - Ersatzteilmengen
 - Ersatzteilbedarf
 - Lagerfähigkeit
 - Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts
 - Lieferantenzahl
 - Kaufabschlussquote
 - Verkaufspreis an Kunden

- Qualitative Merkmale
 - Kritikalität
 - Obsoleszenzrisiko
 - Ausfall- und Verschleißverhalten
 - Lebenszyklusphase
 - Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit
 - Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad
 - Beschaffungsbedingungen

- **Welche Bedingungen müssen vorliegen, damit eine Produktion der benötigten Bauteile durch additive Fertigungsverfahren für die Bereitstellung von Ersatzteilen in Frage kommt?**

Zur Beurteilung einer möglichen Produktion der benötigten Bauteile durch additive Fertigungsverfahren müssen drei Aspekte in Betracht gezogen werden.

Anfänglich ist zu prüfen, ob die notwendigen Voraussetzungen zur Anwendung der additiven Fertigung gegeben sind. Zu diesen Voraussetzungen zählen einerseits das Vorhandensein der notwendigen Ressourcen (Equipment und Personal), andererseits müssen die Bauteildaten in einem geeigneten digitalen Format vorliegen.

Weiters muss analysiert werden, ob es fertigungstechnisch überhaupt möglich ist, das Ersatzteil mit dem vorhandenen 3D-Druckermodell herzustellen. Hierzu erfolgt ein Abgleich der Bauteileigenschaften mit dem Leistungsprofil des verwendeten Druckers.

Außerdem spielt auch die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses eine entscheidende Rolle. Selbst wenn die Voraussetzungen erfüllt sind und die fertigungstechnische Analyse ergibt, dass eine Herstellung mittels additiver Verfahren möglich ist, muss kontrolliert werden, ob sich der zeitliche Aufwand und die Höhe der Kosten im zulässigen Rahmen befinden.

Zur Überprüfung, ob all diese Aspekte hinreichend erfüllt sind und somit die additive Fertigung des betrachteten Ersatzteils in Frage kommt, wurden die nachfolgenden Klassifikationsmerkmale definiert und im Ersatzteil-Klassifikationstool implementiert:

- Quantitative Merkmale
 - Ersatzteilmengen
 - Oberflächenrauigkeit
 - Geringste Wandstärke
 - Anzahl der Funktionsflächen
 - Volumenverhältnis
 - Losgröße

- Qualitative Merkmale
 - CAD-Datei vorhanden
 - Materialeignung für additive Fertigung

Aufgrund der großen Anzahl an verschiedenen 3D-Druckern ist es nicht möglich, notwendige Angaben zur Beurteilung der 3D-Druckbarkeit in allgemeiner Form mittels quantitativer Grenzwerte (z.B. geringste zulässige Wandstärke, maximal mögliches Bauraumvolumen, maximale Losgröße zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Fertigung) anzuführen.

- **Welche qualitativen bzw. quantitativen Daten über Produkte, Prozesse, interne und externe Umgebungsbedingungen eines Unternehmens sind notwendig, um eine geeignete Klassifikation der Ersatzteile vornehmen zu können?**

Die Bewertung der bereits oben genannten quantitativen und qualitativen Ersatzteilmerkmale erfordert in vielen Fällen die Auswertung von spezifischen Detaildaten, um eine Zuteilung gemäß den definierten Ausprägungen zu ermöglichen.

Wie die Experteninterviews gezeigt haben, benutzen Unternehmen nicht nur unterschiedliche Merkmale zur Klassifikation, sondern bewerten die gleichen Merkmale auch in einigen Fällen nach unterschiedlichen Vorgaben (z.B. kann die Einteilung bezüglich des *Lagerbestandswertes* mittels ABC-Analyse oder durch Abgrenzung in Form von quantitativen Werten erfolgen).

Aufgrund dieser Erkenntnisse fiel die Entscheidung auf die Entwicklung eines individuell anpassbaren Klassifikationstools. Folglich können keine allgemeingültigen Anforderungen bezüglich der benötigten Detaildaten vorgegeben werden.

Zusatzmodule im entwickelten Excel-Tool helfen bei der Klasseneinteilung von Merkmalen, die eine stammdatenbasierte Auswertung erfordern. Beispielsweise wurde für das Merkmal *Lagerbestandswert* die Möglichkeit einer automatischen ABC-Analyse durch Hinterlegen von Detaildaten zu *Einheitspreis* und *Verbrauch* implementiert. Weiters wurde ein Modul zur leichteren Bestimmung der Merkmal-klasse für das Kriterium *Beschaffungsbedingungen* erstellt.

Auf diese Art können für alle weiteren Klassifikationsmerkmale ebenfalls Zusatzmodule programmiert werden.

Tabelle 14 zeigt die in der Grundkonfiguration des Excel-Tools implementierten Klassifikationskriterien inklusive der jeweiligen Ausprägungsstufen. In der rechten Spalte ist ersichtlich, welche Stammdaten benötigt werden, um eine Klasseneinteilung zu ermöglichen.

Dabei ist zu beachten, dass grau hinterlegte Felder darauf hinweisen, dass zur Klassifikation keine weiteren Detaildaten notwendig sind. Für Kriterien mit der

Angabe N/A wurde aufgrund Ihrer hohen Komplexität und Unternehmensabhängigkeit die Verfügbarkeit der Daten angenommen und daher keine nähere Spezifizierung angeführt.

	Klassifikationskriterien	Ausprägungen	benötigte Stamm- und Detaildaten
qualitative Kriterien	Kritikalität	sehr kritisch / kritisch / unkritisch	
	Obsoleszenzrisiko	hoch / mittel / niedrig	N/A
	Ausfall- und Verschleißverhalten	Verbrauchsteile / Reserveteile	
	Lebenszyklusphase	Anlauf- / Arbeits- / Abnutzungsperiode	Ausfallsrate, Betriebszeit/Ersatzteialter
	Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit	aufarbeitbar / nicht aufarbeitbar	Zerlegbarkeit, Reparaturkosten, Erfüllungsgrad bauteilspezifischer Voraussetzungen
	Fertigungsstufe / Wertschöpfungsgrad	Einzelteil / Baugruppe / Produkt	Anzahl der Einzelteile
	Beschaffungsbedingungen	gut / befriedigend / schlecht	Wiederbeschaffungszeit, Beschaffungskosten, Bewertung der Bestellbedingungen (z.B. Zahlungsbedingungen, Art der Auftragserteilung), Bestellrestriktionen vorhanden (z.B. Mindestbestellmenge), Einkaufsvorteile vorhanden (z.B. Staffelpreise),...
	CAD-Datei vorhanden	Ja / leicht erzeugbar / Nein	
	Materialeignung für additive Fertigung	geeignet (Standardpulver) / geeignet (Sonderpulver) / nicht geeignet	Material des Ersatzteils, zulässige Materialien für den 3D-Drucker
	Art der Lagerung	Standard / Schüttgut / stapelbar	
quantitative Kriterien	Lagerbestandswert	A-Teile / B-Teile / C-Teile	Stückpreis, Verbrauch, Artikelanzahl
	Anzahl der Lagerabgänge	A-Teile / B-Teile / C-Teile	Anzahl an Lagerabgängen, Artikelanzahl
	Prognostizierbarkeit des Bedarfs	X-Teile / Y-Teile / Z-Teile / S-Teile	Bedarf/Periode, Periodenanzahl
	Ersatzteilmengen	G-Teile / M-Teile / K-Teile	Ersatzteilabmessungen, Bauraumabmessungen des 3D-Druckers, Abmessungen einer Europoolpalette
	Ersatzteilbedarf	gering / mittel / hoch	N/A
	Lagerfähigkeit	voll / eingeschränkt / nicht lagerfähig	Lagerfähigkeit des Ersatzteils in Tagen, Dauer zur Bereitstellung eines Fertigungsloses (bei Mindestbestellmenge)
	Ausfall(folge)kosten des Primärprodukts	hoch / mittel / gering	N/A
	Lieferantenanzahl	gering / mittel / hoch	
	Kaufabschlussquote	< 20% / 20%-50% / 51%-80% / > 80%	Anzahl an Angebotslegungen, Anzahl an Bestellungen
	Verkaufspreis an Kunden	gering / mittel / hoch	
	Oberflächenrauigkeit	fein / mittel / grob	
	Geringste Wandstärke	< 0,3mm / >= 0,3mm	
	Anzahl der Funktionsflächen	gering / mittel / hoch	
	Volumenverhältnis	< 3 / 3 bis 5 / > 5	Tatsächliches Volumen des Ersatzteils, Ersatzteilumschreibendes Quadervolumen
Losgröße	gering / mittel / hoch		

Tabelle 14: Benötigte Detaildaten zur Ersatzteilklassifikation (eigene Darstellung)

6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit war es, qualitative und quantitative Merkmale zu definieren, die bei der automatischen Klassifikation von Ersatzteilen genutzt werden können, um die Auswahl einer geeigneten Bereitstellungsstrategie für die Nachserienphase zu unterstützen. Besondere Berücksichtigung fand dabei der Einfluss additiver Fertigungsmethoden.

Einen zentralen Teil der Arbeit bildete die Programmierung eines Excel-Tools, das produzierenden Unternehmen dabei helfen soll, eine automatische Ersatzteilklassifizierung nach den vorgestellten Kriterien zu ermöglichen.

Aufgrund der starken Branchen- und Materialabhängigkeit bei der Festlegung von Klassifikationskriterien richtete sich der Fokus auf metallische Bauteile aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus.

Wie die Experteninterviews gezeigt haben, sind jedoch selbst innerhalb einer Branche große Unterschiede zwischen verschiedenen Unternehmen und Produktgruppen erkennbar. Diese Erkenntnis floss entscheidend in den Aufbau des Modells ein. Anstatt eines fest vorgegebenen Konfigurationsschemas wurde eine flexible Anpassbarkeit der Parameter durch einen anfänglichen Konfigurationsprozess umgesetzt. Das entstandene Excel-Modell bietet daher kein allgemeingültiges Setup, das für jedes Unternehmen in gleicher Weise einzusetzen ist. Die Bedienung ist jedoch für alle Anwender gleich.

Weiters zeigten die Experteninterviews, dass die *Kritikalität* und die *Beschaffungsbedingungen* jedenfalls zu den wichtigsten Klassifikationskriterien zu zählen sind.

Wie sich herausstellte, können die *Beschaffungsbedingungen* durch viele verschiedene Parameter (z.B. Wiederbeschaffungszeit, Bestellbedingungen oder Lieferantenzahl) beurteilt werden. Im Zuge der Klassifikation ist es äußerst empfehlenswert, eine gezielte Analyse dieser einzelnen Subkriterien vorzunehmen, da sich die Resultate der Einzelbewertungen unterschiedlich auf die verschiedenen Bereitstellungsstrategien auswirken. So kann eine Verbesserung der Beurteilungsqualität erzielt werden.

Die anfänglich durchgeführte Literaturrecherche und Auswertung bestehender Lösungsansätze zeigte, dass in bisherigen Abhandlungen zum Thema der Ersatzteilklassifikation meist das Bestandsmanagement und nicht die Wahl der Nachserienversorgungsstrategie im Vordergrund steht. Ebenso wurde erkennbar, dass viele Autoren zwar eine multidimensionale Methodik beschreiben, welche aber auch auf eine bestimmte Anzahl an Klassifikationskriterien beschränkt ist. Diese Defizite derzeitiger Lösungsansätze galt es durch die Entwicklung des Excel-Tools gezielt zu beseitigen und Verbesserungen durch eine individuelle Gestaltbarkeit der Klassifikationskriterien zu erreichen.

Durch Expertengespräche mit Vertretern aus verschiedenen Unternehmensbereichen und -größen wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit zwei wesentliche Herausforderungen identifiziert, die bei der Anwendungseinführung zu bewältigen sind:

- 1) Für die Analyse werden genau definierte Stammdaten benötigt, die Unternehmen oft nicht in der notwendigen Form zur Verfügung stehen. Die Aufbereitung der Daten nach den gewünschten Vorgaben nimmt zudem viele Ressourcen in Anspruch.
- 2) Eine genaue Abgrenzung der Merkmalausprägungen stellt in vielen Fällen eine große Schwierigkeit dar. Hier müssen gegebenenfalls unternehmensindividuelle Grenzen definiert werden.

Diesen Problemen wird zum Teil durch die flexible Gestaltbarkeit des Excel-Tools entgegengewirkt. Außerdem können die in Kapitel 2.2 vorgeschlagenen Ausprägungsgrenzen vom jeweiligen Unternehmen herangezogen werden, um die Wahl geeigneter Bereiche zu unterstützen.

Bei der Bewertungsanalyse bezüglich der Anwendung additiver Fertigungsmethoden für die Bereitstellung von Ersatzteilen konnte großes Potenzial festgestellt werden. Trotz derzeit hoher Kosten im Vergleich zur konventionellen Fertigung von Bauteilen eröffnen sich durch den 3D-Druck neue Möglichkeiten, die bei speziellen Ausprägungskombinationen der Ersatzteilmerkmale zu großen Vorteilen führen können. Beispielsweise wäre eine Anwendung für teure Ersatzteile mit hoher Kritikalität aber einem geringen Ersatzteilbedarf aufgrund der reduzierten Kapitalbindung und der hohen Flexibilität zu bevorzugen.

