

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Linearwirtschaft als derzeit vorherrschendes Prinzip der industriellen Produktion basiert auf der anhaltenden Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt, die abgebaut, zu Produkten verarbeitet und am Ende der Produktnutzung durch den Kunden als Abfall oder Emissionen entsorgt werden (»take-make-dispose pattern«) [ELL13, S. 6; EUR20a, S. 3; RÖH21, S. 8]. Aufgrund begrenzter Ressourcen¹ und einem zu erwartenden Bevölkerungswachstum² einerseits und den Folgen dieses Wirtschaftens andererseits, gilt es, diese Linearität zu überwinden [WIL17, S. 1-2]. Die Folgen der Linearwirtschaft umfassen die miteinander verknüpften und kaskadenartigen Auswirkungen des Klimawandels³, der Umweltverschmutzung⁴ und des Verlusts biologischer Vielfalt⁵, die bereits zu einer »dreifachen planetarischen Krise« ausgewachsen sind [EUR22c, S. 5]. So wird mehr als 90 % des weltweiten Verlusts an biologischer Vielfalt, die Hälfte der Treibhausgasemissionen und ein Drittel der gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub auf die Gewinnung und Verarbeitung natürlicher Ressourcen zurückgeführt [EUR22a, S. 9; UNI20, S. 11].

Die Kreislaufwirtschaft (engl. circular economy) stellt den Gegenentwurf zur Linearwirtschaft dar und zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung zu entkoppeln. Dabei ist die Kreislaufwirtschaft per Legaldefinition »ein Wirtschaftssystem, bei dem der Wert von Produkten, Materialien und anderen Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich erhalten bleibt und ihre effiziente Nutzung in Produktion und Verbrauch verbessert wird, wodurch die Auswirkungen ihrer Nutzung auf die Umwelt reduziert und das Abfallaufkommen sowie die Freisetzung gefährlicher Stoffe in allen Phasen ihres Lebenszyklus minimiert werden, auch durch Anwendung der Abfallhierarchie« [EUR20b, S. 26]. In der Europäischen Union (EU) ist die Transformation zur Kreislaufwirtschaft im »Grünen

¹ Nach Berechnungen des Global Footprint Networks verbraucht die Menschheit bereits heute 75 % mehr Ressourcen als die Ökosysteme des Planeten innerhalb eines Jahres regenerieren [GLO22, S. 1].

² Ausgehend von 7,7 Mrd. Menschen im Jahr 2019 gehen die Prognosen der Vereinten Nationen von einem Wachstum der Weltbevölkerung auf etwa 8,5 Mrd. im Jahr 2030 und etwa 9,7 Mrd. Menschen im Jahr 2050 aus [UNI19, S. 5].

³ Nach Einschätzung des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen wird »die globale Erwärmung von 1,5 °C und 2 °C [...] im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, wenn es in den kommenden Jahrzehnten nicht zu einer tiefgreifenden Verringerung der CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen kommt« [IPC21, S. 14].

⁴ Die Zwischenstaatliche Plattform für Biodiversität und Ökosystemleistungen betont, dass »Treibhausgasemissionen, unbehandelte städtische und ländliche Abfälle, Schadstoffe aus Industrie, Bergbau und Landwirtschaft, Ölpest-Ereignisse und die Verkipfung von Giftstoffen« starke negative Auswirkungen auf die Umwelt haben [IPB19, S. XVII].

⁵ In ihrem Global Assessment Report berichtet die Zwischenstaatliche Plattform für Biodiversität und Ökosystemleistungen, dass die biologische Vielfalt (die Vielfalt innerhalb von Arten zwischen Arten und von Ökosystemen) »schneller als je zuvor in der Geschichte der Menschheit« abnimmt [IPB19, S. XIV]. Dieser negative Trend werde sich fortsetzen und sei eine »Reaktion auf indirekte Triebkräfte wie schnelles Bevölkerungswachstum, Nicht-Nachhaltigkeit von Produktion und Konsum sowie die damit verbundenen technologischen Entwicklungen« [IPB19, S. XIX].

Deal«⁶ verankert und wird u. a. durch die Initiative des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft konkretisiert [EUR19a, S. 8; EUR20c, S. 2-3].

