

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die dreifache planetarische Krise aus Klimawandel, Verlust der biologischen Vielfalt und Umweltverschmutzung bedroht zunehmend die Zukunft der Gesellschaft [UNI24, S. 47]. Eine zentrale Ursache dieser Entwicklungen liegt in der gegenwärtigen Form der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen, die nach Schätzungen des International Resource Panel der Vereinten Nationen über 55 % der weltweiten Treibhausgasemissionen, rund 40 % der Luftverschmutzung und mehr als 90 % des globalen Biodiversitätsverlusts verursacht [UNI24, S. 51; OBE20, S. 68]. In Deutschland entfallen fast ein Viertel der Treibhausgasemissionen auf den Industriesektor, wobei etwa die Hälfte davon allein durch die Produktion von Stahl, Beton, Zement und Kunststoffen verursacht wird [SHA23, S. 8]. Parallel dazu steigt der globale Rohstoffbedarf infolge des Bevölkerungswachstums und wachsender Lebensstandards kontinuierlich an. So nahm die weltweite Rohstoffgewinnung zwischen 1970 und 2024 von rund 30 auf 106,6 Milliarden Tonnen zu. Im gleichen Zeitraum erhöhte sich der durchschnittliche Pro-Kopf-Rohstoffbedarf von 8,4 auf 13,2 Tonnen [UNI24, S. 18].

Vor diesem Hintergrund gewinnt der Übergang zu einer ressourcenschonenden und zirkulären Wirtschaft zunehmend an Bedeutung. Die Kreislaufwirtschaft bietet hierbei einen vielversprechenden Ansatz. Dabei sollen Wirtschaftswachstum und Ressourcennutzung entkoppelt werden, um den Verbrauch von Rohstoffen zu reduzieren, Abfälle zu vermeiden und Umweltbelastungen zu minimieren. Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, die Produkte möglichst lange im Kreislauf zu führen, um die in der Herstellung investierten Ressourcen zu bewahren und neue Wertschöpfungspotenziale zu erschließen [RUS19, S. 2; ELL13, S. 7; PRE12, S. 2].

In diesem Kontext stellt das Remanufacturing eine zentrale Strategie der Kreislaufwirtschaft dar. Durch die Ermöglichung eines neuen Produktlebenszyklus lassen sich bei dieser Strategie erhebliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen erzielen. Abbildung 1 zeigt ausgewählte Ergebnisse aus drei durchgeführten Ökobilanzierungen verschiedener Remanufacturing-Fallstudien. Die Einsparungen an Treibhausgasemissionen wurden dabei anhand des globalen Erwärmungspotenzials, engl. Global Warming Potential (GWP), bewertet. Die Analysen zeigen eine Reduktion des GWP um etwa 50 % bis 90 % im Vergleich zur Neuteileproduktion. [GRO23, S. 910; LIU16, S. 1032; LEE23, S. 202]

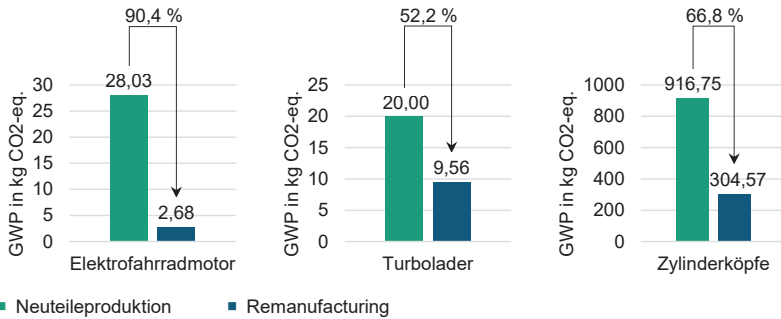


Abb. 1: Treibhausgaseinsparungen durch Remanufacturing im Vergleich zur Neuteileproduktion, eig. Darst. i. A. a. [GRO23, S. 910; LIU16, S. 1032; LEE23, S. 202]

Für den wirtschaftlichen Betrieb eines Remanufacturing-Unternehmens stellt die zuverlässige Versorgung von Gebrauchtteilen als auch erforderlichen Neuteilen eine zentrale Voraussetzung dar [STE93, S. 122]. Die Komplexität bei der Sicherstellung der benötigten Gebrauch- und Neuteile ergibt sich dabei aus der Vielzahl unterschiedlicher Akteure innerhalb einer dezentral organisierten und mehrstufigen Lieferkette [GUI09, S. 12; BAR13, S. 5]. Erschwerend kommt hinzu, dass bestimmte Komponenten, die für die Herstellung eines Remanufacturing-Produkts benötigt werden, infolge eingestellter Produktion, Beendigung gesetzlicher Vorgaben zur Ersatzteilverfügbarkeit oder Veränderungen im Produktportfolio nur eingeschränkt oder ausschließlich durch die Rücknahme von Gebrauchtteilen sichergestellt werden können [GRO23, S. 904]. Daher ist ein effizientes Bestandsmanagement erforderlich, um eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen und die Nachfrage nach Remanufacturing-Produkten zuverlässig bedienen zu können [NAS06, S. 16].