Als schwierig hat sich jedoch die direkte Beurteilung der 3D-Druckbarkeit herausgestellt. Ziel des Excel-Tools war es, eine Analyse zu ermöglichen, die als Ergebnis eine eindeutige Aussage darüber zulässt, ob ein Ersatzteil additiv gefertigt werden kann oder nicht. Wie sich gezeigt hat, ist hierzu eine äußerst genaue Bewertung und Ausprägungszuteilung zu den betroffenen Klassifikationsmerkmalen notwendig. Dies stellt in der Praxis leider oft eine große Herausforderung dar, weshalb bei positiver Beurteilung des Excel-Tools trotzdem eine Kontrolle eines 3D-Druck Experten zu empfehlen ist.

Allgemein kann gesagt werden, dass durch die Klassifikation von Ersatzteilen anhand geeigneter Merkmale, eine erhebliche Verbesserung im Auswahlprozess einer Nachserienversorgungsstrategie für ein Ersatzteil erzielt werden kann. Das entwickelte Excel-Tool stellt hierbei eine große Erleichterung dar und unterstützt Unternehmen bei der Entscheidungsfindung. Speziell in Zeiten steigender Produktvielfalt und kürzerer Innovationszyklen ist die Verwendung des Tools äußerst empfehlenswert und mit großen Vorteilen für das Unternehmen verbunden.

6.3 Ausblick

Beim Verfassen der vorliegenden Arbeit hat sich gezeigt, dass die Ersatzteilklassifikation unter Einbezug der additiven Fertigung die Anwendung eines breiten Spektrums an unterschiedlichen Beurteilungsstrategien und Bewertungsverfahren zulässt.

Dies bietet Raum für Unternehmen, um individuelle Analysen durchführen zu können. Dabei unterstützt das entwickelte Grundmodell des Excel-Tools das Ziel eines strukturierten und effizienteren Ablaufs bei der Bewertung. Es ist zu erwarten, dass weitere unternehmensspezifische Anpassungen zur Entfaltung zusätzlicher Potenziale führen würden. Hier liegt ein möglicher Punkt in der zukünftigen Verbesserung des Tools.

Im Detail bedeutet dies, dass beispielsweise die Entwicklung von Zusatzmodulen und statistischen Auswertungsmöglichkeiten Vorteile liefern kann. In Hinblick auf die additive Fertigung besteht durchaus Verbesserungspotenzial durch die Implementierung eines Punktesystems, dem eine technologische als auch wirtschaftliche Ersatzteilmessung zugrunde liegt. In diesem Zusammenhang besteht weiters die Möglichkeit, verschiedene Modelle von 3D-Druckern im Excel-Tool in Form einer Datenbank zu hinterlegen, um eine automatische Anpassung der Ausprägungsgrenzwerte umzusetzen.

Da der Fokus dieser Arbeit auf metallischen Ersatzteilen der Maschinen- und Anlagenindustrie liegt, ist die entwickelte Anwendung derzeit auf diese bestimmte Zielgruppe beschränkt. Zukünftige Weiterentwicklungen könnten die Zugänglichkeit für ein breiteres Anwenderspektrum eröffnen. Neben Ersatzteilen aus metallischen Werkstoffen wäre beispielsweise eine Untersuchung von elektronischen Komponenten oder von Bauteilen aus anderen Materialgruppen und dadurch ebenfalls die Einbindung weiterer additiver Fertigungsverfahren denkbar. Auch Verbrauchsmaterialien, die oft ein Ablaufdatum besitzen, könnten durch eine Erweiterung des Tools Berücksichtigung in der Analyse finden.

Betrachtet man die Kompatibilität zu ERP-Systemen bzw. Datenbanken, bietet sich auch hier die Möglichkeit, weitere Untersuchungen durchzuführen. Wie die Experteninterviews gezeigt haben, wird aufgrund dieses Umstandes eine der größten Herausforderungen für Unternehmen erwartet. Daher ist eine Analyse und Standardisierung dieser Schnittstellen ein wichtiger nächster Schritt.

Es ist zu sehen, dass es viele Ansätze gibt, um die Funktionalität und das Anwendererlebnis für den Benutzer weiter zu verbessern. Mit der Entwicklung des Excel-Tools zur automatischen Ersatzteilklassifikation im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde die notwendige Basis geschaffen, um diese Ansätze zukünftig umsetzen und erweitern zu können.

Literaturverzeichnis

Alicke, K.: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken, Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, 2005

Attar, H. u.a.: Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium, in: Materials Science and Engineering (Hrsg.), Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, A 593 (2014), S. 170-177

Bacchetti, A. u.a.: Empirically-driven hierarchical classification of stock keeping units, in: International Journal of Production Economics, 143 (2013), S. 263-274

Bertling, J. u.a.: Arten und Entstehungstypen frühzeitiger Produktalterung, Entwicklung eines Obsoleszenz-Portfolios, in: Umweltmagazin, 3/2014, S. 60-61

Biedermann, H.: Ersatzteilmanagement, Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen, 2., erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin, 2008

Bös, K.; Hänsel, F.; Schott, N.: Empirische Untersuchungen in der Sportwissenschaft, Planung - Auswertung - Statistik, 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Czwalina, Hamburg, 2004

Bothe, T.: Planung und Steuerung der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienfertigung, Shaker, Aachen, 2003

Boylan, J. E.; Syntetos, A. A.; Karakostas, G. C.: Classification for forecasting and stock control: a case study, in: Journal of the Operational Research Society, (2008) 59, S. 473-481

Braglia, M.; Grassi, A.; Montanari, R.: Multi-attribute classification method for spare parts inventory management, in: Journal of Quality in Maintenance Engineering, Volume 10, Number 1, 2004, S. 55-65

Cakir, O.; Canbolat, M. S.: A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology, in: Expert Systems with Applications, 35 (2008), S. 1367-1378

Cavalieri, S. u.a.: A decision-making framework for managing maintenance spare parts, in: Production Planning & Control, The Management of Operations, Vol. 19, No. 4, June 2008, S. 379-396

Celebi, D.; Bayraktar, D.; Ozturkcan, S.: Multi Criteria Classification for Spare Parts Inventory, 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 2008, S. 1780-1787

Chen, J.: Peer-estimation for multiple criteria ABC inventory classification, in: Computers & Operations Research, 38 (2011), S. 1784-1791

Chen, Y. u.a.: A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis, in: Computers & Operations Research, 35 (2008), S. 776-796

Chu, C.; Liang, G.; Liao, C.: Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification, in: Computers & Industrial Engineering, 55 (2008), S. 841-851

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 24420 Teil 1, Ersatzteillisten, Beuth Verlag, Berlin, 1976

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 31051, Grundlagen der Instandhaltung, Beuth Verlag, Berlin, 2003

Dombrowski, U.; Horatzek, S.; Wrehde, J.: Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement, Teil I: Zukunftsgestaltung, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 100 (2005) 3 (zit. 2005a), S. 125-129

Dombrowski, U.; Horatzek, S.; Wrehde, J.: Der Weg zu einem lebenszyklusorientierten Ersatzteilmanagement, Teil II: Vergangenheitsbewältigung, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 100 (2005) 4 (zit. 2005b), S. 197-201

Dombrowski, U.; Schulze, S.: Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement - Neue Herausforderungen durch innovationsstarke Bauteile in langlebigen Primärprodukten, in: Nyhuis, Peter (Hrsg): Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Heidelberg, Berlin, 2008, S. 439-462

Dombrowski, U.; Weckenborg, S.; Schulze, S.: Outsourcing von Elektronikkomponenten in der Nachserienversorgung, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 104 (2009) 11, S. 954-959

Ferreira, L. u.a.: A Multicriteria Decision Framework for the Management of Maintenance Spares - A Case Study, in: IFAC PapersOnLine, 51-11 (2018), S. 531-537

Finke, Y. A.: Entwicklung einer Systematik zur Strategiewahl durch multivariate Analyseverfahren zur Strategiewahl in der Nachserienversorgung (NSV) von Elektronikbaugruppen, Dortmund, Technische Universität, Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 17531 N/1, 2015

Fortuin, L.: The All-Time Requirement of Spare Parts for Service After Sales-Theoretical Analysis and Practical Results, in: International Journal of Operations & Production Management, Vol. 1 No.1 (1980), S. 59-70

Gajpal, P. P.; Ganesh, L. S.; Rajendran, C.: Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process, in: International Journal of Production Economics, 35 (1994), S. 293-297

Gebhardt, A.; Hötter, J.; Fateri, M.: Generative Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München, 2013

Gebhardt, A.; Kessler, J.; Thurn, L.: 3D-Drucken, Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München, 2016

Gelders, L.; Van Looy, P. M.: An Inventory Policy for Slow and Fast Movers in a Petrochemical Plant: A Case Study, in: Journal of the Operational Research Society, (1978) 29, S. 867-874

Gieseke, M. u.a.: Laserbasierte Technologien, in: Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Fahlbusch, T. (Hrsg.), 3D-Druck beleuchtet, Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016, S. 19-30

Graf, R.: Erweitertes Supply Chain Management zur Ersatzteilversorgung, Vulkan-Verlag GmbH, Essen Ruhr, 2005

Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management, Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Springer, Berlin, 2010

Hesselbach, J.; Graf R.: Produktbegleitende Dienstleistungen zur Kundenbindung, Ganzheitliches Ersatzteilmanagement als Basis für ein After-Sales Service, in: Dangelmaier W. u.a. (Hrsg.), Innovation im E-Business, ALB-HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2003, S. 505-512

Hu, Q. u.a.: Spare parts classification in industrial manufacturing using the dominance-based rough set approach, in: European Journal of Operational Research, 262 (2017), S. 1136-1163

Huiskonen, J.: Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices, in: International Journal of Production Economics, 71 (2001), S. 125-133

Inderfurth, K.; Kleber, R.: Modellgestützte Flexibilitätsanalyse von Strategien zur Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, (2009) 79, S. 1019-1049

Inderfurth, K.; Kleber, R.: An Advanced Heuristic for Multiple-Option Spare Parts Procurement after End-of-Production, in: Production and Operations Management, 22 (2010), S. 54-70

Inderfurth, K.; Mukherjee, K.: Decision support for spare parts acquisition in post product life cycle, in: Central European Journal of Operations Research, (2008) 16, S. 17-42

Kaiser, U.; Vogel, M.; Werding, A.: Ersatzteilmanagement: Instandhaltungs-Ersatzteilmanagement auf der Grundlage eines mehrdimensionalen Entscheidungsmodells, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 98 (2003) 12, S. 685-687

Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie, Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Springer, Berlin, 2010

Knigge, J.; Rosentritt, C.: Systematische Auswahl und Anpassung von Strategien zur Ersatzteil-Bedarfsdeckung, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 104 (2009) 12, S. 1147-1150

Lachmayer, R.; Lippert, R. B.: Chancen und Herausforderungen für die Produktentwicklung, in: Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Fahlbusch, T. (Hrsg.), 3D-Druck beleuchtet, Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016, S. 5-18

Lippert, R. B.; Lachmayer, R.: Einleitung, in: dies. (Hrsg.), Additive Manufacturing Quantifiziert, Visionäre Anwendungen und Stand der Technik, Springer Vieweg, Berlin, 2017, S. 1-6

Matyas, K.: Instandhaltungslogistik, Qualität und Produktivität steigern, 6., überarbeitete Auflage, Hanser, München, 2016

Meinel, L.: Passende Ersatzteile immer verfügbar, Effizientes Field Service und Ersatzteilmanagement, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrg. 102 (2007) 12, S. 875-877

Molenaers, A. u.a.: Criticality classification of spare parts: A case study, in: International Journal of Production Economics, 140 (2012), S. 570-578

Nagarur, N. N.; Hu, T.; Baid, N. K.: A Computer-based Inventory Management System for Spare Parts, in: Industrial Management & Data Systems, Vol. 94 No.9, 1994, S. 22-28

Ng, W. L.: A simple classifier for multiple criteria ABC analysis, in: European Journal of Operational Research, 177 (2007), S. 344-353

Partovi, F. Y.; Anandarajan, M.: Classifying inventory using an artificial neural network approach, in: Computers & Industrial Engineering, 41 (2002), S. 389-404

Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik, Vorgehensweisen, Methoden, Tools, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2016

Pfohl, H.: Logistiksysteme, Betriebswirtschaftliche Grundlagen, 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2018

Porras, E.; Dekker, R.: An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods, in: *European Journal of Operational Research*, 184 (2008), S. 101-132

Ramanathan, R.: ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization, in: *Computers & Operations Research*, 33 (2006), S. 695-700

Recknagel S. E. A.: Differenzierte Beschaffungsstrategien für Ersatzteile in der Hausgerätebranche, in: Barkawi K., Baader A., Montanus S. (Hrsg.), *Erfolgreich mit After Sales Service*, Berlin, 2007, S. 271-276