Ansätzen zur Verlängerung der Lebensdauer technischer Produkte kommen bei der Transformation zur Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle zu. Die bedarfsgerechte Versorgung mit Ersatzteilen stellt dabei einen wichtigen Einflussfaktor hinsichtlich Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Primärprodukte⁷ dar [KOL22, S. 894; POT17, S. 5; VDI19a, S. 2]. Ziel ist es, die Ersatzteilversorgung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit sicherzustellen [TOG19, S. 72]. Während der Serienproduktion des Primärprodukts werden in der Regel kostengünstige Ersatzteile im Rahmen der Neuteilproduktion bereitgestellt. Der Zeitraum der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienproduktion bspw. aufgrund bestehender Liefer- bzw. Serviceverpflichtungen oder gesetzlicher Vorgaben⁸ variiert stark in Abhängigkeit von Branche und Nutzungsdauer des Primärprodukts und reicht von wenigen Jahren (z. B. Smartphones) bis hin zu mehreren Jahrzehnten (z. B. Bahntechnik) [BOT03, S. 37; DOM20, S. 59; DOM04, S. 20; KLE19, S. 12].

Herausforderungen der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienproduktion sind u. a. der dringende, schwer prognostizierbare Bedarf über einen langen Versorgungszeitraum, die große und steigende Variantenvielfalt und die damit einhergehenden geringen Bedarfsmengen je Variante, die zeitliche Dynamik des Ersatzteilbedarfs in Abhängigkeit der in Gebrauch befindlichen Primärprodukte sowie die räumliche Verteilung des Bedarfs [IND09, S. 1020-1021; LI17, S. 1498; LOU06, S. 255-256; MIN22, S. 418; SGA21, S. 3]. Daher muss die Ersatzteil-Supply-Chain auf kurzfristige, ungeplante Nachfrage reagieren können und z. B. Kompromisse zwischen Kosten und Lieferzeiten eingehen [DOM20, S. 48; LI17, S. 1500].

Additive Fertigungsverfahren haben das Potenzial, diesen Herausforderungen zu begegnen. Die werkzeuglose Produktion der Ersatzteile auf Basis von CAD-Daten ermöglicht eine wirtschaftliche Produktion kleiner Losgrößen und eine dezentrale Produktion nahe am Ort der Nachfrage. Dadurch werden räumliche und zeitliche Distanzen überbrückt. [BAL13, S. 13; CES19, S. 577; KUM18, S. 18-19] Dies verändert nicht nur das Fertigungsverfahren zur Herstellung der Ersatzteile, sondern wirkt sich auf die Gestaltung der gesamten Ersatzteil-Supply-Chain aus [EME19, S. 17-18; HOF21, S. 32-33; LI19, S. 3622]. [KOL22, S. 894]

⁶ Der europäische Grüne Deal ist »eine neue Wachstumsstrategie, mit der die EU zu einer fairen und wohlhabenden Gesellschaft mit einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft werden soll, in der im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt ist.« [EUR19a, S. 2].

⁷ Ersatzteile sind Sekundärprodukte, die »ausschließlich zur Erhaltung des Primärproduktes« dienen [SCH06a, S. 89].

⁸ Bspw. wird die Dauer der Ersatzteilversorgung nach Ende der Serienproduktion in der »Ökodesign-Richtlinie für energieverbrauchsrelevante Produkte« festgelegt und beträgt z. B. für Waschmaschinen zehn Jahre [EUR19b, S. 298-299]. Die Europäische Kommission plant, die Ökodesign-Richtlinie auf weitere Produktgruppen auszuweiten [EUR22b, S. 1].

1.2 Problemstellung

Die additive Fertigung ermöglicht die bedarfsgerechte und lokale Produktion der Ersatzteile nach Ende der Serienproduktion. Diese additive Ersatzteilversorgung ist gekennzeichnet durch geringe Logistik- und Lagerkosten bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit [HOF21, S. 27; LAC20, S. 134]. Die Dezentralisierung stellt dabei eine der wesentlichen Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Supply Chain dar, siehe Abb. 1 [VEL20a, S. 1291].

