

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Felix Klenk

**Transparenzsteigerung in der
Rückführungslogistik zur Verbesserung
der Materialbedarfsplanung
für das Remanufacturing**

Band 272

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Felix Klenk

**Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur
Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das
Remanufacturing**

Band 272

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Felix Klenk, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2023

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9264-6

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des von der Europäischen Union unter dem *Horizon2020*-Framework geförderten Forschungsprojekts “DigiPrime - Digital Platform for Circular Economy in Cross-sectorial Sustainable Value Networks“ (Projektnummer 873111).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza als Hauptreferentin für ihr Vertrauen und ihre fachliche und persönliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) des KIT danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of New South Wales (UNSW) in Sydney, Australien. Ebenso gilt mein Dank Prof. Sami Kara der School of Mechanical & Manufacturing Engineering für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Für die gute Atmosphäre am und außerhalb des Instituts danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich Produktionssysteme. Für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanke ich mich vor allem bei Julia Dvorak, Kevin Gleich, Jan-Philipp Kaiser, Magnus Kandler, Michael Martin, Sina Peukert sowie zusätzlich für das Korrekturlesen dieser Arbeit Rainer Silbernagel und Marco Wurster. Mein besonderer Dank gilt zudem allen Studierenden, die mit großem Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Zudem möchte ich besonders meinen Eltern Ute und Thomas und meinen Geschwistern Lena, Florian und Lukas für ihre kontinuierliche Unterstützung und ihren steten Rückhalt danken. Abschließend gilt mein Dank Selina für ihr Vertrauen, ihre Energie und ihr Verständnis, die entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Karlsruhe, September 2023

Felix Klenk

Abstract

Motivated by increasing resource consumption and the associated pushing of the limits of the linear *take-make-use-dispose* mentality, innovative production patterns such as the circular economy are required. Remanufacturing plays a central role in this, with reverse logistics responsible for supplying the latter with used products. Despite considerable potential for savings, however, implementation is still in its infancy due to a variety of challenges. These include, among others, the efficient exchange of information with involved actors in reverse logistics and the subsequent use of the information to optimize remanufacturing. Using the example of material requirements planning, i. e., the supply of remanufacturing with necessary new components, the work at hand develops a method for increasing transparency in reverse logistics to optimize this very process. In addition to the modeling of the material and information flow, a concept of instance-specific, dynamic regeneration rates is developed, as well as the design of real-time capable order policies that use these as input and dynamically adjust the order quantity and time per planning period. In addition, the *Wagner-Whitin* method is integrated as a deterministic benchmark algorithm. The implementation of the developed models is achieved by means of a simulation-based optimization for the identification of cause-effect relationships as well as a utility analysis and the PROMETHEE-method for the derivation of application-specific recommendations for action. The developed method is prototypically validated and tested on the example of the *automotive aftermarket*. Using different unit count scenarios and degrees of information exchange, it is shown that order policies with a variable order quantity, e. g., (t,S)- and (s,S)-policy as well as the SM-heuristic show the best results regarding the analyzed performance indicators. The insensitivity intervals derived from the PROMETHEE-method also show that the identified solutions are mostly very robust against changes in the decision preferences. Future research should focus on the utility of product-specific information for further planning and control tasks and the design of integrated linear and circular value chains.

Kurzfassung

Motiviert durch einen steigenden Ressourcenverbrauch und des damit einhergehenden Erreichens der Grenzen der linearen *Take-Make-Use-Dispose*-Mentalität sind innovative Produktionsmuster wie die Kreislaufwirtschaft erforderlich. Das Remanufacturing spielt hierin eine zentrale Rolle, wobei die Rückführungslogistik für die Versorgung dessen mit Gebrauchsgüterprodukten (sog. Cores) zuständig ist. Trotz erheblicher Einsparpotentiale steht die Umsetzung aufgrund vielfältiger Herausforderungen jedoch erst am Anfang. Hierzu gehören u. a. der effiziente Informationsaustausch mit beteiligten Akteuren in der Rückführungslogistik und die anschließende Nutzung der Informationen, um das Remanufacturing zu optimieren. Am Beispiel der Materialbedarfsplanung, d. h. der Versorgung des Remanufacturings mit notwendigen Neukomponenten, entwickelt die vorliegende Arbeit eine Methode zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Optimierung ebendieser. Neben der Modellierung des Material- und Informationsflusses erfolgt hierzu die Erarbeitung eines Konzepts instanzindividueller, dynamischer Regenerationsraten sowie die Gestaltung echtzeitfähiger Bestellpolitiken, die diese als Input verwenden und je Planungsperiode die Bestellmenge und den -zeitpunkt dynamisch anpassen. Zusätzlich wird das *Wagner-Whitin*-Verfahren als deterministischer Benchmark-Algorithmus integriert. Mittels Implementierung in einer simulationsbasierten Optimierung zur Identifikation von Wirkzusammenhängen sowie einer Nutzwertanalyse und der PROMETHEE-Methode zur Ableitung anwendungsspezifischer Handlungsempfehlungen erfolgt die Umsetzung der entwickelten Modelle. Die entwickelte Methode wird am Beispiel des *Automotive Aftermarkets* prototypisch validiert und erprobt. Anhand unterschiedlicher Stückzahlenszenarien und Graden des Informationsaustauschs wird gezeigt, dass diejenigen Bestellpolitiken mit einer variablen Bestellmenge, d. h. die (t,S)- und (s,S)-Politik sowie die SM-Heuristik die besten Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten Kennzahlen liefern. Die mit Hilfe der PROMETHEE-Methode abgeleiteten Insensitivitätsintervalle zeigen außerdem, dass die ermittelten Lösungen größtenteils sehr robust gegenüber Veränderungen in den Entscheidungspräferenzen sind. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten den Nutzen der produktspezifischen Informationen für weitere Planungs- und Steuerungsaufgaben sowie die Gestaltung integriert linearer und zirkulärer Wertschöpfungsketten fokussieren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Herausforderungen	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Materialbedarfsplanung im Remanufacturing	6
2.1.1 Definition Remanufacturing	6
2.1.2 Akteure und Aufgaben in der Rückführungslogistik	9
2.1.3 Materialbedarfsplanung	14
2.2 Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken	20
2.2.1 Definition und Merkmale von Informationen	21
2.2.2 Informations- und Kommunikationstechnik	23
2.2.3 Informationsaustausch in der Rückführungslogistik	24
2.3 Simulationsbasierte Optimierung	26
2.3.1 Begriffsdefinitionen	26
2.3.2 Kopplung von Simulation und Optimierung	32
2.3.3 Simulationsstudien und statistische Versuchsplanung	34
3 Stand der Forschung	37
3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz	37
3.2 Bewertung bestehender Forschungsansätze	39
3.2.1 Ansätze für die Materialbedarfsplanung im Remanufacturing	39
3.2.2 Ansätze über den Nutzen von Informationen in Netzwerken	44
3.2.3 Ansätze zur simulationsbasierten Optimierung in der Rückführungslogistik	51
3.3 Ableitung des Forschungsdefizits	52
4 Überblick über den Lösungsansatz	56
5 Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik	59