Santos, S. u.a.: Proposal of an SKU Classification Framework, A Multicriteria Approach, in: *Proceedings of the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, 2015, S. 413-418

Sarmah, S. P.; Moharana, U. C.: Multi-criteria classification of spare parts inventories - a web based approach, in: *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 21 No. 4, 2015, S. 456-477

Schröter, M.; Spengler, T.: A system dynamics model for strategic management of spare parts in closed-loop supply chains, in: *Interfaces*, 33 (2003), S. 7-17

Schuh, G.; Stich, V.; Wienholdt H.: Ersatzteillogistik, in: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.), *Logistikmanagement, 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage*, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 165-208

Stich, V.; Hering, N.; Brosze, T.: Beschaffungslogistik, in: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.), *Logistikmanagement, 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage*, Springer Vieweg, Berlin, 2013, S. 77-114

Stoll, J. u.a.: Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy, in: *Production Engineering*, (2015) 9, S. 225-235

Syntetos, A. A.; Keyes, M.; Babai, M. Z.: Demand categorisation in a European spare parts logistics network, in: *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 29 No. 3, 2009, S. 292-316

Teixeira, C.; Lopes, I.; Figueiredo, M.: Multi-criteria classification for spare parts management: a case study, in: *Procedia Manufacturing*, 11 (2017), S. 1560-1567

- Teunter, R. H.; Fortuin, L.: End-of-life service: A case study, in: *European Journal of Operational Research*, 107 (1998), S. 19-34
- Teunter, R. H.; Fortuin, L.: End-of-life service, in: *International Journal of Production Economics*, 59 (1999), S. 487-497
- Toffel, M. W.: The Growing Strategic Importance of End-of-Life Product Management, in: *California Management Review*, Vol. 45, No. 3, 2003, S. 28
- Trapp, T.: Ersatzteil-Logistik für KFZ-Elektronik aus Sicht eines Automobilzulieferers, in: *VDI Berichte 1573* (Hrsg), *Effiziente Ersatzteil-Logistik*, Düsseldorf, 2000, S. 29-44
- Varwig, A.; Kammler, F.; Thomas, O.: Geschäftsmodellevolution im Technischen Kundendienst des Maschinen- und Anlagenbaus durch additive Fertigung - Ersatzteilbereitstellung als smart Service, in: Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (Hrsg.), *Additive Manufacturing Quantifiziert, Visionäre Anwendungen und Stand der Technik*, Springer Vieweg, Berlin, 2017, S. 133-144
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *VDI 2882, Obsoleszenzmanagement aus Sicht von Nutzern und Betreibern*, Beuth Verlag, Berlin, 2018
- Voss, H.: *Life Cycle Logistics, Der Weg zur produktlebenszyklusorientierten Ersatzteillogistik*, Haupt, Bern, 2006
- Wessargès, Y. u.a.: Entwicklungstrends zum Einsatz des selektiven Laserstrahlschmelzens in Industrie und Biomedizintechnik, in: Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (Hrsg.), *Additive Manufacturing Quantifiziert, Visionäre Anwendungen und Stand der Technik*, Springer Vieweg, Berlin, 2017, S. 7-22
- Williams, T. M.: Stock Control with Sporadic and Slow-Moving Demand, in: *Journal of the Operational Research Society*, (1984) 35, S. 939-948
- Wohlers, T. T.; Caffrey, T.: *Wohlers report 2015, 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*, Wohlers Associates, Fort Collins, Colo, 2015
- Wrehde, J.: *Planung und Umsetzung der Nachserienversorgung in der Automobil-elektronik*, Shaker, Aachen, 2011
- Zhou, P.; Fan, L.: A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization, in: *European Journal of Operational Research*, 182 (2007), S. 1488-1491

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Marktvolumen für Systeme, Materialien und.....	5
Abbildung 2: Ablauf im empirischen Forschungsprozess	8
Abbildung 3: Inhaltlicher Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung).....	10
Abbildung 4: Ersatzteilbedarf während der Phasen des Produktlebenszyklus	12
Abbildung 5: Übersicht der möglichen Nachserienversorgungsstrategien.....	13
Abbildung 6: Details zur Versorgungsstrategie „Nutzung kompatibler Teile“	14
Abbildung 7: Details zur Versorgungsstrategie „Endbevorratung“	15
Abbildung 8: Details zur Versorgungsstrategie „Interne Nachfertigung“	17
Abbildung 9: Details zur Versorgungsstrategie „Externe Nachfertigung“	18
Abbildung 10: Details zur Versorgungsstrategie „Altteilewiederverwendung“.....	19
Abbildung 11: Mögliche Be- und Verarbeitungsprozesse an rückgeführten Produkten	20
Abbildung 12: Details zur Versorgungsstrategie „Wiederinstandsetzung“	21
Abbildung 13: Kombination der Versorgungsstrategien zu einem Versorgungsszenario	23
Abbildung 14: Ausfallkurven	27
Abbildung 15: Klassische Badewannenkurve	28
Abbildung 16: Vor- und Nachteile von Ersatzteilen in Abhängigkeit ihrer Fertigungsstufe.....	30
Abbildung 17: Praxisbeispiel einer ABC-Analyse bezogen auf die Anzahl der Lagerabgänge	32
Abbildung 18: Schematische Darstellung einer XYZ(S)-Analyse.....	33
Abbildung 19: Schematische Darstellung des selektiven Laserschmelzverfahren	40
Abbildung 20: Methodisches Vorgehen zur Durchführung der Experteninterviews (eigene Darstellung)	52
Abbildung 21: Methodisches Vorgehen zur Erstellung des Excel-Tools (eigene Darstellung)	69
Abbildung 22: Erstentwurf der Eingabemaske des Ersatzteil-Klassifizierungstools in Excel (eigene Darstellung).....	70
Abbildung 23: Erstentwurf des Ausgabefeldes des Ersatzteil-Klassifizierungstools in Excel – Beispiel (eigene Darstellung)	71
Abbildung 24: Tabellenblätter des Excel-Tools (eigene Darstellung)	72
Abbildung 25: Prozess zur Auswahl einer Bereitstellungsstrategie (eigene Darstellung)	73
Abbildung 26: Modellkonfigurationsprozess (eigene Darstellung)	76
Abbildung 27: Konfigurationsbeispiel der qualitativen Merkmale (eigene Darstellung)	77

Abbildung 28: Konfigurationsbeispiel der quantitativen Merkmale (eigene Darstellung)	77
Abbildung 29: Klassifikationsmerkmal hinzufügen - Schritt 1 (eigene Darstellung) ...	77
Abbildung 30: Klassifikationsmerkmal hinzufügen - Schritt 2 (eigene Darstellung) ...	78
Abbildung 31: Ausschlusskriterien definieren (eigene Darstellung)	78
Abbildung 32: Klassifikationsmerkmal entfernen (eigene Darstellung)	79
Abbildung 33: Merkmalbezeichnung umbenennen (eigene Darstellung).....	79
Abbildung 34: Merkmalausprägungen bearbeiten (eigene Darstellung)	80
Abbildung 35: Konfigurationsbeispiel der Merkmalgewichtung im Excel-Tool (eigene Darstellung)	81
Abbildung 36: Konfigurationsbeispiel der 3D-Druck Kriterien im Excel-Tool (eigene Darstellung)	82
Abbildung 37: Definition der für den 3D-Druck relevanten Klassifikationsmerkmale - Schritt 1 (eigene Darstellung)	82
Abbildung 38: Definition der für den 3D-Druck relevanten Klassifikationsmerkmale - Schritt 2 (eigene Darstellung)	83
Abbildung 39: Beispiel der Kriterienübersicht im Excel-Tool für die Strategie „Endbevorratung“ (eigene Darstellung)	84
Abbildung 40: Beispiel der Dateneingabe im Excel-Tool (eigene Darstellung)	85
Abbildung 41: Beispiel des Dateneingabemoduls für die ABC-Analyse des Lagerbestandwerts im Excel-Tool (eigene Darstellung)	86
Abbildung 42: Beispiel des Dateneingabemoduls für die Analyse der Beschaffungsbedingungen im Excel-Tool (eigene Darstellung)	87
Abbildung 43: Analyse starten (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 44: Beispiel für das Ergebnis der Analyse eines Artikels (eigene Darstellung)	89
Abbildung 45: Beispiel für das Ergebnis der Analyse aller gelisteten Artikel im Excel-Tool (eigene Darstellung)	89
Abbildung 46: Beispiel einer statistischen Auswertung der Analyseergebnisse - Diagramm 1 (eigene Darstellung).....	90
Abbildung 47: Beispiel einer statistischen Auswertung der Analyseergebnisse - Diagramm 2 (eigene Darstellung).....	90
Abbildung 48: Methodik zur Modellvalidierung des Ersatzteil-Klassifikationstools (eigene Darstellung)	91
Abbildung 49: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (1)	113
Abbildung 50: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (2)	114
Abbildung 51: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (3)	115
Abbildung 52: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (4)	116
Abbildung 53: Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools (1)	136
Abbildung 54: Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools (2)	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Versorgungsstrategien (eigene Darstellung)...	22
Tabelle 2: Klassifikationsmerkmale (eigene Darstellung)	38
Tabelle 3: Literaturübersicht von Abhandlungen bezüglich mehrdimensionaler Ansätze zur Ersatzteilklassifikation (eigene Darstellung).....	45
Tabelle 4: Zusätzliche Klassifikationsmerkmale in der Literatur (eigene Darstellung)	47
Tabelle 5: Klassifikationskriterien des 3D-Drucks (eigene Darstellung).....	57
Tabelle 6: Klassifikationsmerkmalbeurteilung durch die Interviewpartner (eigene Darstellung)	58
Tabelle 7: Vergleich der Merkmalausprägungen (eigene Darstellung)	59
Tabelle 8: Spezifikationen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung).....	62
Tabelle 9: Analyse der Bauraumdimensionen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)	63
Tabelle 10: Größte Bauraumgrundfläche ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)	64
Tabelle 11: Größtes Bauraumvolumen ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)	64
Tabelle 12: Kleinster Laserfokusbereich ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)	65
Tabelle 13: Preis ausgewählter 3D-Drucker (eigene Darstellung)	66
Tabelle 14: Benötigte Detaildaten zur Ersatzteilklassifikation (eigene Darstellung)	97

Formelverzeichnis

Formel 1: Bestimmung des Variationskoeffizienten V	32
Formel 2: Bestimmung der Ausfallkosten	37
Formel 3: Bewertung der Strategieeignung	74

Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer
ρ	Formelzeichen der Massendichte
Al	Aluminium
AWV	Altteilewiederverwendung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer-Aided Design
cm ²	Quadratcentimeter
cm ³	Kubikcentimeter
CNC	Computerized Numerical Control
Co	Kobalt
Cr	Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dr.	Doktor
EBV	Endbevorratung
EDO	End of Delivery Obligation
ENF	Externe Nachfertigung
engl.	englisch
EOP	End of Production
EOS	End of Service
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera
f.	folgende
FDM	Fused Deposition Modeling
ff.	fortfolgende
FHW	Franz Haas Waffelmaschinen GmbH
fortl.	fortlaufend(e)
hrsg.	Herausgeber
i. d. R.	in der Regel
IN	Inconel (Markenname für Nickelbasislegierungen)
INF	Interne Nachfertigung
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
l	Liter
lat.	lateinisch

m ³	Kubikmeter
Mg	Magnesium
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
Mo	Molybdän
N	Newton (Einheit der Kraft)
N/A	Not available (nicht verfügbar)
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter (Einheit der Spannung)
NKT	Nutzung kompatibler Teile
Nr.	Nummer
NSV	Nachserienversorgung
od.	oder
PDM	Produktdatenmanagement
Prof.	Professor
qual.	qualitativ
quant.	quantitativ
Si	Silizium
SLM	Selektive Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SOP	Start of Production
Ti	Titan
Tsd.	Tausend
u.a.	unter anderem
USD	United States Dollar
V	Vanadium
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
W	Watt
WII	Wiederinstandsetzung
z.B.	zum Beispiel
zit.	Zitat

Anhang

A.1 Fragebogen



Klassifikation von Bauteilen im Ersatzteilmanagement

Empirische Erhebung



Frage 1) In welcher Branche ist Ihr Unternehmen angesiedelt?

.....

Frage 2) Wie viele Mitarbeiter beschäftigt Ihr Unternehmen derzeit?

1-9 Mitarbeiter

10-49 Mitarbeiter

50-249 Mitarbeiter

>249 Mitarbeiter

Frage 3) Welche Bedeutung hat das Ersatzteilmanagement für Ihren Unternehmenserfolg?

Sehr groß

Groß

Mittelmäßig

Gering

Sehr gering

Frage 4) Gibt es in Ihrem Unternehmen eine eigene Abteilung, die sich mit der Ersatzteilversorgung befasst?

Ja Nein

Frage 5) Wie groß ist das von Ihrer Firma an Ersatzteilen bereitgestellte Artikelspektrum?