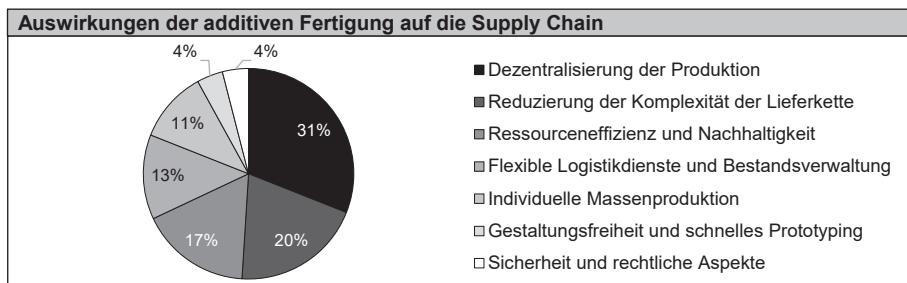


Abb. 1: Die signifikantesten Auswirkungen der additiven Fertigung auf die Supply Chain basierend auf einer Analyse 75 wissenschaftlicher Veröffentlichungen, eig. Darst. i. A. a. [VEL20a, S. 1291]

Der Grad der Dezentralisierung bzw. die Konfiguration der Ersatzteil-Supply-Chain reicht von einem zentralen Einsatz additiver Fertigungsverfahren, z. B. am Standort des Ersatzteilherstellers, bis hin zu einer vollständig dezentralen Produktion der Ersatzteile am Bedarfsort. Nachteilig erweist sich dabei, dass in der zentralen Konfiguration die Vorteile additiver Fertigungsverfahren nicht vollständig zum Tragen kommen und in der dezentralen Konfiguration die Kosten oftmals zu hoch sind bzw. der Bedarf teilweise nicht gegeben ist. [BOG16, S. 228-229; HOL10, S. 692-697; KHA18, S. 1183-1186; LI19, S. 3624]

Eine Alternative stellt die Kombination der Ansätze in Form der Hub-Konfiguration dar, mit der die Vorteile einer zentralen und dezentralen Konfiguration zusammengeführt werden [HOF21, S. 34; IVA19, S. 238; KHA18, S. 1184-1186]. Dazu wird die Anzahl der Verteilpunkte reduziert, wobei Transport- und Lieferzeiten im Vergleich zur zentralen Konfiguration weiterhin geringer ausfallen [HOF21, S. 34; KHA18, S. 1185-1186; MUC18, S. 127-128]. In dieser Konfiguration der Ersatzteil-Supply-Chain werden digitale Fertigungsaufträge an dezentrale Hubs (Verteilpunkte) verschickt, dort die Ersatzteile produziert und an den Bedarfsort geliefert. Ein Hub beliefert einen oder mehrere Kunden. Abb. 2 zeigt eine schematische Übersicht der verschiedenen Konfigurationen einer Ersatzteil-Supply-Chain.

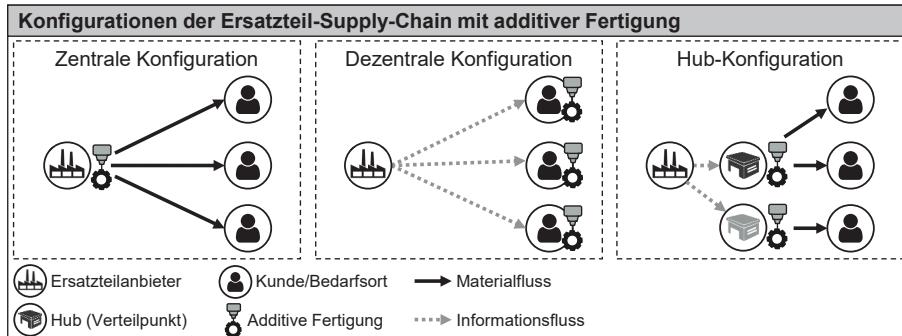


Abb. 2: Schematische Darstellung grundsätzlicher Ersatzteil-Supply-Chain Konfigurationen, eig. Darst. i. A. a. [HOF21, S. 34; HOL10, S. 692-697; KHA18, S. 1184-1186]

Die Gestaltung der Hub-Konfiguration selbst ist u. a. von der Anzahl der einzurichtenden Hubs, deren geografischer Lage sowie deren Verknüpfung mit einem oder mehreren Bedarfsorten abhängig [DOM18, S. 10-11; KHA18, S. 1185]. Die Gestaltung der Ersatzteil-Supply-Chain Konfiguration, die am geeignetsten ist, um den Zielkonflikt zwischen Zeit und Kosten der Ersatzteilversorgung aufzulösen, stellt produzierende Unternehmen aufgrund unternehmensinterner und -externer Einflussfaktoren vor eine schwierige Herausforderung. Zu diesen Einflussfaktoren zählen u. a. Variantenvielfalt, Dauer und Kosten der Herstellung und Transporte sowie deren komplexe Wechselwirkungen [DIR20, S. 2140; EME19, S. 17; HOF21, S. 36]. Die Gestaltung muss vor dem Hintergrund des individuellen Anwendungsfalls ganzheitlich betrachtet und bspw. simulativ untersucht werden [HOF21, S. 36]. Derzeit existiert jedoch kein generisches, übertragbares Vorgehensmodell zur Gestaltung der Ersatzteil-Supply-Chain unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren vor dem Hintergrund ökonomischer und ökologischer Zielgrößen [DIR20, S. 2145; EME19, S. 17].