5.1	Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik	59
5.1.1	Identifikation von Core-Quellen und Ableitung von Materialflüssen . . .	59
5.1.2	Wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik	61
5.1.3	Modellierung der Elemente in der Rückführungslogistik	65
5.2	Modellierung des Informationsaustauschs in der Rückführungslogistik	69
5.2.1	Identifikation produktspezifischer Informationen	70
5.2.2	Ableitung eines Rezeptormodells	73
5.2.3	Modellierung des Informationsagenten	77
5.3	Modellierung der Materialbedarfsplanung	79
5.3.1	Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten	79
5.3.2	Modellierung von Bestellpolitiken	84
5.3.3	Entwicklung eines Kennzahlensystems	88
5.4	Simulationsbasiertes Optimierungsmodell	93
5.4.1	Aufbau des Simulationsmodells für den Material- und Informationsfluss	93
5.4.2	Aufbau des Optimierungsmodells für die Materialbedarfsplanung	95
5.4.3	Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung	98
5.4.4	Statistische Versuchsplanung	100
5.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen	105
6	Erprobung des Lösungsansatzes	109
6.1	Modellierung des Materialflusses	109
6.2	Modellierung des Informationsaustauschs	111
6.3	Modellierung der Materialbedarfsplanung	114
6.4	Simulationsbasierte Optimierung im Anwendungsfall	117
6.4.1	Variierender Informationsvektor	118
6.4.2	Benchmark-Läufe	135
6.4.3	Konstanter Informationsvektor	140
6.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen	142
7	Diskussion und Ausblick	149
7.1	Diskussion und kritische Würdigung	149
7.2	Ausblick	153
8	Zusammenfassung	156
	Literaturverzeichnis	159
	Abbildungsverzeichnis	187

Tabellenverzeichnis	191
Liste eigener Veröffentlichungen	193
Anhang	XII
A1 Interviewleitfaden und weiterführende Informationen zur Modellierung des Materialflusses	XII
A2 Geschäftsprozesse zur Gestaltung und Steuerung von Core-Rückflüssen	XVI
A3 Ergänzende Elemente der modellierten Rückführungslogistik	XXIII
A4 Interviewleitfaden und weiterführende Informationen zur Modellierung des Informationsaustauschs . . . . .	.XXVIII
A5 Erweiterungen des Rezeptormodells	XXXIV
A6 Daten zur Modellierung des Materialflusses im Anwendungsfall	XXXVII
A7 Kurvenschar der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Beta-Binomialverteilung	XXXIX
A8 Modellierung der Ankünfte von Cores und Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten	XLI
A9 Verteilung der Läufe der simulationsbasierten Optimierung auf die verschiedenen Szenarien	XLII
A10 Weitere Auswertungen der Steuerfaktoren	XLIII
A11 Ergänzende Informationen zur Nutzwertanalyse und PROMETHEE-Methode	XLVII

Abkürzungsverzeichnis

Akronym	Bedeutung
AA	Automobil-Ersatzteilmarkt, engl. "Automotive Aftermarket"
BDD	Blockdefinitionsdiagramm
BL	Benchmark-Läufe der simulationsbasierten Optimierung inkl. Wagner-Whitin-Verfahren
CE	Kreislaufwirtschaft, engl. "Circular Economy"
CLSC	Geschlossene Lieferkette, engl. "Closed-loop Supply Chain"
CPLC	Zirkulärer Produktlebenszyklus, engl. "Circular Product Life Cycle"
CR	Vertragsgebundenes Remanufacturing, engl. "Contracted Remanufacturing"
CSR	Gesellschaftliche Unternehmensverantwortung, engl. "Corporate Social Responsibility"
DoE	Statistische Versuchsplanung, engl. "Design of Experiments"
ECU	Steuergerät, engl. "Electronic Control Unit"
ELV	Gebrauchtfahrzeug, engl. "End-of-Life Vehicle"
EoL	Gebrauchtprodukt, engl. "End-of-Life"-Produkt
EOQ	Klassisches Losgrößenmodell bzw. Bestellmengenplanung, engl. "Economic Order Quantity"
ERP	Enterprise Resource Planning
EU	Europäische Union
GPN	Globales Produktionsnetzwerk
IAM	Unabhängige Werkstätten, engl. "Independent Aftermarket"
IBD	Internes Blockdiagramm
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IR	Unabhängiges Remanufacturing, engl. "Independent Remanufacturing"
Kfz	Kraftfahrzeug
kl	Simulationsbasierte Optimierungsläufe mit einem konstanten Informationsvektor
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell, engl. "Mixed-Integer Linear Programming"
MRP	Materialbedarfsplanung, engl. "Material Requirements Planning"

Akronym	Bedeutung
NUTS	Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik, original: "Nomenclature des Unités Territoriales Staistiques"
OEM	Original Equipment Manufacturer
OER	Originalhersteller-Remanufacturing, engl. "Original Equipment Remanufacturing"
OES	Markengebundene Servicewerkstätten, engl. "Original Equipment Service"
PD	Profildigramm
PROMETHEE	Multikriterielle Entscheidungsunterstützung, engl. "Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation"
RBoM	Reverse Stückliste, engl. "Reverse Bill of Materials"
RFID	Radio-Frequency Identification
RL	Rückführungslogistik, engl. "Reverse Logistics"
RSC	Rückwärtslieferketten, engl. "Reverse Supply Chain"
SCM	Supply Chain Management
SFD	Raumfüllende Versuchspläne, engl. "Space-Filling-Designs"
SM	<i>Silver Meal</i> -Heuristik
SysML	Systemmodellierungssprache, engl. "Systems Modeling Language"
TMS	Transportmanagement-System
UML	Vereinheitlichte Modellierungssprache, engl. "Unified Modeling Language"
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
vi	Simulationsbasierte Optimierungsläufe mit einem variierenden Informationsvektor
VIN	Fahrzeugidentifikationsnummer, engl. "Vehicle Identification Number"
WEEE	Abfall von elektrischen und elektronischen Geräten, engl. "Waste from Electrical and Electronic Equipment"
WMS	Lagerverwaltungssystem, engl. "Warehouse Management System"
WSN	Wertschöpfungsnetzwerk
WW	<i>Wagner-Whitin</i> -Modell

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
A	Wohlstand (engl. "Affluence")
a	Sicherheitsfaktor
a_{kom}	Sicherheitsfaktor der Komponente $kom \in Kom$
α	Parameter der Beta-Binomialverteilung
$Anz_{aufg, kom}$	Anzahl aufgearbeiteter Komponenten $kom \in Kom$
$Anz_{bestell, kom}$	Anzahl Bestellungen je Komponenten $kom \in Kom$
$Anz_{co, i}$	Anzahl der Cores co die Standort i durchlaufen, $i \in WK \cup SaSt \cup ReSt$
$Anz_{lager, kom, t, t+1}$	Anzahl gelagerter Komponenten $kom \in Kom$ von Periode t bis Periode $t + 1$
$Anz_{neu, kom}$	Anzahl neuer Komponenten $kom \in Kom$
$Anz_{stueck, kom}$	Anzahl bestellter Stück je Komponente $kom \in Kom$
AQ	Aufarbeitungsquote
β	Parameter der Beta-Binomialverteilung
$besa \in BesA$	Beschaffungsauftrag
$bp \in BP$	Bestellpolitik
$C_{beschaffung}$	Operative Kosten der Materialbedarfsplanung
$C_{co, pr}$	Kosten des Remanufacturing-Prozesses pr für Core co je Zeiteinheit
C_{ges}	Operative Gesamtkosten
c_h	Lagerhaltungskosten je Periode
$c_{h, kom}$	Lagerhaltungskosten je Periode und Komponente $kom \in Kom$
c_{info}	Operative Kosten des Informationsaustauschs
c_{info_i}	Kosten der Informationsaufnahme und -weitergabe an Standort $i \in WK \cup SaSt \cup ReSt$
c_K	Bestellfixe Kosten
$c_{K, kom}$	Bestellfixe Kosten je Komponente $kom \in Kom$
$c_{kom, pr}$	Kosten des Remanufacturing-Prozesses pr für Komponente kom je Zeiteinheit
$c_{lager, kom}$	Lagerhaltungskosten je Periode und Komponente $kom \in Kom$
$c_{rpro, pr}$	Kosten des Remanufacturing-Prozesses pr für aufgearbeitetes Produkt $rpro$ je Zeiteinheit
c_{reman}	Operative Kosten des Remanufacturings