< 500 Artikel

501-2.000 Artikel

2.001-5.000 Artikel

5.001-10.000 Artikel

> 10.000 Artikel

© 2018 Lukas Schmidt

Seite 2 von 6

Abbildung 49: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (1)



Klassifikation von Bauteilen im Ersatzteilmanagement

Empirische Erhebung



Frage 6) Werden Ersatzteile in ihrem Unternehmen derzeit nach verschiedenen Kriterien klassifiziert?

Ja Nein

Falls **ja**, nach welchen Kriterien findet eine Klassifikation statt?

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Kritikalität | <input type="checkbox"/> Lagerbestandswert (ABC-Analyse) |
| <input type="checkbox"/> Obsoleszenzrisiko | <input type="checkbox"/> Anzahl der Lagerabgänge (ABC-Analyse) |
| <input type="checkbox"/> Ausfall- und Verschleißverhalten | <input type="checkbox"/> Prognostizierbarkeit des Bedarfs (XYZ-Analyse) |
| <input type="checkbox"/> Lebenszyklusphase | <input type="checkbox"/> Ersatzteilmengen (GMK-Analyse) |
| <input type="checkbox"/> Reparierbarkeit | <input type="checkbox"/> Ersatzteilbedarf |
| <input type="checkbox"/> Fertigungsstufe | <input type="checkbox"/> Lagerfähigkeit |
| <input type="checkbox"/> Beschaffungsbedingungen | <input type="checkbox"/> Ausfall(folge)kosten |

Weitere Kriterien:

Frage 7) Welche Kriterien der Ersatzteilklassifikation erachten Sie als am wichtigsten?

- 1)
- 2)
- 3)
- 4)
- 5)

Frage 8) Nach welchen Bereitstellungsstrategien versorgt Ihr Unternehmen Kunden mit Ersatzteilen?

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Nutzung kompatibler Teile | <input type="checkbox"/> Externe Nachfertigung |
| <input type="checkbox"/> Endbevorratung | <input type="checkbox"/> Altteilmwiederverwendung |
| <input type="checkbox"/> Interne Nachfertigung | <input type="checkbox"/> Wiederinstandsetzung |

© 2018 Lukas Schmidt

Seite 3 von 6

Abbildung 50: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (2)



Klassifikation von Bauteilen im Ersatzteilmanagement

Empirische Erhebung



Frage 9) Welche der derzeit nicht angewandten Bereitstellungsstrategien wären für einen Einsatz in Ihrem Unternehmen denkbar?

<input type="checkbox"/> Nutzung kompatibler Teile	<input type="checkbox"/> Externe Nachfertigung
<input type="checkbox"/> Endbevorratung	<input type="checkbox"/> Altteilewiederverwendung
<input type="checkbox"/> Interne Nachfertigung	<input type="checkbox"/> Wiederinstandsetzung

Frage 10) Findet die additive Fertigung in Ihrem Unternehmen derzeit Anwendung?

Nein

Ja, für die Herstellung von Prototypen und/oder in der Serienproduktion

Ja, für die Ersatzteilproduktion

Ja, in beiden oben genannten Bereichen

Falls **nein**, plant Ihre Firma die Einführung der additiven Fertigung?

Nein

Ja, in den nächsten 2 Jahren

Ja, in 2 bis 5 Jahren

Ja, jedoch nicht in den nächsten 5 Jahren

Falls **ja**, für welche Geschäftsbereiche ist die Einführung der additiven Fertigung geplant?

Für die Herstellung von Prototypen und/oder in der Serienproduktion

Für die Ersatzteilproduktion

Für beide der oben genannten Bereiche

Frage 11) Benutzt Ihr Unternehmen derzeit eine Software, die bei der Ersatzteilklassifikation dahingehend hilft, eine geeignete Versorgungsstrategie für die einzelnen Artikel zu eruieren?

Ja Nein

Falls **nein**, wäre eine solche Software für Ihr Unternehmen wünschenswert?

Ja Nein

© 2018 Lukas Schmidt

Seite 4 von 6

Abbildung 51: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (3)



Klassifikation von Bauteilen im Ersatzteilmanagement

Empirische Erhebung



Frage 12) Für welche der folgenden Kennzahlen wäre Ihr Unternehmen in der Lage Datensätze bereitzustellen? (direkt oder indirekt durch andere Daten)

	nein	Ja, direkt	Ja, indirekt	Falls indirekt, über welche Datensätze
ABC-Artikel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
XYZ-Artikel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
GMK-Artikel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bauteilabmessungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Führt Bauteilausfall zu Maschinenstillstand	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ausprägung des Obsoleszenzrisikos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sukzessives Verschleißverhalten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lebenszyklusphase	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zerlegbarkeit von Baugruppen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reparierbarkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fertigungsstufe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mindestbestellmenge	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bereitstellungszeitspanne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Anzahl der Lagerabgänge	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Verkaufswert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ersatzteilbedarf (Vergangenheit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ersatzteilbedarf (Prognose)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Anzahl verkaufter Primäranlagen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mögliche Lagerungsdauer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für den Kunden entstehende Ausfallkosten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 52: Fragebogen zur Identifikation geeigneter Interviewpartner (4)

A.2 Experteninterviews

A.2.1 Interview 1 – FAIS

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wichtigsten?**

Die folgenden fünf Klassifikationsmerkmale wurden von Herrn Hopfner als die wichtigsten Merkmale für *FAIS* identifiziert:

- 1) Beschaffungsbedingungen
- 2) Ausfallfolgekosten
- 3) Kritikalität
- 4) Prognostizierbarkeit des Bedarfs
- 5) Ersatzteilbedarf

Es ist schwer eine genaue Reihung nach Wichtigkeit vorzunehmen, da all diese Merkmale einen entscheidenden Einfluss besitzen. Die *Beschaffungsbedingungen* stehen jedoch klar an erster Stelle für *FAIS*, da die *externe Nachfertigung* als Hauptversorgungsstrategie des Unternehmens dient.

Ausfall(folge)kosten und *Kritikalität* stehen in engem Zusammenhang und sind entscheidende Einflussfaktoren bezüglich Überlegungen zur Lagerhaltung. Erste Versuche der Bevorratung hat *FAIS* bereits getätigt und möchte auch weiterhin Unternehmungen in diese Richtung durchführen. Die *Prognostizierbarkeit des Bedarfs* und der *Ersatzteilbedarf* selbst sind jedoch Beispiele für schwer abzuschätzende Größen, welche dieses Vorhaben erschweren. Aus diesen Gründen wurden die eben erwähnten Merkmale in der Aufzählung inkludiert.

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wenigsten relevant?**

Laut Herrn Hopfner spielt die Beurteilung der *Lagerfähigkeit* nur eine untergeordnete Rolle, da die meisten metallischen Ersatzteile bei guten Lagerbedingungen voll lagerfähig sind. Sollten spezielle Umgebungsbedingungen für die uneingeschränkte Lagerung eines Bauteils notwendig sein (z.B. geheiztes Lager), stellt dies im mitteleuropäischen Raum i. d. R. kein unumgängliches Problem dar. Es gilt jedoch zu beachten, dass Schmierstoffe eine Lagerfähigkeit von nur etwa drei bis fünf Jahren besitzen. Trotz der Möglichkeit einer neuen Konservierung bzw. Schmierung von Produkten mit veraltetem Schmierstoff ist für betroffene Produktgruppen eine Bewertung der *Lagerfähigkeit* demnach sinnvoll.

Beim *Ersatzteilvermögen* handelt es sich um ein weiteres Merkmal, das im Zuge der Ersatzteilklassifizierung bei *FAIS* nur einen geringen Stellenwert besitzt. Die vorgeschlagenen Ausprägungsgrenzen sind für Unternehmen, in denen die additive Fertigung angewandt wird, jedoch sinnvoll definiert, um eine mögliche Herstellbarkeit mithilfe von 3D-Druckern zu überprüfen.

Als letztes Merkmal wurde die *Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit* von Ersatzteilen genannt. Dieses Klassifikationskriterium ist vorrangig zur Überprüfung einer möglichen *Altteilewiederverwendung* oder *Wiederinstandsetzung*. Diese Strategien kommen bei *FAIS* nicht zur Anwendung, weshalb eine Einteilung nicht nötig ist.

- **Ist eine Ergänzung bzw. Änderung der im Demo-Tool vorgestellten Klassifikationsmerkmale für die mögliche Anwendung im betrachteten Unternehmen notwendig?**

Die Zusammenfassung von *Wiederbeschaffungszeit*, *Beschaffungskosten*, *Bestellbedingungen* und *Bestellrestriktionen* zu einem Klassifikationsmerkmal (*Beschaffungsbedingungen*) ist zu allgemein gehalten. Eine Unterteilung in die Ausprägungen *gute*, *mittlere* bzw. *schlechte Beschaffungsbedingungen* liefert in dieser Form zu wenig Aussagekraft und ist nur schwer beurteilbar. Daher wird von Herrn Hopfner eine gesonderte Betrachtung der einzelnen Einflussgrößen empfohlen.

Weiters sollten die *Anzahl an zur Verfügung stehenden Lieferanten* sowie die *geforderte Bauteilqualität* spezielle Berücksichtigung finden. Letzteres nimmt direkten Einfluss auf die *verfügbare Lieferantenzahl* und sei notwendig, da Produzenten oft schwer in Bezug auf ihre Qualitätsstandards einschätzbar sind. Zur Beurteilung könnten beispielsweise Zertifizierungen (z.B. ISO) herangezogen werden.

- **Sind die getroffenen Abgrenzungen zwischen den einzelnen Merkmalausprägungen für die Anwendung im betrachteten Unternehmen sinnvoll oder sollten Anpassungen getroffen werden? Decken sich die im Demo-Tool getroffenen Annahmen mit den vom betrachteten Unternehmen in der Praxis angewandten Bereichsgrenzen?**

Bei *FAIS* werden Ersatzteile derzeit nicht nach allen im Demo-Tool angeführten Merkmalen klassifiziert. Aus diesem Grund kann Herr Hopfner nur für einzelne Klassifikationsmerkmale Vergleiche mit den im betrachteten Unternehmen eingesetzten Ausprägungsabgrenzungen anstellen. Diese stimmen überein und auch die Annahmen der restlichen Bereichsabgrenzungen erscheinen gut in der Praxis anwendbar zu sein.

Weiters wurde auch die größere Herausforderung bei der Ausprägungszuteilung mancher Merkmale gegenüber anderer erwähnt. Während beispielsweise die Bereiche für *A-*, *B-* bzw. *C-Artikel* gut gewählt sind und Ersatzteile diesen relativ leicht zugeordnet werden können, stellt das *Obsoleszenzrisiko* aufgrund vieler

Abhängigkeiten (z.B. Anzahl an Lieferanten) einen wesentlich größeren Aufwand bei der Ausprägungsidentifikation dar.

- **Viele der identifizierten Klassifikationsmerkmale sind zeitlich dynamisch. Hätte dies für die Anwendung des Excel-Tools beim betrachteten Unternehmen negative Auswirkungen?**

Neben Größen die auf lange Zeit gesehen ein dynamisches Verhalten aufweisen (z.B. *Lebenszyklusphase*) gibt es auch Faktoren, die eine kurzfristige Dynamik zeigen (z.B. Rohstoffpreise, welche Auswirkungen auf die *Beschaffungsbedingungen* haben können). Letztere führen offensichtlich zu einem erhöhten Datenpflegeaufwand. Durch die zeitlich dynamischen Merkmale ist es natürlich schwieriger, alle im Excel-Tool enthaltenen Informationen am aktuellen Stand zu halten. Diese sind für eine aussagekräftige Klassifizierung laut Herrn Hopfner jedoch unumgänglich und daher unverzichtbar.

- **Sehen Sie Probleme, welche für das betrachtete Unternehmen bei der Anwendung des Excel-Tools auftreten könnten?**

Das Ersatzteilspektrum von *FIAS* umfasst eine große Menge unterschiedlicher Bauteile. Es reicht von hochfesten Gleitlagern und Hybridlager mit keramischen Rollkörpern über Linearführungen bis hin zu Leicht-Kränen. Aufgrund der Besonderheiten der einzelnen Produktgruppen wäre aus Sicht von Herrn Hopfner eine separate Definition der Merkmalausprägungen im Excel-Tool für jede der Produktgruppen sicherlich sinnvoll.

- **Wie beurteilen Sie die Ergebnisausgabe des Demo-Tools? Sind alle relevanten Daten ersichtlich oder sollten Anpassungen bezüglich der dargestellten Inhalte getroffen werden?**

Herr Hopfner empfindet die Ergebnisausgabe als sehr übersichtlich gestaltet. Für eine bessere Einschätzung des Strategierankings wäre es laut ihm hilfreich, den zur Reihung herangezogenen Punktescore der einzelnen Strategien anzuführen. Dadurch seien Strategien, die ein ähnlich hohes Punkteergebnis aufweisen, nochmals genauer miteinander vergleichbar. Weit zurückgefallene Strategien könnten hingegen direkt mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden.