1.2 Problemstellung

Um die Nachfrage an Remanufacturing-Produkten in einem bestimmten Zeitraum zu decken, verwenden Remanufacturing-Unternehmen primär Gebrauchtteile, die über den Markt bezogen werden können [MA16, S. 1]. Zusätzlich werden Neuteile eingesetzt, um Verschleißteile auszutauschen oder nicht mehr aufarbeitbare Komponenten zu ersetzen [STE93, S. 133]. Dabei wird die erforderliche Menge an Neuteilen in der Regel bereits vor dem tatsächlichen Eingang der Gebrauchtteile festgelegt, um notwendige Vorlaufzeiten im Einkauf zu berücksichtigen [KUR18, S. 3230–3231]. Abbildung 2 zeigt einen schematischen zeitlichen Ablauf der Beschaffung von Gebrauch- und Neuteilen im Remanufacturing.

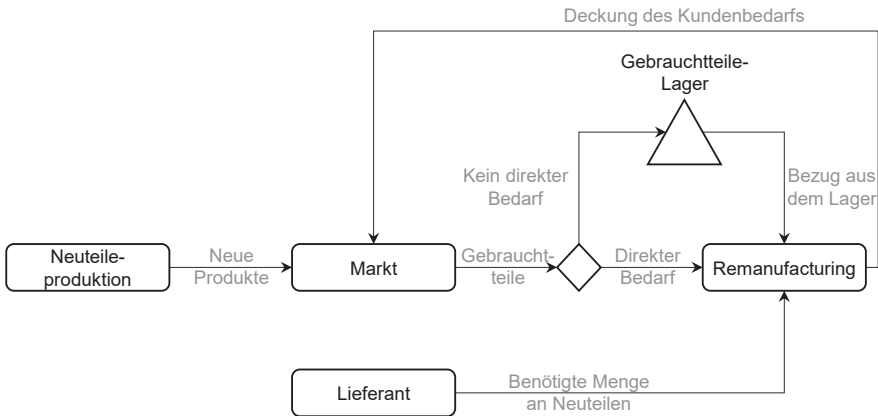


Abb. 2: Schematischer Ablauf der Beschaffung von Gebraucht- und Neuteilen im Remanufacturing, eig. Darst. i. A. a. [MA16, S. 2; CLO12, S. 592]

Die Bestimmung des Neuteilebedarfs erfolgt auf Basis der prognostizierten Mengen und Zustände der Komponenten der vom Markt zurückgeführten Gebrauchtteile sowie auf der Verfügbarkeit von als funktionsfähig klassifizierten Komponenten der Gebrauchtteile im Lager. Die tatsächlichen Werte können nämlich erst bei der Ankunft dieser im Wareneingang bzw. sukzessive im Verlauf des Remanufacturing-Prozesses festgestellt werden [KAM19, S. 285]¹. Der Bedarf an Neuteilen kann dabei durch die Gleichung (1-1) ausgedrückt werden:

$$D_t^n = m^r \cdot D_t^r - \sum_{k=1}^K m_k^g \cdot E\{U_{tk}\} \cdot E\{W_t\} - E\{I_{t-1}\} \quad (1-1)$$

mit:

D_t^n = Bedarf an Neuteilen in Periode t

D_t^r = Kundenbedarf an Remanufacturing-Produkten in Periode t

U_{tk} = Rücknahmemenge des Gebrauchtteils k in Periode t

W_t = Verwertungsquote in Periode t

K = Anzahl unterschiedlicher Gebrauchtteile, deren Komponenten m zur Deckung des Kundenbedarfs D_t^r genutzt werden

m_k^g = Anzahl potenziell verwertbarer Komponenten pro Gebrauchtteil k

m^r = Anzahl benötigter Komponenten pro Remanufacturing-Produkt

I_t = Disponibler Lagerbestand am Ende der Periode t

Die Rücknahme der Gebrauchtteile ist dabei in den meisten Fällen nicht direkt durch Remanufacturing-Unternehmen beeinflussbar. Unter anderem wirken unterschiedliche Nutzungsmuster und Umwelteinflüsse auf die Gebrauchtteile ein, was kurzfristige, sai-