Formelzeichen	Bedeutung
$c_{rpro, straf}$	Strafkosten für unbediente Nachfrage nach dem aufgearbeiteten Produkt $rpro$
$c_{stück, kom}$	Stückkosten je bestellter Komponente $kom \in Kom$
c_{straf}	Strafkosten für unbediente Nachfrage
c_{trans}	Operative Transportkosten
$c_{trans, i, j}$	Transportkosten je Strecke zwischen den Standorten i und j , $i, j \in WK \cup SaSt \cup ReSt$
$co \in CO$	Core
D	Nachfrage
$D_{kom, t}$	Nachfrage nach Komponente kom in Periode t
D_{rpro}	Aggregierte Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$
$D_{rpro, kom, t}$	Nachfrage nach Komponente kom für das aufgearbeitete Produkt $rpro$ in Periode t
$D_{rpro, t}$	Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$ in Periode t
$D_{rpro, bedient}$	Aggregierte bediente Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$
$D_{rpro, bedient, t}$	Bediente Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$ in Periode t
$D_{rpro, unbedient}$	Aggregierte unbediente Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$
$D_{rpro, unbedient, t}$	Unbediente Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$ in Periode t
d_{co}	Zurückgelegte Strecke des Core co
$\Delta_{bp, WW}$	Optimalitätslücke zwischen der Bestellpolitik $bp \in BP$ und dem Wagner-Whitin-Modell
E	Kanten eines Graphen G
e	Kantengewichte eines Graphen G
f	Aggregierter Fehlmengenanteil über alle Komponenten
f_{kom}	Aggregierter Fehlmengenanteil je Komponente kom
$f_{kom, t}$	Fehlmengenanteil je Komponente kom je Zeiteinheit t
f_{max}	Maximaler Fehlmengenbestand
G	Graph $G = (V, E, d)$
γ_{kom}	Gleichverteilte Zufallsvariable $U([0, 1])$ zur Bestimmung der realen Regenerationsrate der Komponente $kom \in Kom$
$ia \in IA$	Informationsaustauschszenario
I_{max}	Maximaler Lagerbestand

Formelzeichen	Bedeutung
I_{avg}	Durchschnittlicher Lagerbestand
IM	Umwelteinfluss (engl. "Environmental Impact")
IS_{kom}	Informationssensitivität je Komponente kom
\vec{i}	Informationsvektor
$kom \in Kom$	Komponente
\vec{k}	Komponentenvektor
$k \in K$	Entscheidungskriterium
$l \in L$	Lieferant
λ_{co}	Parameter der Exponentialverteilung zur Modellierung der zeitlichen Verteilung der Ankunft von Cores co
$\lambda_{D_{rpro}}$	Parameter der Exponentialverteilung zur Modellierung der zeitlichen Verteilung der Ankunft von Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten D_{rpro}
LT	Liefertreue
N_{bp}	Nutzwert der Bestellpolitik $bp \in BP$
n_{kz}	Kriterienerfüllung für Kriterium k hinsichtlich der Zielgröße z
P	Bevölkerung (engl. "Population")
p	Präferenzwert der PROMETHEE-Methode
φ_F	Auswirkung der Ausprägung des Fehlercodes x_F im Informationsvektor \vec{I} auf die dynamische Regenerationsrate $R_{dyn, kom}$
φ_{km}	Auswirkung der Ausprägung des Kilometerstands x_{km} im Informationsvektor \vec{I} auf die dynamische Regenerationsrate $R_{dyn, kom}$
φ_Q	Auswirkung der Ausprägung der Qualität x_Q im Informationsvektor \vec{I} auf die dynamische Regenerationsrate $R_{dyn, kom}$
$\varphi_{i, co}$	Auswirkung der Ausprägung der Information $i \in F, km, Q$ im Informationsvektor \vec{I} des Cores co auf die dynamische Regenerationsrate $R_{dyn, kom}$
q	Indifferenzwert der PROMETHEE-Methode
rep	Anzahl an Replikationen
$rest \in ReSt$	Remanufacturing-Standort
$rpro \in RPro$	Aufgearbeitetes Produkt
$rpro^{neu} \in RPro$	Neuprodukt, welches als aufgearbeitetes Produkt verwendet wird, falls nicht ausreichend Komponenten zur Befriedigung der Nachfrage verfügbar sind
$R_{dyn, kom} \in [0, 1]$	Dynamische Regenerationsrate der Komponente $kom \in Kom$
$R_{stat, kom} \in [0, 1]$	Statische Regenerationsrate der Komponente $kom \in Kom$

Formelzeichen	Bedeutung
$R_{real,kom} \in \{0, 1\}$	Realisierte Regenerationsrate der Komponente $kom \in Kom$
σ	(optionaler) Wendepunkt der PROMETHEE-Methode
s	Meldebestand
s_{kom}	Meldebestand von Komponente $kom \in Kom$
S	Ziellagerbestand
S_{kom}	Ziellagerbestand von Komponente $kom \in Kom$
$sast \in SaSt$	Sammelstandort
$sed \in Sed$	Sendung
$szs \in SZS$	Stückzahlenszenario
T	Untersuchungszeitraum
T'	Abstand zwischen zwei Bestellungen bzw. Bestellzyklus
T'_{kom}	Abstand zwischen zwei Bestellungen der Komponente $kom \in Kom$
$t \in T$	Zeitperiode
t_{kom}	Planungsperiode für Komponente $kom \in Kom$
τ	Wiederbeschaffungs- bzw. Lieferzeit
τ_{kom}	Wiederbeschaffungs- bzw. Lieferzeit der Komponente $kom \in Kom$
TE	Technologiefaktor (engl. "Technology")
$t_{trans_{i,j}}$	Transportzeit zwischen den Standorten $i, j \in WK \cup SaSt \cup ReSt \cup L$
$t_{co,wk}$	Durchlaufzeit von Core co in Werkstatt wk
$t_{co,sast}$	Durchlaufzeit von Core co an Sammelstandort $sast$
$t_{co,pr}$	Durchlaufzeit von Core co in Prozess pr
$t_{kom,rest}$	Durchlaufzeit von Komponente kom am Remanufacturing-Standort $rest$
$t_{kom,pr}$	Durchlaufzeit von Komponente kom in Prozess pr
$t_{rpro,pr}$	Prozesszeit des Produkts $rpro$ in Prozess pr
$t_{rpro,rest}$	Bestandszeit eines aufgearbeiteten Produkts $rpro$ am Remanufacturing-Standort $rest$ bis zur Distribution
$trans \in Trans$	Transport
$trans_{co,i,j}$	Transportierte Cores co zwischen den Standorten $i, j \in WK \cup SaSt \cup ReSt$
$trans_{kom,i,j}$	Transportierte Komponenten kom zwischen den Lieferanten $i \in L$ und dem Remanufacturing-Standort $j \in ReSt$
q_{wk}	Grad der Werkstattanbindung für Werkstätten $wk \in WK$