- **Wäre die Anwendung einer ausgereiften Version des vorgestellten Excel-Tools für das betrachtete Unternehmen denkbar?**

Selbst durch eine ausgereifte Version des vorgestellten Excel-Tools wird es niemals möglich sein, alle Eventualitäten abbilden zu können. Die Einflussgrößen sind teils zu dynamisch und jedes Ersatzteil besitzt spezielle Eigenheiten. Stellt das Excel-Tool jedoch eine hilfreiche Unterstützung beim Klassifikationsprozess dar, wäre eine Anwendung für die Firma *FIAS* trotzdem durchaus denkbar.

- **Wie stark wird die additive Fertigung derzeit im Bereich der Ersatzteilversorgung vom betrachteten Unternehmen eingesetzt?**

Derzeit findet die additive Fertigung bei *FAIS* keine Anwendung. Dafür gibt es zwei Hauptgründe. Zum einen befindet sich die Entwicklung der 3D-Drucker laut Herrn Hopfner derzeit in einer Phase des starken Fortschritts. Aus diesem Grund will das Unternehmen mit einer eventuellen Geräteanschaffung noch einige Zeit (ca. zwei bis fünf Jahre) warten, um gegebenenfalls ein technisch ausgereifteres Modell zu erwerben. Zum anderen sind die Anschaffungskosten unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit nach derzeitigem Stand enorm hoch, weshalb die Wirtschaftlichkeit für *FAIS* als Kleinunternehmen noch nicht gegeben ist.

- **Können Sie weitere Verbesserungsvorschläge für eine mögliche Anwendung des Excel-Tools im betrachteten Unternehmen angeben?**

Herr Hopfner nannte hier die mögliche Einbindung von Onlinemarktplätzen in das Tool. Dadurch wäre eine automatische Überprüfung freier Maschinenkapazitäten anderer Unternehmen für die Fertigung von benötigten Ersatzteilen möglich. Speziell bei sporadisch benötigten Bedarfen könnten die *Beschaffungsbedingungen* anhand dieser Verknüpfung kurzfristig analysiert werden (z.B. *Anzahl an Lieferanten* oder *Bestellkosten*). Als Beispiel für CNC-gefertigte Teile wurde die Plattform *www.orderfox.com* genannt.

A.2.2 Interview 2 – Franz Haas Waffelmaschinen GmbH

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wichtigsten?**

Herr Heidenreich identifizierte die folgenden drei Klassifikationsmerkmale als besonders wichtig:

- 1) *Anzahl der Lagerabgänge*: Der Einteilungsvorgang wird beim betrachteten Unternehmen im Unterschied zum Demo-Tool nicht mithilfe der ABC-Analyse durchgeführt, sondern anhand von quantitativen Grenzwerten vorgenommen. Die Ausprägung für jedes Ersatzteil wird somit individuell bestimmt und die relative Abhängigkeit zum gesamten Artikelspektrum geht verloren. Das Klassifikationsmerkmal wird bei *FHW* als *Ersatzteilhäufigkeit* bezeichnet.
- 2) *Kritikalität*: Dieses Merkmal findet bei *FHW* derzeit noch keine Berücksichtigung. Der zukünftige Einsatz ist allerdings geplant, weshalb es in der Auswahl berücksichtigt und in der Auflistung erwähnt wurde.
- 3) *Beschaffungsbedingungen*: Im Speziellen wies Herr Heidenreich darauf hin, dass sowohl die *Wiederbeschaffungszeit* als auch die *Beschaffungskosten* wichtige Bestandteile dieses Merkmals sind.

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wenigsten relevant?**

Als weniger relevantes Merkmal aus Sicht des Herstellers wurden von Herrn Heidenreich die *Ausfall(folge)kosten* genannt, da es sehr schwer ist, eine Abgrenzung bezüglich der Auswirkungsreichweite von Bauteilausfällen zu ziehen. Das Vorgehen zur Beurteilung der entstehenden Kosten ist dadurch in jedem Unternehmen individuell und nicht ausreichend vergleichbar. Dieses Merkmal sollte daher eher kundenseitig bewertet werden.

Weiters zählt die *Lagerfähigkeit* ebenfalls zu den weniger relevanten Klassifikationsmerkmalen, da sie derzeit keine Anwendung bei *FHW* findet. Statt der in Kapitel 2.2.2.5 vorgeschlagenen Einteilung in Abhängigkeit der Bereitstellungsdauer zwischen zwei Losen wurde die Einführung einer Abwertungskennziffer vorgeschlagen.

Außerdem erfolgt laut Herrn Heidenreich keine Klassifizierung nach der *Fertigungsstufe*, weshalb er dieses Merkmal ebenfalls als weniger relevant einstufte. Anhand der Stücklistenstruktur wäre es jedoch möglich, die Fertigungsstufe von Ersatzteilen zu analysieren. Da *FHW* ebenfalls Ersatzteilm Pakete für seine Kunden anbietet, müssten diese durch eine zusätzliche Kategorie bei der Einteilung berücksichtigt werden.

- **Ist eine Ergänzung bzw. Änderung der im Demo-Tool vorgestellten Klassifikationsmerkmale für die mögliche Anwendung im betrachtete Unternehmen notwendig?**

Nicht alle der im Demo-Tool aufgelisteten Klassifikationsmerkmale werden im betrachteten Unternehmen angewandt. Herr Heidenreich bestätigte jedoch, dass die Auswahl der vorgestellten Merkmale gut überlegt sei und dass diese eine sinnvolle Ausgangsbasis zur Ersatzteilklassifikation bilden. Wie bereits oben erwähnt, sieht er einzig die Bewertung der *Ausfallfolgekosten* besser auf Seite des Kunden angesiedelt.

Die folgenden Merkmale wurden als mögliche Ergänzung genannt, die zur Identifikation einer geeigneten Bereitstellungsstrategie dienen könnten:

- 1) Anzahl an Angeboten und Bestellungen: Durch Analyse der Anzahl an Angebotslegungen und der Anzahl an daraus resultierenden Bestellungen kann auf die *Kaufabschlussquote* rückgeschlossen werden. Diese stellt einen guten Indikator dar, um Gründe aufzuzeigen, weshalb Kunden keinen finalen Kauf abgeschlossen haben.
- 2) Verkaufspreis an den Kunden: Ähnlich dem Lagerbestandswert wäre hier eine Einteilung mithilfe der ABC-Analyse möglich.

3) Einkaufsvorteile von Lieferanten: Als detaillierte Unterkategorie der *Beschaffungsbedingungen* könnte eine Beurteilung von Einkaufsvorteilen für unterschiedliche Lieferanten vorgenommen werden (z.B. von der Bestellmenge abhängige Staffelpreise). In der Praxis werden natürlich mehrere Lieferanten beurteilt und miteinander verglichen. Dieser Vorgang müsste allerdings gesondert in einem extra Modul des Excel-Tools durchgeführt und die Analyseergebnisse in das Hauptdateneingabeblatt übertragen werden, um Mehrfacheinträge für eine Ersatzteilnummer zu vermeiden.

- **Sind die getroffenen Abgrenzungen zwischen den einzelnen Merkmalausprägungen für die Anwendung im betrachteten Unternehmen sinnvoll oder sollten Anpassungen getroffen werden? Decken sich die im Demo-Tool getroffenen Annahmen mit den vom betrachteten Unternehmen in der Praxis angewandten Bereichsgrenzen?**

Herr Heidenreich merkte an, dass bei einigen Merkmalen eine Stücklistenabhängigkeit besteht. Dies bedeutet, dass ein gewisses Ersatzteil in unterschiedlichen Primärprodukten verbaut sein kann und je nach Anwendungsfall möglicherweise unterschiedliche Ausprägungen besitzt. Tritt solch ein Fall ein, ist immer der kritischste Anwendungsfall zu berücksichtigen. Dies betrifft beispielsweise die *Kritikalität* bzw. die *Ausfall(folge)kosten*.

Unterschiede bei der Einteilung wurden für die *Lebenszyklusphase* festgestellt. Hier ist eine passende Einschätzung laut Herrn Heidenreich relativ problematisch, da eine direkte Korrelation zum Alter nicht immer zielführend ist. Bei *FHW* definiert der Konstrukteur eines neuen Bauteils dessen Lebenszeit daher anhand eines von vier möglichen Faktoren - Durchsatz, Schaltzyklen, Betriebsstunden bzw. Einsatzmonate.

Weiters gibt es wie bereits oben erwähnt Unterschiede bei der *Anzahl an Lagerabgängen (Ersatzteilhäufigkeit)*. Hier kommen vier Ausprägungen, die mit 0 bis 3 bezeichnet werden, zum Einsatz. Je Kategorie gibt es einen festgelegten Häufigkeitsbereich an Bestelleingängen, anhand dessen die Einteilung erfolgt (z.B. Bestelhäufigkeit >12 → Einteilung in Kategorie 3).

Im Gegensatz zum Demo-Tool findet die Einteilung der *Aufarbeit- bzw. Reparierbarkeit* bei *FHW* nicht in zwei, sondern in drei Ausprägungen statt. Bei Ersatzteilen, die reparierbar sind, wird zusätzlich zwischen geringem und hohem Reparaturaufwand unterschieden.

Die Klassifikation nach dem *Ersatzteilvervolumen* findet bei der Produktionslogistik Anwendung. Herr Heidenreich schlug vor, zusätzliche Ausprägungen hinzuzufügen um beispielsweise Sichtlagerkästen bei der Klassifikation miteinbeziehen zu können.

- **Viele der identifizierten Klassifikationsmerkmale sind zeitlich dynamisch. Hätte dies für die Anwendung des Excel-Tools beim betrachteten Unternehmen negative Auswirkungen?**

Ein Excel-Tool, das keine dynamischen Merkmale enthält, würde laut Herrn Heidenreich keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, da eine Anpassung an das dynamische Umfeld im Bereich des Ersatzteilmanagements unbedingt notwendig ist, um eine aussagekräftige Klassifikation durchführen zu können. Negative Auswirkungen gehen mit dieser Tatsache unweigerlich einher, da dies mit Datenpflegeaufwand verbunden ist. Voraussetzung ist die Bereitschaft des Unternehmens die Daten zu pflegen und am aktuellen Stand zu halten.

- **Sehen Sie Probleme, welche für das betrachtete Unternehmen bei der Anwendung des Excel-Tools auftreten könnten?**

Ein großes Problem bei der Einführung einer neuen Software ist im Allgemeinen die Abstimmung der alten und neuen Systeme untereinander. Herr Heidenreich sieht das Haupthindernis in der Bereitstellung und der Übertragung der vom Excel-Tool benötigten Daten im richtigen Format. Eventuell besteht hier die Notwendigkeit der Programmierung zusätzlicher Module, um die Dateneinspeisung zu automatisieren und damit effizienter zu gestalten.

- **Wie beurteilen Sie die Ergebnisausgabe des Demo-Tools? Sind alle relevanten Daten ersichtlich oder sollten Anpassungen bezüglich der dargestellten Inhalte getroffen werden?**

Zur Verbesserung der Ergebnisausgabe lieferte Herr Heidenreich den Vorschlag einer Massenausgabe, durch welche die Analyse mehrerer bzw. aller Artikel gleichzeitig ermöglicht wird. Anstatt eines Anzeigefensters müsste die Ergebnisausgabe in einem neuen Datenblatt im Excel-Tool erfolgen. Auf diesem Weg wäre eine Auswertung für verschiedene Produktgruppen bzw. Merkmaleigenschaften möglich.

Die Gestaltung des bei der Analyse eines einzigen Artikels verwendete Ausgabefenster bewertete der Experte als übersichtlich und gut durchdacht.

- **Wäre die Anwendung einer ausgereiften Version des vorgestellten Excel-Tools für das betrachtete Unternehmen denkbar?**

Aus Herrn Heidenreichs Ansicht wäre die Anwendung bei *FHW* auf jeden Fall denkbar. Eine unternehmensbezogene Anpassung der Klassifikationsmerkmale müsse allerdings erfolgen. Wie bereits erwähnt, wäre es aber unbedingt notwendig zu überprüfen, ob alle benötigten Daten bereitgestellt werden können.

- **Wie stark wird die additive Fertigung derzeit im Bereich der Ersatzteilversorgung vom betrachteten Unternehmen eingesetzt?**

Die additive Fertigung wird bei *FHW* derzeit nicht verwendet und laut Herrn Heidenreichs Informationen ist derzeit auch keine Anwendung in naher Zukunft geplant. Seiner Meinung nach ist das Potenzial für den Einsatz von 3D-Druckern jedoch äußerst hoch. Durch die Installation additiver Fertigungsanlagen in den Servicezentren würden sich neue Möglichkeiten bei der Ersatzteilbereitstellung ergeben.

- **Können Sie weitere Verbesserungsvorschläge für eine mögliche Anwendung des Excel-Tools im betrachteten Unternehmen angeben?**

Eine statistische Auswertung verschiedener Parameter der vorgeschlagenen Massenausgabe wäre Herrn Heidenreich zufolge sinnvoll (z.B. Anzahl an Ersatzteilen je Bereitstellungsstrategie). Die Ergebnisse könnten außerdem mehr Aufschluss über Abhängigkeiten zwischen gewissen Ausprägungskombinationen und den verfügbaren Versorgungsstrategien geben.