¹Im Folgenden wird in dieser Arbeit zur besseren Lesbarkeit in Bezug auf den Zustand der einzelnen Komponenten eines Gebrauchtteils nur noch vom Zustand des Gebrauchtteils gesprochen.

sonale sowie mittel- bis langfristige Schwankungen in Rücknahmemenge und Zustand verursachen kann und letztlich zu Unsicherheiten in den Prognosen führt [GUI00, S. 468; KUR18, S. 3230]. Diese Unsicherheiten können dazu führen, dass die benötigte Menge an Neuteilen nicht korrekt bestimmt werden kann, wodurch Komponenten für die Herstellung von Remanufacturing-Produkten fehlen und infolgedessen Störungen im Remanufacturing-Prozess auftreten [KAM19, S. 284].

Aufgrund der Unsicherheit bei der Beschaffung von Gebrauchtteilen gestaltet sich die bedarfsgerechte Versorgung mit Gebraucht- und Neuteilen im Remanufacturing schwierig [STE93, S. 143–144]. Während sich in der Neuteileproduktion die Bedeutung logistischer und wirtschaftlicher Ziele von operativen hin zu marktbezogenen Zielgrößen verschiebt, d. h. Liefertreue und Lieferzeit stehen im Vordergrund bei gleichzeitig niedrigen Lagerbeständen [WIE19, S. 246], kann eine ähnliche Ausrichtung auf Bestandsminimierung im Remanufacturing aufgrund der schwer und in unregelmäßigen Abständen zu beschaffenden Gebrauchtteile zu Engpässen und somit zu einer Verschlechterung der Lieferzeit und -treue führen [STE93, S. 254]. Um eine hohe Kundenzufriedenheit gewährleisten zu können, werden in der Praxis daher proaktiv Überkapazitäten bei Produktionsressourcen und Lagerbeständen für Gebraucht- und Neuteile zur Sicherstellung eines hohen Lieferservices eingeplant [GUI00, S. 476; KAM19, S. 284; KUR18, S. 3231]. Allerdings bedeuten die eingeplanten Überkapazitäten der Ressourcen und Lagerbestände gleichzeitig Ineffizienzen des Remanufacturing-Systems und beeinträchtigen somit direkt die Profitabilität des Unternehmens.

Die Profitabilität des Remanufacturing hängt daher von einem effizienten Bestandsmanagement ab, um den Kundenbedarf an Remanufacturing-Produkten durch die optimale Kombination von Gebraucht- und Neuteilen zu erfüllen [FER01, S. 115; GUI00, S. 472]. Heutige Bestandsmanagementsysteme sind jedoch auf die Produktion von neuen Produkten ausgelegt, basieren auf deterministischen Informationen und sind daher nur eingeschränkt in der Lage, mit den Unsicherheiten und den daraus resultierenden kurzen Planungshorizonten im Remanufacturing umzugehen [KUR18, S. 3231; LAG16, S. 220].

1.3 Zielsetzung und Abgrenzung

Ausgehend von der beschriebenen Ausgangssituation und Problemstellung verfolgt die vorliegende Arbeit das übergeordnete Ziel, das Bestandsmanagement von Neuteilen im Remanufacturing zu optimieren. Dieses Ziel wird in zwei Teilziele untergliedert, die nachfolgend näher erläutert werden, siehe Abbildung 3.

Ziel	Optimierung des Bestandsmanagements von Neuteilen im Remanufacturing
Teilziele	Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bedarfsbestimmung von Neuteilen
	Entwicklung eines Modells für die Bestellmengenplanung von Neuteilen

Abb. 3: Übersicht des übergeordneten Ziels und der Teilziele

Das erste Teilziel besteht in der Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Bedarfsbestimmung von Neuteilen im Remanufacturing. Dabei werden insbesondere die Unsicherheiten hinsichtlich der Rücknahmemengen sowie des Zustands der zurückgeführten Gebrauchtteile explizit berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird ein standardisierter Prozess entwickelt, der auf datengetriebenen Modellen basiert und Prognosen über Rücknahmemengen und Zustände der Gebrauchtteile auf Komponentenebene ermöglicht.