Formelzeichen	Bedeutung
U_{co}	Umweltbelastung des Cores co in kg CO ₂
q	Bestellmenge
$q_{kom,t}$	Bestellmenge der Komponente kom in Periode t
q_{min}	Mindestbestellmenge
$q_{min,kom}$	Mindestbestellmenge der Komponente $kom \in Kom$
V	Knoten eines Graphen G
v_{CO_2}	Durchschnittlicher CO ₂ -Verbrauch je Strecke
$w_{D_{rpro}}$	Maximale Wartezeit der Kunden mit Nachfrage nach aufgearbeitetem Produkt $rpro$ bzw. Lieferzeitversprechen des fokalen Remanufacturing-Unternehmens
$wk \in WK$	Werkstatt
$wka \in WKA$	Grad der Werkstatanbindung
$WV_{co,t,wk}$	Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ankunftsprozesses von Core co in Periode t bei Werkstatt wk
WV_F	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausprägung des Fehlercodes x_F
WV_{km}	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausprägung des Kilometerstands x_{km}
WV_Q	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausprägung der Qualität x_Q
w_z	Gewicht der Zielgröße $z \in Z$
x_F	Ausprägung des Fehlercodes im Informationsvektor \vec{i}
x_{km}	Ausprägung des Kilometerstands im Informationsvektor \vec{i}
x_Q	Ausprägung der Qualität im Informationsvektor \vec{i}
$z \in Z$	Zielgröße

1 Einleitung

Der Anstieg der Weltbevölkerung in den letzten Jahrzehnten verursacht enorme Herausforderungen in Bezug auf die Nachfrage nach natürlichen Ressourcen (Oberle & Bringezu et al. 2019, S. 7 f., World Economic Forum 2014, S. 22). Das gleichzeitige Wirtschaftswachstum wurde dabei durch einen starken Anstieg der Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen ermöglicht: 1980 wurden ca. 40 Mrd. Tonnen Ressourcen aus der Umwelt entnommen, 2020 waren es bereits 82 Mrd. Tonnen (OECD 2019, S. 18, MacArthur 2013, S. 15). Wenn sich die aktuelle lineare *Take-Make-Use-Dispose*-Mentalität nicht grundlegend ändert, wird bis 2060 eine jährliche Ressourcenentnahme von 167 Mrd. Tonnen prognostiziert (OECD 2019, S. 19, MacArthur 2013, S. 11, Tolio & Bernard et al. 2017, S. 585). Zugleich stellen immer mehr produzierende Unternehmen fest, dass das lineare System ihre Risikoexposition erhöht, insbesondere durch höhere Ressourcenpreise und -volatilität sowie Unterbrechungen in Lieferketten (Arnold & Palomäki et al. 2021, S. 13, Capgemini Research Institute 2021, S. 3, MacArthur 2013, S. 17 ff., McKinsey Global Institute 2011, S. 30). Jüngste Ereignisse wie Naturkatastrophen (z. B. Überflutungen), globale Pandemien (z. B. Covid-19) oder Materialengpässe (z. B. in der Halbleiterindustrie) zeigen die Verwundbarkeit der globalen Produktion auf (Casper 2021, S. 4, MHI & Deloitte 2021, S. 3).

Es gibt somit zahlreiche Gründe, sekundäre Formen der Produktionsmittlerschließung, d. h. der Wertrückgewinnung aus *End-of-Life* (EoL)-Produkten, zu entwickeln (OECD 2019, S. 40 ff., Thierry & Salomon et al. 1995, S. 114). Die Kreislaufwirtschaft bietet hierfür einen Lösungsansatz, indem sie Wohlstand und Ressourceneinsatz voneinander entkoppelt und somit ein restauratives und regeneratives System bildet (Seliger 2007, S. 345, MacArthur 2013, S. 7, Kirchherr & Reike et al. 2017, S. 221 ff.). Eine konsequente Umsetzung der Kreislaufwirtschaft trägt entscheidend zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen, zur Erhaltung des gesellschaftlichen Wohlstands und zum Schutz der Biosphäre bei (Kara & Hauschild et al. 2022, S. 505 f., Tolio & Bernard et al. 2017, S. 585 f.).

Der Wandel zur Kreislaufwirtschaft ist jedoch nicht trivial, da das heutige Wirtschaftssystem vom linearen Modell geprägt ist (MacArthur 2013, S. 11). Trotz bestehender rechtlicher Rahmenbedingungen und Initiativen, z. B. in den USA und Asien (Ghisellini & Cialani et al. 2016, S. 15), dem europäischen "Green Deal" (European Commission 2021), und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (Bundesministerium der Justiz 2012) ist weiteres Forschungs- und Innovationspotential vorhanden (Kara & Hauschild et al. 2022, S. 505 ff.). Auf dem Weg zur ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft stellt die vorliegende Arbeit einen Ansatz für die Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) vor, um die effiziente Rückführung von EoL-Produkten sowie deren Wiederverwendung zu ermöglichen.

1.1 Ausgangssituation und Herausforderungen

Remanufacturing, d. h. die industrielle Aufarbeitung von EoL-Produkten, ist ein zirkuläres Verfahren, welches den höchsten Standard in Bezug auf Qualität und Werterhalt des Gebrauchtprodukts aufweist (Matsumoto & Ijomah 2013, S. 392, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 1, Kara & Hauschild et al. 2022, S. 514, Bayındır & Erkip et al. 2007, S. 509, Copani & Tolio et al. 2014, S. 15). Dabei spielt die effiziente Gestaltung und Steuerung der RL eine entscheidende Rolle, da das Remanufacturing von der Versorgung mit EoL-Produkten abhängig ist (Parker & Riley et al. 2015, S. 10, Sundin & Dunbäck 2013, S. 3, Govindan & Soleimani 2017, S. 371). Die Bedeutung des Remanufacturings und der RL nimmt dabei eine immer größere Rolle ein: Während 2014 noch 54,5 % der befragten produzierenden Unternehmen Remanufacturing nicht kannten oder nicht in Erwägung gezogen haben (Benoy & Owen et al. 2014, S. 14), gaben 2020 in einer Umfrage ca. 97 % der befragten Führungskräfte an, dass die RL einen wichtigen Beitrag beim Übergang zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft liefere (Makarova & Shubenkova et al. 2020, S. 174).

In der Automobilbranche findet Remanufacturing insbesondere im *Automotive Aftermarket* (AA) Anwendung. Ohne Remanufacturing wären notwendige Ersatzteile im AA nicht immer zu einem angemessenen Preis verfügbar, wodurch die Wartung und Instandhaltung von Fahrzeugen unerschwinglich für Kunden würde (APRA Europe 2015, S. 1). In Europa erzielte Remanufacturing im AA 2015 einen Umsatz von ca. 7,4 Mrd. US-Dollar (Parker & Riley et al. 2015, S. 42, Breitschwerdt & Cornet et al. 2017, S. 10).

Durch Remanufacturing bestehen vielfältige Einsparpotentiale (Parker & Riley et al. 2015, S. 11, Dias & Kim et al. 2013, S. 676, Liu & Jiang et al. 2016, S. 1031, Biswas & Duong et al. 2013, S. 7, Warsen & Laumer et al. 2011, S. 67). So werden durch die industrielle Aufarbeitung von automobilen Startermotoren beispielsweise 88 % Materialien, 53 % CO₂-Emissionen und 56 % Energie im Vergleich zur Neuproduktion eingespart (Bartel 2015, S. 7). Seitz & Peattie (2004) bezeichnen Remanufacturing daher auch als *win-win-win*-Situation, da Kunden, Unternehmen und die Umwelt profitieren (Seitz & Peattie 2004, S. 77). Dennoch steht die Umsetzung des Remanufacturings noch am Anfang (Parker & Riley et al. 2015, S. 42). So betrug 2021 die Remanufacturing-Intensität, d. h. das Verhältnis von Remanufacturing-Produkten zu Neuprodukten, in der EU bislang nur ca. 5 % in repräsentativen Wirtschaftssektoren (Arnold & Palomäki et al. 2021, S. 36). Diese Beobachtungen bestätigen frühere Studien, die für die Automobilindustrie eine Remanufacturing-Intensität von 1,1 % ermittelt haben (Parker & Riley et al. 2015, S. 42).