A.2.3 Interview 3 – Großunternehmen im Schienenfahrzeugbau

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wichtigsten?**

Der Experte wählte unter den vorgestellten Klassifikationsmerkmalen sowohl drei qualitative als auch drei quantitative Merkmale aus, welche seiner Meinung nach am wichtigsten für das betrachtete Unternehmen sind.

Zu den qualitativen Merkmalen zählte er die *Kritikalität*, das *Obsoleszenzrisiko* und die *Beschaffungsbedingungen*. Unter den quantitativen Merkmalen fanden sich der *Lagerbestandswert*, der *Ersatzteilbedarf* sowie die *Prognostizierbarkeit des Bedarfs*.

Hier ist zu erwähnen, dass die *Kritikalität* beim betrachteten Unternehmen auf zwei Arten bewertet wird. Zum einen findet eine Einteilung in mobilitätskritische (z.B. Defekt der Frontscheibe) und mobilitätsunkritische (z.B. defekte Armlehne eines Sitzes) Ersatzteile. Zum anderen werden Bauteile in vier Kategorien bezüglich ihrer Sicherheitsrelevanz eingeteilt. Dadurch können Auswirkungen bei Versagen eines Teils bewertet werden.

In Bezug auf die *Beschaffungsbedingungen* hob der Interviewpartner speziell die *Liefer- bzw. Beschaffungszeit* als besonders relevant hervor, da diese in manchen Fällen mehrere Monate betragen kann und somit starken Einfluss auf die rechtzeitige Bereitstellung von Ersatzteilen hat.

- **Welche der im Demo-Tool identifizierten Ersatzteilmerkmale erscheinen Ihnen mit Fokus auf das betrachtete Unternehmen für Entscheidungen bezüglich der Ersatzteilbereitstellung am wenigsten relevant?**

Die für das betrachtete Unternehmen weniger relevanten Klassifikationsmerkmale sind laut dem Vertreter die *Ausfall(folge)kosten* und die *Lebenszyklusphase*. Für beide der Merkmale findet keine aktive Analyse statt. Letztere wird jedoch sekundär in Form von Prüfung einer notwendigen bzw. möglichen Überholung genutzt, da sich Schienenfahrzeuge meist mehrere Jahrzehnte im Einsatz befinden.

- **Ist eine Ergänzung bzw. Änderung der im Demo-Tool vorgestellten Klassifikationsmerkmale für die mögliche Anwendung im betrachtete Unternehmen notwendig?**

Der Experte schlug eine detailliertere Beurteilung der *Materialeignung für den 3D-Druck* vor (vgl. Anhang A.2.4). Im ersten Schritt müsse hierzu überprüft werden, ob das Material, aus welchem das betrachtete Bauteil gefertigt wurde, überhaupt bekannt ist. Gerade bei älteren Bauteilen ist dies oft nicht der Fall. Ist das Material bekannt, so gilt es im zweiten Schritt zu eruieren, ob das ursprünglich verwendete bzw. ein vergleichbares Material vorhanden ist. Bei der Suche nach einem vergleichbaren Material muss sichergestellt werden, dass die bauteilseitigen Anforderungen durch dessen Eigenschaften erfüllt werden. Im Falle des betrachteten Unternehmens könnte anschließend weiters eine Klassifizierung des Zulassungsprozessaufwandes durchgeführt werden. Für ein allgemeingültiges Modell ist dies jedoch zu speziell, weshalb dieser Fall nicht weiter diskutiert wurde.

Zusätzlich zur *Lagerfähigkeit* sollte nach Meinung des Unternehmensvertreters auch die *Lagerart* Berücksichtigung finden. Beispielsweise könnte ermittelt werden, ob die *Stapelbarkeit* des Ersatzteils gegeben ist, ob *spezielle Lagerbedingungen* notwendig sind oder ob es sich um *Schüttgut* handelt.

- **Sind die getroffenen Abgrenzungen zwischen den einzelnen Merkmalausprägungen für die Anwendung im betrachteten Unternehmen sinnvoll oder sollten Anpassungen getroffen werden? Decken sich die im Demo-Tool getroffenen Annahmen mit den vom betrachteten Unternehmen in der Praxis angewandten Bereichsgrenzen?**

Wie bereits oben erwähnt, wirken sich die Unterschiede bezüglich des Klassifikationsvorganges natürlich auch auf die Ausprägungen der betroffenen Merkmale aus (z.B. *Kritikalität*). Es fanden sich allerdings auch Merkmale, die dasselbe Klassifikationsziel verfolgen, jedoch Differenzen bei deren Ausprägungen zeigen.

Beispielsweise erfolgt laut dem Experten beim betrachteten Unternehmen keine direkte Einteilung des *Obsoleszenzrisikos* in die Klassen *hohes*, *mittleres* und

geringes Risiko. Stattdessen, wird bei den Bauteilen nur nach ihrem gegenwärtigen Zustand zwischen *obsolet* bzw. *nicht obsolet* unterschieden.

Auch das *Ersatzteilvermögen* wird nach anderen Ausprägungen klassifiziert. Anstatt der Abgrenzung durch vorgegebene Werte (z.B. Bauraumgröße des 3D-Druckers) erfolgt die Einteilung nach einer klassischen GMK-Analyse. Zu diesem Zweck wurden beim betrachteten Unternehmen bereits an zwei Standorten Portalscanner zur Bestimmung der Ersatzteilabmessungen im Zuge der Einlagerung installiert.

- **Viele der identifizierten Klassifikationsmerkmale sind zeitlich dynamisch. Hätte dies für die Anwendung des Excel-Tools beim betrachteten Unternehmen negative Auswirkungen?**

Der Vertreter gab an, dass derzeit 85.000 Teile aktiv beim betrachteten Unternehmen gehalten werden. Durch Einführung neuer Artikelnummern, fortschreitende Technologien oder neue gesetzliche Regelungen kommt es aber laufend zu Veränderungen. Durchgeführte Klassifikationen können von diesen Veränderungen betroffen sein. Als Beispiel nannte der Experte sowohl die Einführung einer neuen Brandschutznorm als auch eine Verbesserung der additiven Fertigungsanlagen. Im ersten Fall würden normbedingte Änderung der Ausprägungen zu einer komplett anderen Klasseneinteilung älterer Teile führen, wodurch manche dieser Artikel die neuen Brandschutzvorschriften beispielsweise nicht mehr erfüllen würden. Hier muss eine klare Grenze gezogen werden, für welche Teile die neue Art der Klassifizierung gilt. Der zweite Fall zeigt, dass es außerdem wichtig ist, zu definieren, weshalb gewisse Bereitstellungsstrategien für die jeweilig betroffenen Ersatzteile ausgeschlossen wurden. Können beispielsweise die Oberflächeneigenschaften durch den Einsatz moderner, additiver Fertigungsanlagen verbessert werden, ist es wichtig zu wissen, welche Ersatzteile aufgrund dieses Kriteriums bei einer vorherigen Klassifizierung ausgeschlossen sind, um eine erneute Überprüfung gezielt durchführen zu können.

Ein Excel-Tool ohne dynamische Klassifikationsmerkmale ist dem Interviewpartner zufolge nicht zielführend realisierbar. Wichtig ist es, dafür zu sorgen, dass Lösungen gefunden werden, um auftretenden Problemen entgegenwirken zu können.

- **Sehen Sie Probleme, welche für das betrachtete Unternehmen bei der Anwendung des Excel-Tools auftreten könnten?**

Problematisch bei der Anwendung wäre die Datensammlung sowie der Datentransport in das Excel-Tool. Eine Multisystemnutzung ist laut dem Experten meist mit Komplikationen verbunden, weshalb er hier ein weiteres Hindernis sieht. Durch eine überschlägige Rechnung wurde festgestellt, dass 10 Vollzeitmitarbeiter aufgrund der hohen Anzahl an Ersatzteilnummern etwa 2 Monate dafür benötigen würden, alle Daten manuell in das Tool einzutragen. Es wäre also auf jeden Fall notwendig, den Prozess der Dateneinspeisung zu automatisieren.

- **Wie beurteilen Sie die Ergebnisausgabe des Demo-Tools? Sind alle relevanten Daten ersichtlich oder sollten Anpassungen bezüglich der dargestellten Inhalte getroffen werden?**

Als Verbesserungsvorschlag wies der Unternehmensvertreter auf die mögliche Bewertung der 3D-Druck Eignung nach technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten durch Punktwerte auf zuvor definierten Skalen hin. Trägt man den technologischen sowie den wirtschaftlichen Score auf die Achsen eines Diagramms auf, bestünde die Möglichkeit, die Ergebnisse in Form eines Punkts für jedes Ersatzteil in diesem Diagramm einzutragen und anschließend Vergleiche anzustellen.

Die restliche Darstellung der Analyseergebnisse ist dem Experten nach gut strukturiert und übersichtlich gestaltet.

- **Wäre die Anwendung einer ausgereiften Version des vorgestellten Excel-Tools für das betrachtete Unternehmen denkbar?**

Die Anwendung im betrachteten Unternehmen wäre laut dem Experten vorstellbar, wenn die zuvor erwähnten Probleme bewältigt werden können. Dazu wäre es wahrscheinlich nötig, einen Programmcode zu schreiben, der die automatische Übertragung der Ersatzteilausprägungen in das Excel-Tool ermöglicht.

- **Wie stark wird die additive Fertigung derzeit im Bereich der Ersatzteilversorgung vom betrachteten Unternehmen eingesetzt?**

Beim betrachteten Unternehmen befindet sich die additive Fertigung bereits aktiv im Einsatz. Der Interviewpartner berichtete von insgesamt 14 3D-Druckern, die auf drei Standorten verteilt sind. Dabei handelt es sich um Geräte die entweder nach dem Prinzip des selektiven Lasersinterns (engl.: Selective Laser Sintering; kurz SLS) bzw. dem Schmelzschichtprinzip (engl.: Fused Deposition Modeling; kurz FDM) arbeiten. Beide Verfahren werden verwendet um Kunststoffteile herzustellen. Drucker die nach dem SLM-Verfahren arbeiten, finden derzeit keine Anwendung, weshalb Metallteile nicht additiv gefertigt werden können.

Zum Zeitpunkt des Interviews besaßen nur etwa 50 der bereits erwähnten 85.000 aktiven Teile des Unternehmens eine Freigabe zur Herstellung nach dem additiven Verfahren. Dieser Anteil entspricht ca. 0,05%. Weitere 100 Materialnummern sind allerdings bereits in Vorbereitung auf die Zulassung. Bei den Teilen, die 3D-gedruckt werden, handelt es sich meist um abgekündigte oder überbeuerte Ersatzteile bzw. um Artikel, deren Struktur durch eine Neugestaltung (Re-Engineering) verändert wurde.

Die 3D-Druckbarkeit wird nach der Analyse eines Ersatzteils entweder mit *gegeben* bzw. *nicht gegeben* bewertet. Wie oben erwähnt, ist es dabei wichtig, den Grund zu definieren, warum ein Bauteil gegebenenfalls nicht für die additive Fertigung geeignet ist. Vor dem Analyseprozess besitzen alle Artikel den Status *nicht analysiert*.

- **Können Sie weitere Verbesserungsvorschläge für eine mögliche Anwendung des Excel-Tools im betrachteten Unternehmen angeben?**

Es wurden keine weiteren Verbesserungsvorschläge vom befragten Unternehmensvertreter erwähnt.

A.2.4 Interview 4 – MostTech

- **Um welche Art von Bauteilen handelt es sich bei den von Ihnen erhaltenen Fertigungsaufträgen anderer Firmen?**

Herr Hofer konnte keine genauen Anteile nennen aber die von ihm erhaltenen Aufträge umfassen sowohl die Herstellung von Ersatzteilen als auch die Erzeugung von Primärprodukten. Während die additive Fertigung anfänglich hauptsächlich für Prototypen verwendet wurde, ist heutzutage ein Trend in Richtung der kleinen Serienfertigung (ca. 10-1000 Stück) zu erkennen. Dies spielt speziell für Unternehmen, welche Primärprodukte in vergleichsweise geringen Stückzahlen produzieren (z.B. Sondermaschinenbau, Luftfahrtsektor oder Schienenfahrzeugbau), eine bedeutende Rolle. Doch auch aus dem Automobilssektor nannte Herr Hofer zwei Anwendungsfälle, bei denen eine Kleinserienfertigung mittels SLM-Verfahren bereits Einsatz findet.

- **Welche Rolle spielt das verwendete Modell des 3D-Druckers für die erzielbaren Ergebnisse eines additiv gefertigten Bauteils? Worauf hat die Preisklasse des 3D-Druckers die größte Auswirkung?**

In Anbetracht der erzielbaren Detailauflösung spielt das verwendete Druckermodell laut Herrn Hofer nur eine untergeordnete Rolle. Die eingesetzten Laser in SLM-Anlagen weisen i. d. R. unabhängig vom verwendeten Modell ausgezeichnete Eigenschaften auf. Allerdings sei der von den verwendeten Materialien abhängige Einfluss auf die erzielbaren Ergebnisse nicht außer Acht zu lassen.