Das zweite Teilziel zielt darauf ab, ein Modell für die Bestellmengenplanung von Neuteilen im Remanufacturing zu entwickeln. Dieses Modell soll die konkreten Bestellmengen und -zeitpunkte unter Berücksichtigung der geplanten Nachfrage an Remanufacturing-Produkten, der prognostizierten Rücknahmemengen und des Zustands der Gebrauchtteile bestimmen. Zudem ist es das Ziel, dass das Modell flexibel auf unsicherheitsbedingte Abweichungen reagiert, um eine hohe Lieferfähigkeit bei möglichst geringen Kosten zu gewährleisten. Schließlich soll eine Integration des Modells in die im ersten Teilziel entwickelte Vorgehensweise erfolgen.

Zur weiteren Präzisierung der vorliegenden Arbeit wurde der Betrachtungsrahmen mithilfe eines morphologischen Kastens eingegrenzt, siehe Tabelle 1. Dabei sind die in dieser Arbeit relevanten Merkmalsausprägungen grau hinterlegt. Diese Eingrenzung unterstützt die thematische Fokussierung und die Ausrichtung des Stands der Technik in Kapitel 2.

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

Merkmal	Merkmalsausprägung				
Industriesektoren [PAR15, S. 44]	Fahrzeugbau	Maschinenbau	Medizintechnik	Möbelindustrie	Elektrotechnik
Produktionssystem [WEI15, S. 8]	Hybrides Remanufacturing		Remanufacturing		
Güterart [HAC10, S. 67]	Produkt		Dienstleistung		Ideeles Gut
Unternehmensbereich [VEL20, S. 6]	Forschung und Entwicklung	Beschaffung	Produktion	Logistik	Vertrieb
Produktart [STE93, S. 122]	Neues Produkt		Neuteile		Gebrauchtteile
Modell des Systems [LAW13, S. 5]	Analytisches Modell			Simulationsmodell	
Planungsebene [RIZ20, S. 2]	Strategische Planung		Taktische Planung		Operative Planung
Produktlebenszyklus [STE93, S. 130–131]	Einführung	Wachstum	Reife	Sättigung	Degeneration
Bewertungsdimension [KRO19, S. 11–12]	Ökonomisch		Ökologisch		Sozial
Zielkonflikte [SCH13, S. 22]	Bestände		Lieferservice		Durchsatz

Die Untersuchungen dieser Arbeit richten sich vorrangig an Remanufacturing-Unternehmen im Fahrzeugbau, insbesondere in den Bereichen Automobil, Nutzfahrzeuge, Zweirad und Schienenverkehr, die vor der Herausforderung stehen, den Kundenbedarf durch die Produktion von Remanufacturing-Produkten unter Verwendung von Gebraucht- und Neuteilen zu decken. Innerhalb dieses Rahmens konzentriert sich die Untersuchung im Bereich des Bestandsmanagements auf die Beschaffung benötigter Neuteile für das Remanufacturing. Die Optimierung des Bestandsmanagements erfolgt durch ein analytisches Modell und wird als taktische Planungsaufgabe im Kontext eines mittelfristigen Planungshorizonts betrachtet. Die entwickelte Vorgehensweise ist insbesondere auf Produkte ausgerichtet, die bereits einen höheren Reifegrad erreicht haben und die aufgrund von Ausfällen oder Verschleiß eine Nachfrage nach Remanufacturing-Produkten generieren. Zur Bewertung der entwickelten Vorgehensweise wird primär die ökonomische Dimension, unter der Berücksichtigung des Servicegrades und der Lagerbestände, herangezogen.

1.4 Vorgehensweise

Zur Umsetzung der in Abschnitt 1.3 formulierten Zielsetzung ist die vorliegende Arbeit in sieben Kapitel gegliedert. Abbildung 4 veranschaulicht den strukturellen Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 1, in dem zunächst die Ausgangssituation und die zugrunde liegende Problemstellung dargestellt werden, erfolgt die Herleitung des thematischen Hintergrunds sowie die Ableitung des Handlungsbedarfs. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die Zielsetzung der Arbeit beschrieben und der Betrachtungsraum eingegrenzt.

In Kapitel 2 schließt sich eine umfassende Analyse des aktuellen Stands der Erkenntnisse an, ergänzt um die Darstellung relevanter theoretischer Grundlagen und Begriffsbestimmungen der einzelnen Themenbereiche. Abschnitt 2.1 fasst die Grundlagen des Remanufacturing zusammen, wobei insbesondere die Unsicherheiten in Bezug auf Rücknahmemengen und den Zustand von Gebrauchteilen sowie mögliche Einflussfaktoren thematisiert werden. Abschnitt 2.2 ordnet das Bestandsmanagement im Kontext des Remanufacturing ein, insbesondere im Hinblick auf die Bedarfsplanung und Bestandssteuerung.