Diese geringe Umsetzung des Remanufacturings lässt sich auf enorme Herausforderungen zurückführen. Zunächst sind die Gestaltung und Steuerung einer RL aufgrund der Vielzahl

von Akteuren in einem dezentralen und mehrstufigen System sehr komplex (Guide & van Wasenhove 2009, S. 12, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 5). Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. (2018) stellen zudem fest, dass eine Vielzahl der Herausforderungen an den Schnittstellen zwischen den Akteuren entsteht (Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3231). Hierzu gehört bspw. der unsichere Produktrückfluss aufgrund von kundenindividueller Nutzungsintensitäten und -zeiten sowie der Abgleich von dem Angebot an zurückfließenden EoL-Produkten mit der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten (Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3232). Die anfallenden Kosten für die Gestaltung und Steuerung einer RL können die wirtschaftlichen Vorteile des Remanufacturings übersteigen und es somit unattraktiv machen (Parker & Riley et al. 2015, S. 53).

Eine Planungsaufgabe, die für das Remanufacturing besonders wichtig ist, ist die *Materialbedarfsplanung* (MRP, engl. "Material Requirements Planning"). Diese umfasst die Versorgung des Remanufacturings mit notwendigen Produktionsfaktoren. Hierzu gehören u. a. Neukomponenten, die als Ersatz für gebrauchte Komponenten, die aus den EoL-Produkten ausgebaut und nicht weiterverwendet werden können, dienen (Casper 2021, S. 75, Guide 2000, S. 474, Ferrer & Whybark 2001, S. 115). In einer Umfrage unter 62 Remanufacturing-Unternehmen gaben 51 % an, dass fehlende Komponenten ein häufiger Grund für Störungen im Remanufacturing-Prozess seien (Kamper & Triebs et al. 2019, S. 284). Eine ineffiziente MRP kann somit zu hohen Kosten führen (Parker & Riley et al. 2015, S. 53). Aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich Zeitpunkt, Menge und Qualität der zurückfließenden EoL-Produkte, im Folgenden als *multidimensionale Unsicherheiten* bezeichnet, werden Entscheidungen hinsichtlich Bestellmenge und -zeitpunkt für Neukomponenten erschwert (Ferrer & Whybark 2001, S. 114, Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3238). Zwei äußerlich auf den ersten Eindruck identisch erscheinende EoL-Produkte können bspw. zu vollkommen unterschiedlichen Regenerationsraten und somit wiederverwendbaren Komponenten führen, z. B. aufgrund unterschiedlicher Nutzungsintensitäten (Guide 2000, S. 474). Die Regenerationsrate beschreibt dabei im Allgemeinen das Verhältnis erfolgreich aufgearbeiteter Produkte zur Gesamtanzahl der Gebrauchtprodukte, die in den Remanufacturingprozess eingebracht wurden (Steinhilper & Weiland 2015, S. 770), wobei dieses Prinzip analog auf die enthaltenen Komponenten angewendet werden kann. Bestehende MRP-Systeme können mit diesen Unsicherheiten nicht effizient umgehen (Thevenin & Adulyasak et al. 2021, S. 475, Chevreux & Hu et al. 2018).

Ein *erhöhter Informationsaustausch* und somit eine Transparenzsteigerung zwischen den Akteuren in der RL kann als entscheidender Befähiger zur Bewältigung der Herausforderungen und Verbesserung der Planungsaufgaben in der RL dienen (Parker & Riley et al. 2015, S. 53, Casper 2021, S. 75 f.). Jedoch sind insbesondere produktspezifische Informationen

heutzutage häufig nicht verfügbar, weil diese nicht über mehrere Stufen in der RL geteilt werden (Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6, Parker & Riley et al. 2015, S. 53, Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3233). Deshalb ist auch der Wert und das Potential eines Informationsaustauschs bislang nur unzureichend erforscht (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015, S. 785).

1.2 Zielsetzung

Um die zuvor genannten Herausforderungen zu adressieren, lautet die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wie folgt:

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und exemplarische Erprobung eines Konzepts zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik, um somit die Materialbedarfsplanung von notwendigen Neukomponenten für das Remanufacturing zu verbessern.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung ist zunächst, ausgehend von einer Identifikation von Gebrauchtproduktquellen, die Ableitung resultierender Materialflüsse sowie die wertstrombasierte Modellierung dieser erforderlich. Diese Charakterisierung erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit am Beispiel des Automotive Aftermarkets (AA). Analog zur Modellierung des Materialflusses werden produktspezifische Informationen, die in der RL aufgenommen werden können, zunächst identifiziert, ein Rezeptormodell zur Analyse des konkreten Nutzens entwickelt und der resultierende Informationsfluss modelliert. Unter der Annahme des *Originalhersteller-Remanufacturings* (OER, engl.: "Original Equipment Remanufacturing") können dabei die identifizierten Informationen um weitere Daten angereichert werden (Guidat & Uoti et al. 2015, S. 686, Lange 2017, S. 16). Aufgrund der hohen Standards in Bezug auf Qualität und Werterhalt der Gebrauchtprodukte im Remanufacturing sowie der Relevanz des Remanufacturings im AA werden diese Bereiche fokussiert (vgl. Kapitel 1.1).

Um den Nutzen der identifizierten und modellierten Produktinformationen in der RL auf nachgelagerte Planungs- und Steuerungsaufgaben aufzuzeigen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit beispielhaft die MRP fokussiert. Dazu wird ein Konzept zur Bestimmung dynamischer, instanzindividueller Regenerationsraten der enthaltenen Komponenten von Gebrauchtprodukten entwickelt, welche die Produktinformationen berücksichtigt und somit eine bessere Abschätzung hinsichtlich Anzahl und Zeitpunkt notwendiger Neukomponenten zulässt. Mit Hilfe der stochastischen Bestellpunktverfahren der (s,q)- und (s,S)-Bestellpolitiken sowie die Bestellrhythmusverfahren der (t,q)- und (t,S)-Bestellpolitiken sowie einer adaptierten Form der deterministischen *Silver Meal*-Heuristik wird eine effiziente MRP für das Remanufacturing gestaltet. Zusätzlich erfolgt die Untersuchung der Performance dieser echtzeitfähigen Bestellpolitiken gegenüber des deterministischen *Wagner-Whitin*-Verfahrens.