1.3 Zielsetzung und Fokussierung

Abgeleitet aus der beschriebenen Ausgangssituation und Problemstellung, ist das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit, die Potenziale der additiven Fertigung für die Ersatzteil-Supply-Chain zu untersuchen. Das übergeordnete Ziel lässt sich in drei Teilziele untergliedern, die im Folgenden beschrieben werden, siehe Abb. 3.

Das erste Teilziel besteht in der Entwicklung eines generischen Vorgehensmodells. Der Anwender soll damit von der systematischen Erfassung und Beschreibung der relevanten Elemente über mögliche Einschränkungen hinsichtlich der Gestaltungsfreiheit unterschiedlicher Konfigurationen der Ersatzteil-Supply-Chain bis hin zur Umsetzung unterstützt werden.

Übergeordnetes Ziel und Teilziele der vorliegenden Arbeit	
Ziel	Untersuchung der Potenziale der additiven Fertigung für die Ersatzteil-Supply-Chain
Teilziele	Entwicklung eines generischen Vorgehensmodells zur Erfassung relevanter Einflussfaktoren und deren Ausprägungen
	Entwicklung eines Zielsystems der additiven Ersatzteilversorgung zur Bewertung der Konfiguration der Ersatzteil-Supply-Chain
	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Unterstützung des Planungs- und Entscheidungsprozesses bei der Gestaltung der Nachserienversorgung

Abb. 3: Übersicht der Ziele der vorliegenden Arbeit

Das zweite Teilziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Zielsystems der additiven Ersatzteilversorgung, um die Leistungsfähigkeit der Ersatzteil-Supply-Chain in ihren unterschiedlichen Konfigurationen zu quantifizieren. Dafür sollen Zielgrößen unterschiedlicher Zieldimensionen operationalisiert werden, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Das dritte Teilziel besteht in der Entwicklung eines Simulationsmodells zur Unterstützung des Planungs- und Entscheidungsprozesses bei der Gestaltung der Nachserienversorgung. Als Entscheidungsunterstützungssystem soll die Simulation dazu dienen, auf Basis des Zielsystems und unter Berücksichtigung externer Einflussfaktoren das Systemverhalten unterschiedlicher Konfigurationen der Ersatzteil-Supply-Chain abzubilden. Durch den Vergleich unterschiedlicher Szenarien und deren Interpretation soll eine Übertragung auf das reale System und eine Umsetzung der geeigneten Konfiguration ermöglicht werden.

Eingrenzung des Betrachtungsraums

Zur Fokussierung und thematischen Ausrichtung der vorliegenden Arbeit erfolgt die Eingrenzung des Betrachtungsraums. Die in Tab. 1 dargestellte Morphologie veranschaulicht die Eingrenzung anhand unterschiedlicher Merkmalsausprägungen.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit richten sich an mittlere und große Unternehmen, die vor der Herausforderung stehen, eine langfristige Ersatzteilversorgung für Primärprodukte zu gewährleisten und dazu verschiedene Unternehmensstandorte in diese Aufgabenstellung einbinden. Der Fokus liegt dabei auf der Produktion von Stückgütern in Form von Ersatzteilen sowie deren Transport und Lagerung im Rahmen der Logistik. Die Produktion der Ersatzteile erfolgt dabei mittels additiver Fertigungsverfahren, die der Hauptgruppe Urformen zugeordnet sind. Die Gestaltung und Optimierung der Ersatzteil-Supply-Chain erfolgt simulativ unter Berücksichtigung dynamischer Effekte und ist aufgrund des oftmals langen Versorgungszeitraums eine langfristige strategische Planungsaufgabe. Zur Bewertung einzelner Konfigurationen werden im neu entwickelten Simulationsmodell die ökonomische sowie ökologische Dimension der Nachhaltigkeit berücksichtigt.