In Kapitel 3 wird der Forschungsbedarf auf Grundlage einer systematischen Literaturanalyse ermittelt. Abschnitt 3.1 beschreibt hierzu zunächst die zugrunde liegende Vorgehensweise, einschließlich der Formulierung der Forschungsfrage sowie der Festlegung der relevanten Suchbegriffe. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 3.2 die Identifikation bestehender Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur. In Abschnitt 3.3 werden diese Ansätze zusammengefasst, einander gegenübergestellt und daraus der spezifische Handlungsbedarf abgeleitet. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die Anforderungen an die zu entwickelnde Vorgehensweise definiert.

In Kapitel 4 wird eine Vorgehensweise zur Optimierung des Bestandsmanagements im Remanufacturing entwickelt, bestehend aus sieben aufeinanderfolgenden Schritten. Ausgangspunkt ist die Definition der Rahmenbedingungen in Abschnitt 4.1, beginnend mit der Festlegung des Planungsobjekts sowie des zeitlichen Planungshorizonts. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 4.2 eine Datenanalyse, in deren Rahmen verfügbare Datenquellen identifiziert, potenziell relevante Einflussgrößen explorativ untersucht und geeignete Merkmale für die anschließende Prognose abgeleitet werden. In Abschnitt 4.3 werden die Rohdaten transformiert und in eine konsistente, modellkompatible Struktur überführt, welche die Grundlage für die Anwendung datengetriebener Prognosemodelle in Abschnitt 4.4 bildet. Die erstellten Prognosemodelle werden in Abschnitt 4.5 anhand geeigneter Fehlermetriken bewertet. Diese Evaluation dient als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der leistungsfähigsten Modelle, deren Ergebnisse in ein stochastisches Optimierungsmodell zur Bestellmengenplanung in Abschnitt 4.6 integriert werden. Abschließend werden die Resultate der Bestellmengenplanung in Abschnitt 4.7 mittels einer containerisierten Microservice-Architektur bereitgestellt und in einem überwachungs-basierten Regelkreis implementiert.

In Kapitel 5 wird die entwickelte Vorgehensweise zur Optimierung des Bestandsmanagements in der industriellen Praxis erprobt. Die industrielle Anwendung und Evaluierung erfolgen am Beispiel eines Herstellers und Remanufacturers mechatronischer Komponenten und Systeme. Abschließend wird die Vorgehensweise im Hinblick auf die zuvor definierten Anforderungen bewertet.

1 Einleitung

Kapitel 6 und Kapitel 7 fassen die zentralen Inhalte der Arbeit in deutscher bzw. englischer Sprache zusammen und geben einen Ausblick auf potenziellen zukünftigen Forschungsbedarf.

Kapitel 1		Einleitung			
Abschnitt 1.1 Ausgangssituation		Abschnitt 1.2 Problemstellung		Abschnitt 1.3 Zielsetzung und Abgrenzung	
				Abschnitt 1.4 Vorgehensweise	
Kapitel 2		Stand der Erkenntnisse			
Abschnitt 2.1 Grundlagen des Remanufacturing				Abschnitt 2.2 Grundlagen des Bestandsmanagements im Remanufacturing	
Kapitel 3		Konkretisierung des Forschungsbedarfs			
Abschnitt 3.1 Vorgehensweise der Literaturanalyse		Abschnitt 3.2 Zusammenfassung der Forschungsansätze		Abschnitt 3.3 Ableitung des Forschungsbedarfs	
				Abschnitt 3.4 Anforderungen an die Vorgehensweise	
Kapitel 4		Entwicklung einer Vorgehensweise zur Optimierung des Bestandsmanagements			
Abschnitt 4.1 Geschäftsverständnis		Abschnitt 4.2 Datenverständnis		Abschnitt 4.3 Datenaufbereitung	
				Abschnitt 4.4 Datenmodellierung	
Abschnitt 4.5 Evaluierung		Abschnitt 4.6 Bestellmengenplanung		Abschnitt 4.7 Bereitstellung	
Kapitel 5		Industrielle Erprobung und Evaluierung			
Abschnitt 5.1 Geschäftsverständnis		Abschnitt 5.2 Datenverständnis		Abschnitt 5.3 Datenaufbereitung	
				Abschnitt 5.4 Datenmodellierung	
Abschnitt 5.5 Evaluierung		Abschnitt 5.6 Bestellmengenplanung		Abschnitt 5.7 Evaluierung der Anforderungen	
Kapitel 6		Zusammenfassung und Ausblick			
Kapitel 7		Summary and Outlook			

Abb. 4: Struktureller Aufbau der Arbeit