Mittels einer Überführung dieser Modellierungen in ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell werden die multidimensionalen Unsicherheiten und dynamischen Zusammenhänge einer RL möglichst realitätsnah berücksichtigt. Anhand einer hierzu entwickelten Ablauf- und statistischen Versuchsplanung werden zudem die Effekte stochastischer Einflüsse beachtet und Auswirkungen eines erhöhten Informationsaustauschs auf die MRP quantifiziert. Um mögliche Verbesserungen sichtbar zu machen, wird ein geeignetes System zur Leistungsbewertung entwickelt (Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3235, Butzer & Schötz et al. 2017, S. 251). Neben den ökonomischen Vorteilen spielen beim Remanufacturing insbesondere auch die ökologischen Vorteile eine wichtige Rolle (Lange 2017, S. 16 f.). Zur Berücksichtigung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von identifizierten Maßnahmen in der RL wird somit ein *multikriterielles Bewertungssystem* auf Basis des Konzepts der Ökoeffizienz entwickelt, welches in der Lage ist, konfliktäre Ziele gegeneinander abzuwägen (Kara & Hauschild et al. 2022, S. 506 ff.). Anschließend werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, um eine effiziente Abstimmung zwischen den ermittelten Wirkzusammenhängen und den Implikationen für die Gestaltung und Steuerung einer RL im Sinne eines Regelkreises zu ermöglichen. Eine exemplarische Erprobung des entwickelten Konzepts erfolgt anhand eines Anwendungsfalls aus dem AA.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung der Zielsetzung ist die Arbeit wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen zu den Themen Remanufacturing, RL, MRP und Informationsaustausch sowie zur simulationsbasierten Optimierung vorgestellt. Aufbauend darauf analysiert Kapitel 3 den Stand der Forschung zur MRP und Transparenzsteigerung in der RL und leitet ein Forschungsdefizit ab, welches mit Hilfe des in Kapitel 4 vorgestellten Lösungsansatzes adressiert wird. Kapitel 5 erläutert die Teilaspekte des Lösungsansatzes im Detail. Die praktische Erprobung des entwickelten Ansatzes erfolgt in Kapitel 6 anhand eines exemplarischen Anwendungsfalls aus dem AA. In Kapitel 7 folgt eine kritische Diskussion und Bewertung der erlangten Erkenntnisse sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschung. Kapitel 8 schließt mit einer Zusammenfassung der Arbeit ab.

2 Grundlagen

Auf Basis der Zielsetzung einer Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung (MRP) für das Remanufacturing werden im folgenden Kapitel die relevanten Grundlagen vorgestellt, die zur Erreichung dieser notwendig sind. In Kapitel 2.1 werden zunächst die Herausforderungen der MRP im Remanufacturing vermittelt. Kapitel 2.2 geht anschließend auf die Transparenzsteigerung und den Informationsaustausch in Netzwerken ein. Abschließend wird in Kapitel 2.3 die simulationsbasierte Optimierung und die statistische Versuchsplanung vorgestellt.

2.1 Materialbedarfsplanung im Remanufacturing

Die MRP ist eine wichtige Planungsaufgabe im Remanufacturing, um notwendige Neukomponenten effizient zu beschaffen und zu bevorraten (Casper 2021, S. 75). Hierzu ist zunächst ein Verständnis hinsichtlich des Begriffs Remanufacturing sowie zugehöriger Prozessschritte notwendig, welches in Kapitel 2.1.1 vorgestellt wird. Kapitel 2.1.2 erläutert aufbauend darauf die wichtigsten Akteure sowie Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL. Abschließend fokussiert Kapitel 2.1.3 die MRP im Allgemeinen sowie deren Herausforderungen im Remanufacturing im Speziellen.

2.1.1 Definition Remanufacturing

In der Literatur existieren bereits verschiedene Definitionen des Begriffs Remanufacturing (vgl. Haynsworth & Lyons 1987, S. 24, Seaver 1994, S. 241, Thierry & Salomon et al. 1995, S. 119, Amezquita & Bras 1996, S. 6, Steinhilper 1998, S. 7, Ijomah 2002, S. 22 f., Ijomah & Childe et al. 2004, S. 56, Sundin 2004, S. 28, Parker 2010, S. 142, Khor & Udin 2012, S. 7, MacArthur 2013, S. 25, Parker & Riley et al. 2015, S. 4, CLEPA & MERA et al. 2016, S. 2, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016, S. 133, Tolio & Bernard et al. 2017, S. 585, Lange 2017, S. 11, Abbey & Guide 2018, S. 374 f., Nasr & Russell 2018, S. 47). Alle diese Definitionen haben den Grundgedanken der Aufarbeitung von gebrauchten Produkten und der Wiederverwendung enthaltener Teilsysteme und Komponenten gemeinsam. Eine der ersten Definitionen von Haynsworth & Lyons (1987) beschreibt Remanufacturing dabei als einen industriellen Prozess, in dem gebrauchte Produkte in einen "wie neu"-Zustand erneuert werden (Haynsworth & Lyons 1987, S. 24). Steinhilper (1998) beschreibt Remanufacturing als "ultimative Form des Recyclings", in dem neuwertige Produkte aus gebrauchten Produkten produziert werden (Steinhilper 1998, S. 7). Weitere Definitionen ergänzen, dass die aufgearbeiteten Produkte die gleichen Qualitätsstandards erfüllen müssen wie Neuprodukte und somit die gleiche Garantie wie ein Neuprodukt erhalten (Thierry & Salomon et al. 1995, S. 119, Ijomah & Childe et al. 2004, S. 56, Khor & Udin 2012,

S. 7, Parker & Riley et al. 2015, S. 4). Nasr & Russell (2018) und Kalverkamp & Raabe (2018) gehen noch einen Schritt weiter und argumentieren, dass aufgearbeitete Produkte besser sein können, da Probleme aus der ersten Nutzungsphase behoben werden können (Nasr & Russell 2018, S. 47, Kalverkamp & Raabe 2018, S. 126).

Da sich die vorliegende Arbeit auf die Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik des AA fokussiert, wird im Folgenden die Definition der Automobilverbände APRA, CLEPA, FIRM, MERA, ANRAP und CPRA verwendet. Diese definieren *Remanufacturing* als ein standardisiertes industrielles Verfahren, mit dem Gebrauchtprodukte (sog. Cores) wieder in einen neuwertigen oder besseren Zustand gebracht werden. (CLEPA & MERA et al. 2016, S. 2). Dieser industrielle Prozess entspricht vorgegebenen, technischen Spezifikationen inklusive Qualitätsstandards und führt somit zu Produkten mit der gleichen Garantie wie ein Neuprodukt (CLEPA & MERA et al. 2016, S. 2).

Cores (bzw. Gebraucht- oder EoL-Produkte) sind definiert als zuvor verkaufte, verbrauchte oder nicht-funktionsfähige Produkte, welche für den Remanufacturingprozess vorgesehen sind und somit nicht als Abfall, sondern als wertvoller Input für diesen behandelt werden sollten (CLEPA & MERA et al. 2016, S. 2, Parker & Riley et al. 2015, S. 6). Die Bezeichnung "Core" meint dabei den wiederverwendbaren "Kern" von EoL-Produkten, d. h. diejenigen Teilsysteme oder Komponenten mit hohem Wert, langem Lebenszyklus und einfacher Demontier- bzw. Wiederverwendbarkeit in Relation zum Gesamtprodukt (Haynsworth & Lyons 1987, S. 24, MacArthur 2013, S. 25, Parker & Riley et al. 2015, S. 10 ff.). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aus Gründen der Konsistenz der Begriff Core verwendet.