Bezogen auf die Preisklasse spielen laut dem Experten zwei wesentliche Faktoren eine wichtige Rolle. Auf der einen Seite ist eine Korrelation zum Bauraumvolumen vorhanden und auf der anderen Seite ist die erzielbare Druckgeschwindigkeit vom Preis der Anlage abhängig. Nicht nur die Laseranzahl beeinflusst letztere, sondern auch Mechanismen zur Reduktion von Leerzeiten beim Auftragen der Pulverschichten. Als Beispiel wurde hier der bidirektionale Pulverauftrag von Geräten der Firma *SLM Solutions* genannt.

- **Welche Zeitdauer wird für die Vorbereitungstätigkeiten des Druckprozesses benötigt?**

Diese Frage kann pauschal nur sehr schwer beantwortet werden, da die Vorbereitungszeit des Druckprozesses sehr stark von der Komplexität des zu fertigenden Bauteils abhängt. Herr Hofer betonte hier besonders die Beeinflussung durch die

Menge an benötigten Stützstrukturen sowie die gewählte Orientierung des Modells im Bauraum.

Prinzipiell besteht der digitale Vorbereitungsprozess jedoch bei allen Modellen aus vier Schritten. Nach der Positionierung im Bauraum folgen die Erzeugung der notwendigen Stützstruktur, der Slicingvorgang des Modells und das Festlegen der Scanwege während des Modellaufbaus. Sind diese Vorbereitungen für ein Bauteil abgeschlossen, können sie gespeichert und gegebenenfalls bei einer Nachproduktion wieder abgerufen werden. Der gesamte Vorgang muss somit nur einmal beim Erstdruck durchgeführt werden und eine wiederholte Fertigung kann schnell und einfach „per Knopfdruck“ gestartet werden.

- **Wovon hängt die tatsächlich erreichbare Aufbaurrate eines 3D-Druckers ab?**

Hier gab es drei Einflussgrößen, die Herr Hofer nannte. Durch die gewählte Schichtdickenauflösung in z-Richtung wird die Zahl der benötigten Layer festgelegt, die notwendig sind, um das gewünschte Bauteil vollständig aufzubauen. Wird eine hohe Auflösung gewählt, müssen dementsprechend auch mehr Schichten generiert werden. Folglich sind mehrere Pulverauftrags- und Bestrahlungsprozesse notwendig, die zu einer Reduktion der Aufbaurrate führen.

Zweitens wurde die Strukturabhängigkeit erwähnt. Am Ende des Bestrahlungsvorgangs einer Pulverschicht werden die Konturen der Struktur erneut vom Laser nachgefahren, um eine feinere Oberfläche des fertigen Bauteils zu erhalten. Komplexe Strukturen, die eine große Oberfläche aufweisen, wirken sich demnach negativ auf die erzielbare Aufbaurrate aus.

Als letzter Faktor wurde die starke Korrelation zwischen der Anzahl an verwendeten Lasereinheiten und der möglichen Arbeitsgeschwindigkeit des 3D-Druckers angesprochen (mehrere Lasereinheiten führen zu höheren Aufbauraten).

- **Welche Schritte müssen nach dem Druckprozess durchgeführt werden und welche Zeitdauer wird dafür benötigt?**

Bevor weitere Bearbeitungsschritte folgen, muss das Bauteil abkühlen. Dies kann je nach Größe und Struktur mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Anschließend erfolgt die Reinigung, um anhaftendes Metallpulver vom Modell zu entfernen. In weiterer Folge kann die Stützstruktur auf mechanischem oder elektrochemischem Weg entfernt werden. Je nach Bauteilanforderungen erfolgt zuletzt ein maschineller Einsatz, um notwendige Funktionsflächen gegebenenfalls nachzubearbeiten. I. d. R. kann für den gesamten Abkühl- und Nachbearbeitungsprozess eines unkomplizierten Bauteils laut dem Experten mit einer Zeitspanne von etwa 90-120 Minuten gerechnet werden, wobei eine allgemeine Aussage aufgrund vieler Einflüsse nur schwer möglich ist. Diese Zeitdauer kann durch entsprechende Berücksichtigungen beim

Designvorgang erheblich beeinflusst werden. Beispielsweise sollte probiert werden, die Stützstruktur direkt ins Bauteil miteinzubinden oder das Design so zu wählen, dass nur wenige Flächen nachzubearbeiten sind.

- **Welche Materialien können mithilfe der additiven Fertigung verarbeitet werden? Gibt es Abhängigkeiten vom Hersteller des 3D-Druckers in Bezug auf die einsetzbaren Metallpulver?**

Laut Herrn Hofer ist die Palette an Materialien, die nach dem SLM-Verfahren verarbeitet werden können, sehr groß. Prinzipiell kann gesagt werden, dass schweißbare Materialien auch für die additive Fertigung geeignet sind. I. d. R. stellen Hersteller von 3D-Druckern ebenfalls verschiedene Metallpulver zur Verfügung. Gemeinsam mit einem erprobten und empfohlenen Parametersatz für die Geräteeinstellungen kann der Druckprozess unkompliziert und mit gut einschätzbaren Ergebnissen durchgeführt werden.

Aus Perspektive der Herstellerabhängigkeit unterscheidet man je nach Modell des 3D-Druckers zwischen offenen und geschlossenen Anlagen. Erstere ermöglichen den Einsatz beliebiger Pulver, da die Verarbeitungsparameter solcher Anlagen frei einstellbar sind. Geschlossene Anlagen hingegen erlauben nur die Verwendung vorgegebener Pulver und sind dadurch zwar unkompliziert beim Einstellungsvorgang, jedoch in der Anzahl an Möglichkeiten eingeschränkt.

- **Welche Unterschiede bei der erzielbaren Detailauflösung eines Bauteils sind durch die Verwendung verschiedener Metallpulver bemerkbar?**

Typische Korngrößenbereiche für Metallpulver zur additiven Verarbeitung liegen beispielsweise bei 15-45 μm bzw. 20-63 μm . Feine Pulver sind eine Grundvoraussetzung für das Erzielen guter Ergebnisse. Limitierender Faktor für die theoretisch erreichbare Detailauflösung kann entweder die Korngröße des Pulvers bzw. der Fokusdurchmesser des Lasers sein (je nachdem welcher Parameter einen höheren Wert besitzt). Herr Hofer erwähnte jedoch auch die Wichtigkeit eines gut abgestimmten Prozesses zwischen Drucker und Material. Eine schlechte Wahl der Prozessparameter kann selbst bei Einsatz von sehr hochwertigen Pulvern zu nicht zufriedenstellenden Resultaten führen.

- **Welche Bauteileigenschaften müssen vorliegen, damit die Herstellbarkeit mittels additiver Fertigung gegeben ist? Sind die im Demo-Tool enthaltenen Merkmale sinnvoll bzw. durch welche weiteren Merkmale können diese erweitert werden?**

Herr Hofer gab an, dass prinzipiell jede Struktur bzw. jedes Modell durch additive Fertigung im SLM-Verfahren hergestellt werden kann. Es stellt sich jedoch immer die Frage der Sinnhaftigkeit in Hinsicht auf Wirtschaftlichkeit und die erreichbaren Fertigungsvorteile. Kann beispielsweise eine Stützstruktur aufgrund der Modellgestal-

tung nicht entfernt werden, muss nach Alternativen gesucht werden. Aufgrund dieses Ansatzes müssen die Klassifikationsmerkmale laut dem Experten vor allem so definieren werden, dass eine Beurteilung des Mehrwerts gegenüber konventionellen Fertigungsmethoden möglich ist.

Die im Demo-Tool enthaltenen Merkmale (*CAD-Datei vorhanden*, *Geringste Wandstärke und Oberflächenrauigkeit*) wurden als guter Ansatz bewertet. Ebenso wurde der mit 0,3 mm angenommene Wert als allgemeine Ausprägungsgrenze für die Beurteilung der geringsten, herstellbaren Wandstärke für realistisch eingestuft.

Weitere Kriterien, die laut Herrn Hofer überprüft werden sollten, sind die Komplexität des Bauteils und das benötigte Material. Speziell Funktionsflächen sollten bei der Beurteilung der Modellkomplexität Berücksichtigung finden. Hier kann beispielsweise eine Einteilung nach *Anzahl der Funktionsflächen (keine, wenige, viele)* vorgenommen werden. Bei der Klassifizierung nach der *Materialeignung* wurde eine Einteilung in die Klassen *nicht geeignet*, *Sonderpulver* und *Standardpulver* vorgeschlagen. Die Bezeichnung Sonderpulver weist darauf hin, dass das Material prinzipiell geeignet ist, aber nicht standardmäßig in Pulverform angeboten wird. Die Herstellung durch Übermittlung eines Spezialauftrags ist jedoch möglich.

- **Ist der Einsatz der additiven Fertigung zur Wiederinstandsetzung bzw. Aufwertung von Ersatzteilen möglich?**

In solchen Fällen wird von Hybridverfahren gesprochen. Herr Hofer erwähnte ein Beispiel aus dem Luftfahrtsektor, bei welchem verschlissene Turbinenschaufelblätter auf ein definiertes Maß abgefräst und anschließend durch das SLM-Verfahren wieder bis zu ihrem ursprünglichen Sollmaß aufgebaut werden. Der Einsatz ist also möglich und kann zur erheblichen Senkung der Reparaturkosten führen.

- **Wie beurteilen Sie die Ergebnisausgabe des Demo-Tools? Sind alle relevanten Daten ersichtlich oder sollten Anpassungen bezüglich der dargestellten Inhalte getroffen werden?**

Die Ergebnisausgabe wurde von Herrn Hofer als gut gestaltet bewertet. Demnach sind seiner Meinung nach keine Änderungen im Design der Ausgabemaske notwendig. Die Beurteilung der 3D-Druck Eignung durch die Ausprägungen *gegeben* und *nicht gegeben* sollte allerdings durch weitere Ausprägungsklassen ergänzt werden, um eine bessere Einschätzung der Ergebnisse zu ermöglichen. Eine zusätzliche Kategorie könnte beispielsweise als *bedingt gegeben* bezeichnet werden und aus Sonderpulver hergestellte Bauteile bzw. Ersatzteile mit komplexer Struktur oder vielen Funktionsflächen enthalten.

A.2.5 Interview 5 – Prof. Stampfl (TU Wien)

- **Welche Rolle spielt das verwendete Modell des 3D-Druckers für die erzielbaren Ergebnisse eines additiv gefertigten Bauteils? Worauf hat die Preisklasse des 3D-Druckers die größte Auswirkung?**

Anstatt 3D-Drucker nach ihren erzielbaren Fertigungsergebnissen auszuwählen, ist es laut Prof. Stampfl wichtiger, die Entscheidung des verwendeten 3D-Druckers vom herzustellenden Bauteil abhängig zu machen. Je nach Ersatzteilstruktur spielen beispielsweise Verzug, innere Spannungen oder Oberflächenbeschaffenheit eine wichtige Rolle bei der Wahl der additiven Fertigungsanlage. Die gewünschten Bauteileigenschaften müssen mit den Eigenschaften des Druckers abgestimmt sein.

Als Hauptkriterien, auf welche die Preisklasse Auswirkungen hat, wurden die Bauraumgröße sowie die Anzahl an Lasereinheiten genannt.

- **Wovon hängt die tatsächlich erreichbare Aufbaurrate eines 3D-Druckers ab?**

Die erreichbare Aufbaurrate ist laut Prof. Stampfl von der Anzahl und Art an Lasereinheiten, von der Schichtdickenauflösung und von der Komplexität der Struktur abhängig. Ein wichtiger Faktor, der die Aufbaurrate in jedem Fall begrenzt, ist die Notwendigkeit einer ausreichenden Wärmeableitung. Hierbei ist allerdings auch zu beachten, dass eine zu schnelle Wärmeableitung negative Auswirkungen mit sich zieht, da es so zur Versprödung des Materials kommen kann. Letztendlich kann gesagt werden, dass die Aufbaurrate des 3D-Druckers also selbst durch eine erhöhte Abkühlrate nur schwer gesteigert werden könnte.

- **Welche Materialien können mithilfe der additiven Fertigung verarbeitet werden? Gibt es Abhängigkeiten vom Hersteller des 3D-Druckers in Bezug auf die einsetzbaren Metallpulver?**

Ein guter Weg zur Feststellung der Materialeignung für die additive Fertigung ist die Überprüfung der Schweißbarkeit eines Materials. Ist letztere gegeben, kann nach Aussagen von Prof. Stampfl davon ausgegangen werden, dass der Einsatz im SLM-Verfahren ebenfalls möglich ist. Sollte jedoch trotzdem der Fall auftreten, dass der bei der Konstruktion gewählte Werkstoff eines Ersatzteils nicht für die additive Fertigung geeignet ist, stellt es i. d. R. kein Problem dar, auf einen anderen Werkstoff mit ähnlichen Eigenschaften auszuweichen.