1 Einleitung

Tab. 1: Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsraums der vorliegenden Arbeit

Merkmal	Merkmalsausprägung					
Unternehmensgröße [EURO3, S. 39]	Kleinstunternehmen		Kleine Unternehmen		Mittlere Unternehmen	
Unternehmensbereich [VEL20b, S. 6]	Forschung und Entwicklung		Beschaffung		Produktion	
Güterart [HAC10, S. 67]	Produkt		Dienstleistung			Ideelles Gut
Produkt [SCH14, S. 50]	Stückgut		Schüttgut		Fließgut	
Hauptgruppe des Fertigungsverfahrens [DIN22b, S. 9]	Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigenschaft ändern
Modell des Systems [LAW91, S. 4]	Analytisches Modell			Simulationsmodell		
Verwendungszweck d. Simulationsmodells [DRE19, S. 4]	Beschreibung		Erklärung		Gestaltung und Optimierung	
Zeitabhängigkeit des Simulationsmodells [HED13, S. 10]	Statisches System			Dynamisches System		
Ansatz des Simulationsmodells [DRE19, S. 4]	Neuentwicklung		Evaluierung und Adaption		Anwendung des Status Quo	
Planungsebene [ZÄP01, S. 45-48]	Strategische Planung		Taktische Planung		Operative Planung	
Dimensionen der Nachhaltigkeit [KRO19, S. 11-12]	Ökonomische Nachhaltigkeit		Ökologische Nachhaltigkeit		Soziale Nachhaltigkeit	

1.4 Vorgehensweise

Zur Erfüllung der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Zielsetzung ist die vorliegende Arbeit in sieben Kapitel gegliedert. Abb. 4 veranschaulicht den strukturellen Aufbau der Arbeit sowie den systematischen Lösungsweg.

In **Kapitel 1** wird zunächst die Ausgangssituation und die Problemstellung dargestellt und somit der thematische Hintergrund sowie die Ableitung des Handlungsbedarfs aufgezeigt. Aufbauend darauf erfolgen die Beschreibung der Zielsetzung und die Eingrenzung des Betrachtungsraums. Abschließend wird die Vorgehensweise erläutert.

In **Kapitel 2** wird der Stand der Erkenntnisse ausführlich analysiert und die relevanten Grundlagen und Begriffsbestimmungen der einzelnen Themenbereiche beschrieben. Dazu werden in Abschnitt 2.1 die Grundlagen des Ersatzteilmanagements zusammengefasst und insbesondere die Lebenszyklusphasen der Ersatzteilversorgung, die Strategien der Nachserienversorgung und der generische Aufbau einer Ersatzteil-Supply-Chain dargestellt. In Abschnitt 2.2 erfolgt eine Einordnung der additiven Fertigung mit ihren Potenzialen und Hemmnissen sowie eine Beschreibung des Prozessablaufs und der Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Ersatzteilversorgung. Abschnitt 2.3 bildet den Abschluss des Kapitels und

behandelt die Modellbildung und Simulation von Systemen sowie die Durchführung, Verifikation und Validierung von Simulationsstudien. Darüber hinaus werden etablierte Simulationsansätze sowie deren Kombination in der Multimethodensimulation dargestellt.

In **Kapitel 3** wird der Forschungsbedarf mittels eines systematischen Literature Reviews aufgezeigt. Dazu wird in Abschnitt 3.1 zunächst das Vorgehensmodell entwickelt und in Abschnitt 3.2 die Planung des Literature Reviews u. a. durch die Formulierung der Forschungsfrage und der Festlegung der entsprechenden Schlagworte vorgenommen. Aufbauend darauf wird die Identifikation bestehender Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur in Abschnitt 3.3 beschrieben. In Abschnitt 3.4 werden die Ansätze zusammengefasst und gegenübergestellt sowie der Handlungsbedarf abgeleitet. Abschließend werden in Abschnitt 3.5 die Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung definiert.