Eine wesentliche Herausforderung des Remanufacturing besteht in der Beherrschung *multidimensionaler Unsicherheiten* hinsichtlich der Versorgung des Remanufacturing-Prozesses mit geeigneten Cores. Dabei werden Unsicherheiten hinsichtlich der Qualität und der Anzahl an zurückgeführten Produkten sowie dem Zeitpunkt der Rückgabe unterschieden. Diese stellen einen essentiellen Unterschied zu einer klassischen, linearen Produktion dar und müssen somit in einem effizienten Remanufacturing-System beherrscht werden (Thierry & Salomon et al. 1995, S. 133, Aras & Boyaci et al. 2004, S. 319, Sundin 2004, S. 34, Guide & van Wassenhove 2009, S. 15, Asif & Bianchi et al. 2012, S. 3, Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3233 ff.). Aufgrund dieser Unsicherheiten unterscheiden sich die konkret durchzuführenden Prozessschritte für das Remanufacturing sowie deren Reihenfolge je nach Branche und Produkt (Bras & Hammond 1996, S. 5, Steinhilper 1998, S. 40, Sundin 2004, S. 59 ff., Parker & Riley et al. 2015, S. 5). Im Wesentlichen lassen sich diese jedoch in die folgenden vier Kategorien einteilen: (1) Reinigung, (2) Schadensbehebung (Reparatur, Erneuerung, Austausch), (3) Qualitätssicherung (Prüfung, Inspektion), und (4) Teilverbindung (Demontage, Montage) (Bras & Hammond 1996, S. 5). Zur Beherrschung der Unsicherheiten ist die geeignete Wahl

der Strategie der Aufarbeitung entscheidend: Neben der Unterscheidung in eine Push- bzw. Pull-Strategie werden die Strategien *remanufacture-to-stock* (RMTS), *reassembly-to-order* (RATO), sowie *remanufacture-to-order* (RMTO) unterschieden (Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 275, Kuo 2011, S. 324).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit steht dabei insbesondere der Prozessschritt der Schadensbehebung im Allgemeinen bzw. des Austauschs von gebrauchten, nicht mehr funktionsfähigen Komponenten aus Cores im Fokus. Dieser Schritt hängt insbesondere von der sog. *Regenerationsrate* ab. Steinhilper & Weiland (2015) definieren diese für den übergeordneten Remanufacturing-Prozess als das Verhältnis erfolgreich aufgearbeiteter Cores zur Gesamtzahl der Cores, die in den Remanufacturingprozess eingebracht wurden (Steinhilper & Weiland 2015, S. 770). Bezogen auf einzelne Komponenten eines Cores beschreibt die Regenerationsrate die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Komponente erfolgreich aufgearbeitet und weiterverwendet werden kann (Ferrer & Whybark 2001, S. 114 f.). Letztere Definition ist dabei für die vorliegende Arbeit relevant und wird im weiteren Verlauf verwendet.

Remanufacturing als zirkuläre Wertschöpfungsmöglichkeit eignet sich insbesondere bei komplexen Produkten, die eine signifikante Menge an Material, Energie und eingesetzter Arbeitsleistung enthalten (Parker & Riley et al. 2015, S. 11). Daher kann das Remanufacturing auch als eine der *Schlüsselstrategien der Kreislaufwirtschaft* (CE, engl. "Circular Economy") gesehen werden, indem es einen möglichen Kreislauf schließt und somit einen wichtigen Bestandteil der ressourceneffizienten Fertigungsindustrie darstellt (Parker & Riley et al. 2015, S. 11, Nasr & Russell 2018, S. 173). Die CE zielt darauf ab, einen Kreislauf aus Demontage und Wiederverwendung von Produkten, Komponenten und Materialien zu realisieren (MacArthur 2013, S. 7). Für eine ausführliche Analyse der CE sei auf Kirchherr & Reike et al. (2017) und MacArthur (2013) verwiesen.

Neben weiteren zirkulären Wertschöpfungsmöglichkeiten (z. B. Reparatur, Reconditioning, Refurbishment, Recycling) stellt das Remanufacturing die ökonomisch nachhaltigste Option (Amezquita & Bras 1996, S. 6) sowie die einzige zirkuläre Option, die in Bezug auf Qualität und Garantie mit einem Neuprodukt konkurrieren kann, dar (Matsumoto & Ijomah 2013, S. 392 f., Kara & Hauschild et al. 2022, S. 514, Steinhilper 2001, S. 481 ff.). Die wohl bekannteste Definition von Nachhaltigkeit bzw. nachhaltiger Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation gerecht wird, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen (Vereinte Nationen 1987, S. 24). Spätere Definitionen ergänzen den sog. "Triple-Bottom-Line"-Ansatz, welcher Nachhaltigkeit aus den drei Dimensionen ökonomisch, ökologisch und sozial definiert (Barbier 1987, S. 104, Robert & Parris et al. 2005, S. 11). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Konzept der *Ökoeffizienz* fokussiert, welches als Teilgebiet der nachhaltigen Entwicklung

den geschaffenen ökonomischen Wert im Verhältnis zu den ökologischen Auswirkungen setzt und somit zwei der drei Nachhaltigkeitsdimensionen abdeckt (Hauschild & Kara et al. 2020, S. 534).

2.1.2 Akteure und Aufgaben in der Rückführungslogistik

Ein Remanufacturing-System umfasst neben dem eigentlichen Remanufacturing-Prozess das Core-Akquisitionsmanagement, die Core-Sammlung und -Rückführung sowie die Distribution der aufgearbeiteten Produkte (Östlin 2008, S. 9, Wei & Tang et al. 2015, S. 4). Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Rückführungslogistik (RL, engl.: "Reverse Logistics", Sundin & Dunbäck 2013, S. 3, Fleischmann 2000, S. 7). Hierzu werden in den folgenden Abschnitten notwendige Definitionen, beteiligte Akteure sowie deren Aufgaben vorgestellt.

2.1.2.1 Definition Rückführungslogistik und Einordnung in globale Produktionsnetzwerke

Analog zum Remanufacturing existieren auch zur RL bereits mehrere Definitionen (vgl. Murphy 1986, S. 12, Fleischmann 2000, S. 7, Fleischmann & Krikke et al. 2000, S. 657, Guide & van Wassenhove 2002, S. 25, Krumwiede & Sheu 2002, S. 326, Guide & Teunter et al. 2003, S. 3, Corbett & Savaskan 2001, S. 2, Dekker & Fleischmann et al. 2004, S. 5, Subramoniam & Huisingh et al. 2009, S. 1166, Pokharel & Mutha 2009, S. 176, Ilgin & Gupta 2010, S. 567, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 4, Sundin & Dunbäck 2013, S. 3, Herrmann & Vetter 2021, S. 25). Eine der ersten Definitionen stammt von Rogers & Tibben-Lembke (1998) und beschreibt die Rückführungslogistik als Prozess der Planung, Implementierung, und Steuerung des effizienten und kostengünstigen Transports von Rohstoffen, Zwischen- und Fertigerzeugnissen und der damit verbundenen Informationen vom Verbrauchsort zum Ursprungsort zum Zwecke der Wiedergewinnung des Wertes oder der ordnungsgemäßen Entsorgung (Rogers & Tibben-Lembke 1998, S. 2). In späteren Definitionen wird erweitert, dass die Waren an einen Ort der angemessenen Weiterverwendung bzw. Verwertung transportiert werden (Dekker & Fleischmann et al. 2004, S. 5). Weiterhin ist der Austausch sowie die Nutzung korrekter und zeitlich verfügbarer, technischer *Produktinformationen* ein wesentlicher Bestandteil einer RL, um somit die multidimensionalen Unsicherheiten hinsichtlich Menge, Zeitpunkt und Qualität der zurückgeführten Cores zu reduzieren (Sakao & Sundin 2019, S. 6, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6, Parker & Riley et al. 2015, S. 53).