Die Hersteller bieten entweder offene oder geschlossene Anlagen an. Erstere ermöglichen den Einsatz beliebiger Metallpulver, da die Verarbeitungsparameter frei wählbar und dadurch an das Material anpassbar sind. Für Letztere bestehen meist Einschränkungen, die nur vom Hersteller freigegebene Pulver bei der Verarbeitung zulassen.

- **Welche Unterschiede bei der erzielbaren Detailauflösung eines Bauteils sind durch die Verwendung verschiedener Metallpulver bemerkbar?**

Prof. Stampfl zufolge ist es in erster Linie wichtig, dass Material und Maschine aufeinander abgestimmt sind. Dies sei notwendig um den Fertigungsprozess in ausreichender Qualität zu etablieren. Um die gewünschten Ergebnisse zu erreichen, müssen alle Parameter stimmen. Nach dem Prinzip des „schwächsten Glieds der Kette“ ist es nicht ausreichend, wenn beispielsweise nur vier von fünf Parametern in befriedigendem Maß erfüllt werden. Kann eine zufriedenstellende Ermüdungsbruchbeständigkeit z.B. nur mit „Maschine A“ erreicht werden, ist diese Maschine auch notwendig, um das gewünschte Ersatzteil zu fertigen.

Im Vergleich zu gegossenen Bauteilen haben pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile tendenziell bessere mechanische Eigenschaften. Ebenso liegen die Anwendungsfälle meist bei Ersatzteilen mit komplexen Anforderungen (Spezialfälle). Aus diesen Gründen ist zu erahnen, dass in der additiven Fertigung mit metallischen Werkstoffen i. d. R. nur sehr hochwertige Materialien zum Einsatz kommen, die im Normalfall zu ähnlichen Ergebnissen bei der erzielbaren Detailauflösung führen.

- **Welche Bauteileigenschaften müssen vorliegen, damit die Herstellbarkeit mittels additiver Fertigung gegeben ist? Sind die im Demo-Tool enthaltenen Merkmale sinnvoll bzw. durch welche weiteren Merkmale können diese erweitert werden?**

Bei der Analyse der bisher definierten Merkmale erwähnte Prof. Stampfl, dass die Merkmale *CAD-Datei vorhanden* und *Materialeignung* zwar überprüfbar und die dazugehörigen Ausprägungen auch sinnvoll angenommen sind, jedoch stellen sie kein absolutes Ausschlusskriterium bei Nichterfüllung der bevorzugten Ausprägung dar. Ist die additive Fertigung für ein spezielles Ersatzteil unumgänglich, so wird es in jedem Fall möglich sein, die benötigten CAD-Dateien anzufertigen bzw. für ein ungeeignetes Material passenden Ersatz zu finden.

Die Ausprägungsgrenze für die *geringste Wandstärke* eines Bauteils ist mit einem Wert von 0,3 mm laut dem Experten vernünftig angenommen und sollte mit jeder verfügbaren SLM-Anlage realisierbar sein.

Zusätzlich zur Auswertung der *Oberflächenrauigkeit* sollte eine Kategorisierung nach benötigten Funktionsflächen getroffen werden. Im Allgemeinen ist die Oberfläche des gedruckten Modells nicht glatt genug, um beispielsweise Dichtflächen oder Passungen ohne Nachbearbeitungsschritte realisieren zu können. Durch Einführung des zusätzlichen Merkmals *Funktionsflächen vorhanden*, ließe sich der Aufwand der Nachbearbeitungsphase abschätzen.

Ebenso wurde bei der Analyse des *Ersatzteilvervolumens* ein weiteres Merkmal von Prof. Stampfl identifiziert, welches in den Katalog aufgenommen werden sollte. Dabei handelt es sich um das *Verhältnis zwischen umschriebenem Quadervolumen* (Volumen des kleinsten Quaders, der das Ersatzteil vollständig einschließt) *zu tatsächlichem Volumen des Körpers*. Für die Anwendung der additiven Fertigung ist ein hoher Wert dieses Verhältnisses von Vorteil, da das SLM-Verfahren in Bezug auf die Kosten pro verarbeitetem Materialvolumen (€/cm^3) verglichen mit konventionellen Fertigungsmethoden sehr teuer ist. Laut Prof. Stampfl muss allein für den Bezug eines Materials in Pulverform ein Kostenaufschlagfaktor von ca. 10-100 einkalkuliert werden.

Außerdem empfahl der Experte das *Ersatzteilvervolumen* in weitere Klassen zu unterteilen. Zusätzliche Ausprägungsabgrenzungen könnten demnach verwendet werden, um festzustellen, ob gewisse Bauteile für die Aufbewahrung in Sichtlagerkästen unterschiedlicher Größe geeignet sind (z.B. für Kleinteile wie Schrauben, Stifte, Scheiben oder Passfedern).

Um eine wirtschaftliche Anwendung der additiven Fertigung zu überprüfen, sollten laut Prof. Stampfl die folgenden vier Punkte näher in Betracht gezogen werden:

- 1) *Ersatzteilvervolumen*: Die Kosten für ein additiv gefertigtes Bauteil skalieren linear mit dessen tatsächlichem Volumen. Aufgrund der generell hohen Kosten ist derzeit nicht zu erwarten, dass die Anwendung des SLM-Verfahrens für große Bauteile zukünftig wirtschaftlich betrieben werden kann.
- 2) *Überprüfen der Ersetzbarkeit von Baugruppen durch Einzelteile*: Oft ist es möglich, komplexe Baugruppen mithilfe der additiven Fertigung durch ein Einzelteil zu ersetzen. In solchen Fällen ist die Anwendung des 3D-Drucks meist vorteilhaft und sollte als mögliche Fertigungsalternative in Betracht gezogen werden. Eine Überprüfung dieser Möglichkeit anhand von Ersatzteileigenschaften im Excel-Tool ist leider kaum realisierbar. Daher kann dieser Punkt nur durch einen Mitarbeiter beurteilt werden.
- 3) *Ersatzteilkomplexität*: In Fällen, bei denen eine hohe Komplexität vorliegt, ist die additive Fertigung manchmal nicht umgänglich. Selbst hohe Preise spielen dann oft keine Rolle, da keine Alternative zur Verfügung steht.
- 4) *Losgröße*: Je kleiner die Losgröße, desto eher rentiert sich die Fertigung mittels 3D-Druck. Als abgeschätzten Grenzwert nannte Prof. Stampfl eine ungefähre Losgröße von 100 Stück für ein Bauteil mit 100 ml tatsächlichem Volumen.

- **Ist der Einsatz der additiven Fertigung zur Wiederinstandsetzung bzw. Aufwertung von Ersatzteilen möglich?**

Prof. Stampfl gibt an, dass es sich hierbei um einige der ersten Anwendungen der additiven Fertigung mittels SLM-Verfahren handelt. Folglich ist es möglich Bauteile mit hohem Verschleiß wieder instand zu setzen bzw. diese aufzuwerten. Als Beispiel wurde das Auftragsschweißen bei Turbinenschaufeln genannt.

- **Wie beurteilen Sie die Ergebnisausgabe des Demo-Tools? Sind alle relevanten Daten ersichtlich oder sollten Anpassungen bezüglich der dargestellten Inhalte getroffen werden?**

Eine eindeutige Feststellung der 3D-Druck-Eignung eines Ersatzteiles ist laut Prof. Stampfl durch die alleinige Verwendung des Excel-Tools nicht möglich. Die Ausprägungen *gegeben* und *nicht gegeben* müssen seiner Meinung nach durch weitere Einteilungsmöglichkeiten ergänzt werden. Als Beispiel könne ein Bewertungsschema mit einem Punktescore von 1-5 bzw. 1-10 herangezogen werden. Die vorgeschlagene Scala würde somit von *nicht druckbar* bis *3D-Druck erforderlich* reichen und eine bessere Einschätzung des erzielbaren Nutzens wäre durch die zusätzlichen Abstufungen möglich.

- **Welche sind die wichtigsten Themengebiete im Bereich der additiven Fertigung mit dem SLM-Verfahren, an denen derzeit geforscht wird?**

Prof. Stampfl nannte zwei wichtige Bereiche bei denen das Hauptaugenmerk der Forschung derzeit liegt – die Verbesserung der Prozessgeschwindigkeit und die Vergrößerung des Materialspektrums.

Wie bereits weiter oben erwähnt, findet das SLM-Verfahren speziell bei komplexen Bauteilen Anwendungen. Für diese sind i. d. R. auch hochwertige Werkstoffe notwendig. Aus diesem Grund ist der Bereich der Materialforschung laut dem Experten äußerst wichtig. Hingegen macht es nicht viel Sinn daran zu arbeiten, die Lasereinheiten durch Verringerung des Fokusdurchmessers weiter zu verbessern, da durch die Korngröße des Metallpulvers ebenfalls eine Restriktion in der realisierbaren Detailauflösung vorliegt.

A.3 Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools

Anwendung des Excel-Tools zur automatischen Ersatzteilklassifikation

1) Klassifikationsmerkmale definieren

- Wechseln Sie zu den Registerblättern "Qualitative Merkmale" bzw. "Quantitative Merkmale".
- Benutzen Sie die zur Verfügung stehenden Schaltflächen, um die Klassifikationsmerkmale entsprechend Ihren Wünschen zu ergänzen und anzupassen.
- Folgen Sie den Anweisungen der einzelnen Eingabefenster.
- Ausschlusskriterien und nachteilige Kriterien:¹
 - Ausschlusskriterien: besitzt ein Ersatzteil eine Merkmalausprägung, die als Ausschlusskriterium für eine gewisse Nachserienversorgungsstrategie definiert wurde, wird die betroffene Strategie bei der Analyse ausgeschlossen.
 - Nachteilige Kriterien: besitzt ein Ersatzteil eine Merkmalausprägung, die als nachteiliges Kriterium für eine gewisse Nachserienversorgungsstrategie definiert wurde, wird die betroffene Strategie bei der Analyse schlechter bewertet.

2) Merkmalgewichtung

- Wechseln Sie zum Registerblatt "Merkmalgewichtung".
- Tragen Sie für jedes Merkmal einen Gewichtungswert von 0 bis 10 ein.¹

3) Kontrolle der definierten Klassifikationsmerkmale

- Wechseln Sie zum Registerblatt "Kriterienübersicht".
- Hier können Sie die zuvor getätigten Eingaben für die einzelnen Nachserienversorgungsstrategien kontrollieren.
 - Rot gefärbte Zellen stellen Ausprägungen, die zum Ausschluss führen, dar.
 - Orange gefärbte Zellen stellen nachteilige Ausprägungen dar.

4) Die additive Fertigung beeinflussende Klassifikationsmerkmale definieren

- Wechseln Sie zum Registerblatt "3D-Druck".
- Benutzen Sie die zur Verfügung stehende Schaltfläche, um die den 3D-Druck beeinflussenden Klassifikationsmerkmale entsprechend Ihren Wünschen zu ergänzen und anzupassen.
- Folgen Sie den Anweisungen der einzelnen Eingabefenster.
- Bitte überprüfen Sie die getätigten Eingaben.
 - Grün gefärbte Zellen stellen Ausprägungen dar, die für eine additive Fertigung vorausgesetzt werden.

5) Ersatzteildaten eingeben

- Wechseln Sie zum Registerblatt "Dateneingabe".
- Geben Sie eine neue Artikelnummer bzw. Artikelbezeichnung an.
- Wählen Sie aus dem Drop-Down Menü der einzelnen Spalten, jene Merkmalausprägungen aus, die auf das neu angelegte Ersatzteil zutreffen.
- Wechseln Sie zu eventuell vorhandenen zusätzlichen Dateneingabemodulen (z.B. „Lagerbestandswert“ oder „Beschaffungsbedingungen“) und geben Sie die benötigten Daten ein.

6) Analyse durchführen

- Wechseln Sie zum Registerblatt "Start".
- Drücken Sie die Schaltfläche "Analyse durchführen".
- Wählen Sie eine Analyseoption („Einen Artikel analysieren“ od. „Alle Artikel analysieren“) und geben Sie erforderlichenfalls eine Artikelnummer/fortlaufende Nummer an.
- Definieren Sie welche Nachserienversorgungsstrategien in die Analyse miteinbezogen werden sollen.
- Wählen Sie, ob die Eignung für eine mögliche additive Fertigung geprüft werden soll.
- Drücken Sie "Start", um die Ergebnisse der Analyse anzuzeigen.

Abbildung 53: Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools (1)

¹ Strategiebewertung

Für jede der 6 Strategien wird nach folgender Formel ein Punktwert berechnet, der dabei hilft die Eignung der Strategien zu reihen.

$$\text{Strategiebewertung} = \sum_{i=1}^n \text{Merkmalgewichtung}_i \cdot \text{Ausprägungskategorie}_i$$

- n....Anzahl der Klassifikationsmerkmale
- Merkmalgewichtung: ein Wert zwischen 0 und 10 (siehe Registerblatt "Merkmalgewichtung")
- Ausprägungskategorie: 1 oder 2
 - 1....nachteilige Ausprägungen
 - 2....restlichen Ausprägungen

Abbildung 54: Kurzanleitung zur Verwendung des Excel-Tools (2)