In **Kapitel 4** erfolgt die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Planung der Nachserienversorgung durch additive Fertigung. Grundlage des Vorgehensmodells ist zunächst die Analyse und Beschreibung der Ersatzteil-Supply-Chain, die in der vorliegenden Arbeit aus einer Kombination von Produktions-, Transport- und Lagermodulen sowie einem peripheren Modul zur Produktionsplanung und -steuerung gebildet wird. Parallel dazu wird in Abschnitt 4.2 die Planung des Ersatzteilbedarfs beschrieben, wobei insbesondere auf Ziel, Zeitraum, Nomenklatur und Methode der Planung eingegangen wird. In Abschnitt 4.3 werden etwaige Restriktionen und Rahmenbedingungen bei der Gestaltung der Ersatzteil-Supply-Chain erörtert. Anschließend wird in Abschnitt 4.4 ein Zielsystem der additiven Ersatzteilversorgung entwickelt, um die Leistungsfähigkeit der Ersatzteil-Supply-Chain zu quantifizieren. In Abschnitt 4.5 wird die Entwicklung des Simulationsmodells beschrieben, dessen Ergebnis ein ausführbares Simulationsmodell der Ersatzteil-Supply-Chain ist. Denkbare Simulationsexperimente werden in Abschnitt 4.6 beschrieben, auf deren Basis ein Vergleich und die Diskussion der simulierten Szenarien in Abschnitt 4.7 möglich ist.

In **Kapitel 5** wird die Vorgehensweise zur Planung der Nachserienversorgung durch additive Fertigung in der industriellen Praxis angewandt. Die industrielle Erprobung und Evaluierung wird am Beispiel eines Herstellers von Prüfständen und Messtechnik für Fahrzeuge und Motoren durchgeführt. Abschließend erfolgt die Bewertung der Vorgehensweise im Hinblick auf die definierten Anforderungen.

In **Kapitel 6** und **Kapitel 7** werden die wesentlichen Inhalte der vorliegenden Arbeit in deutscher und englischer Sprache zusammengefasst und ein Ausblick über zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

1 Einleitung

Einleitung						
Kapitel 1	Abschnitt 1.1	Abschnitt 1.2	Abschnitt 1.3			
Ausgangssituation	Problemstellung	Zielsetzung und Fokussierung	Vorgehensweise			
Kapitel 2 Stand der Erkenntnisse						
Abschnitt 2.1 Ersatzteilmanagement <ul style="list-style-type: none">▪ Ersatzteile▪ Lebenszyklusphasen des Ersatzteilbedarfs▪ Lebenszyklusorientiertes Ersatzteilmanagement▪ Strategien der Nachserienversorgung▪ Ersatzteil-Supply-Chain	Abschnitt 2.2 Additive Fertigung <ul style="list-style-type: none">▪ Begriffsbestimmung u. Einordnung des Fertigungsverfahrens▪ Potenziale und Hemmnisse▪ Prozessablauf▪ Prozesskategorien▪ Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Produktlebenszyklus▪ Additive Fertigung in der Ersatzteileversorgung	Abschnitt 2.3 Simulation <ul style="list-style-type: none">▪ Systembegriff▪ Modelle zur Untersuchung von Systemen▪ Simulation und Simulationsstudien▪ Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen▪ Klassifikation von Simulationsmodellen und Beschreibung etablierter Simulationsansätze				
Kapitel 3 Konkretisierung des Forschungsbedarfs und Anforderungsdefinition						
Abschnitt 3.1 Vorgehensmodell des Literature Reviews	Abschnitt 3.2 Planung des Literature Reviews	Abschnitt 3.3 Durchführung des Literature Reviews	Abschnitt 3.4 Zusammenfassung der Forschungsansätze und Ableitung des Handlungsbedarfs	Abschnitt 3.5 Festlegung der Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell		
Kapitel 4 Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Planung und Bewertung der Ersatzteileversorgung durch additive Fertigung						
Abschnitt 4.1 Planung des Ersatzteilbedarfs <ul style="list-style-type: none">▪ Planungsziel▪ Planungszeitraum▪ Planungsnomenklatur▪ Planungsmethode	Abschnitt 4.2 Analyse und Beschreibung der Ersatzteil-Supply-Chain <ul style="list-style-type: none">▪ Produktionsmodule▪ Transportmodule▪ Lagermodule▪ Peripheres PPS-Modul	Abschnitt 4.3 Restriktionen und Rahmenbedingungen <ul style="list-style-type: none">▪ Rechtlich▪ Wirtschaftlich▪ Technisch	Abschnitt 4.4 Entwicklung des Zielsystems der additiven Ersatzteileversorgung	Abschnitt 4.5 Simulationsmodellentwicklung (»Modellimplementierung«)	Abschnitt 4.6 Simulationsexperimente (»Erkenntnisgewinn«)	Abschnitt 4.7 Vergleich und Diskussion der Szenarien
Kapitel 5 Industrielle Erprobung und Evaluierung						
Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick						
Kapitel 7 Summary and Outlook						

Abb. 4: Struktureller Aufbau der Arbeit