Zusätzlich zu den Herausforderungen klassischer Logistiksysteme ist die RL von weiteren *Herausforderungen* geprägt. Neben den in Kapitel 2.1.1 bereits erläuterten multidimensionalen Unsicherheiten gehören hierzu u. a. der notwendige Ausgleich von dem Angebot an zurückfließenden Cores mit der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten (Guide 2000,

S. 473), die mögliche Kannibalisierung mit Neuprodukten bzw. Konkurrenz durch Billigprodukte (Parker & Riley et al. 2015, S. 24, Thierry & Salomon et al. 1995, S. 119), die technologische (In-) Kompatibilität zwischen den Produktgenerationen (Kara & Hauschild et al. 2022, S. 13), sowie Logistik- bzw. Routingentscheidungen zur Einsammlung und Konsolidierung der Cores (Fleischmann 2000, S. 8 ff., Jayaraman & Guide et al. 1999, S. 498).

Alternativ zu dem Begriff RL wird auch von Rückwärtslieferketten (RSC, engl.: "Reverse Supply Chain") sowie von Sammel-, Rücknahme- und RL-*Netzwerken* gesprochen (Herrmann & Vetter 2021, S. 25, Subramoniam & Huisingsh et al. 2009, S. 1166, Fleischmann & Krikke et al. 2000, S. 657). Durch diese Netzwerkperspektive liegt der Fokus nicht mehr auf den Kanten (d. h. Relationen, Aktivitäten oder Interaktionen), sondern auf den Knoten (d. h. Individuen, Entitäten, Organisationen) in dem Netzwerk (Fleischmann & Krikke et al. 2000, S. 657, Neuner 2009, S. 37 f.). Dieser Argumentation folgend kann eine Begriffsunterscheidung hinsichtlich dem Supply Chain Management (SCM), dem Wertschöpfungsnetzwerk (WSN), sowie dem globalen Produktionsnetzwerk (GPN) erfolgen. Das SCM umfasst dabei das inter-organisationale Management der Material- und Informationsflüsse der gesamten Wertschöpfungskette (Wiendahl & Lutz 2002, S. 574). Ein WSN ist ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen zur Wertschöpfung, die aus der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit entstehen (Bach & Brehm et al. 2012, S. 105). Zuletzt ist ein GPN definiert als Zusammenschluss geographisch verteilter, unabhängiger Produktionseinheiten, die über Material-, Informations- und Finanzflüsse miteinander verbunden sind, mit dem Ziel der Lieferung von Produkten und verbundenen Dienstleistungen (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 824, Váncza 2016, S. 1). GPN beinhalten somit neben dem fokalen Unternehmen insbesondere auch externe Lieferanten sowie Sammel- und Rückgewinnungsstandorte (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 824 f., Olhager & Pashaei et al. 2015, S. 138 f., Sydow 2010, S. 382, Melo & Nickel et al. 2009, S. 402).

Aufgrund der erläuterten Komplexität und Herausforderungen rückwärtsgerichteter Logistiksysteme ist eine integrierte Betrachtung der relevanten Material- und Informationsflüsse über alle Stufen hinweg notwendig. Um die entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit fokussierte MRP zu verbessern, ist somit sowohl eine inter-organisationale Betrachtung, d. h. die Berücksichtigung aller Akteure entlang der RL, als auch der Fokus auf das fokale Remanufacturing-Unternehmen notwendig. Aus Gründen der Konsistenz wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff RL verwendet.

2.1.2.2 Unterscheidung verschiedener Akteure

Die Besonderheiten des Remanufacturings bzw. der RL im AA wurden u. a. von Duberg & Johansson et al. (2020), Singhal & Tripathy et al. (2020), Sundin (2019), Yang (2019), Östlin

(2008), Kalverkamp & Raabe (2018) und Casper (2021) untersucht. Hierzu gehören u. a. die folgenden Merkmale (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 113 ff., Yang 2019, S. 180, Parker & Riley et al. 2015, S. 40, Casper 2021, S. 76):

- hohe Systemkomplexität aufgrund verschiedener Akteure, Ziele und Strategien und des daraus resultierenden Wettbewerbs
- hohe Marktkonzentration aufgrund unterschiedlicher Unternehmensgrößen
- kostengünstige Produktimitationen von Drittanbietern
- illegale Exporte oder Demontage von Gebrauchtfahrzeugen (ELV, engl. "End-of-Life Vehicle")
- vergleichsweise hohe Lohnkosten im Automobilsektor in Europa
- internationale Handelsbarrieren für Cores und aufgearbeitete Produkte
- die mit dem Wandel des Automobilsektors zur Elektromobilität einhergehenden Herausforderungen bzgl. der Notwendigkeit neuer Aufarbeitungsprozesse, dem Transport und Umgang mit Gefahrgütern, sowie die Unsicherheit bzgl. zukünftiger Entwicklung des Markts

Die in der RL im AA relevanten Akteure sind in Abbildung 2.1 dargestellt und lassen sich in die drei Stufen der *Sammlung und Sortierung*, des *Remanufacturing* sowie der *Distribution* einteilen.

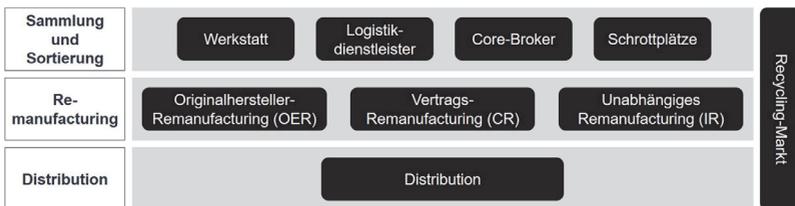


Abbildung 2.1: Unterscheidung verschiedener Akteure in der Rückführungslogistik, in Anlehnung an Kalverkamp (2018), Kalverkamp & Raabe (2018) und Guidat & Uoti et al. (2015).

Für den Erwerb, das Sammeln, und das Sortieren der Cores sind dabei *Werkstätten*, *Logistikdienstleister*, *Core-Broker* oder *Schrottplätze* zuständig (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 119, Inmar Reverse Logistics 2009, S. 3 f., Lind & Olsson et al. 2014, S. 4, Sundin & Dunbäck 2013, S. 4). Core-Broker nehmen dabei als zwischengeschaltete Großhändler eine spezielle Rolle ein, da sie potentiell als ausgleichender Akteur agieren können (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 126). Die Logistikdienstleister wiederum übernehmen lediglich die operativen und meist ausgelagerten Logistikprozesse (Guidat & Uoti et al. 2015, S. 687). Mar-

kengebundene (autorisierte) und unabhängige Werkstätten übernehmen Dienstleistungen für Endkonsumenten von Fahrzeugen und bauen hierzu defekte Komponenten von Fahrzeugen aus bzw. neue oder aufgearbeitete Komponenten wieder ein. Sie sind somit aus Sicht eines Remanufacturing-Unternehmens sowohl Kunden für neue oder aufgearbeitete Komponenten, als auch Lieferant für Cores (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 119). Schrottplätze übernehmen lediglich letzteres, d. h. sie sind Lieferant für Cores, ohne jedoch aufgearbeitete Produkte nachzufragen (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 119).

Auf der Stufe der Remanufacturing-Akteure kann weiterhin zwischen *Originalhersteller-Remanufacturing* (OER, engl.: "Original Equipment Remanufacturing"), *vertragsgebundenem Remanufacturing* (CR, engl.: "Contracted Remanufacturing") und *unabhängigem Remanufacturing* (IR, engl.: "Independent Remanufacturing") unterschieden werden (Guidat & Uoti et al. 2015, S. 686, Amezcua & Bras 1996, S. 6, Parker & Riley et al. 2015, S. 30). Dabei agieren OERs betriebsintern, d. h. es werden ausschließlich eigene Produkte für die Aufarbeitung zurückgenommen (Lange 2017, S. 16). IRs hingegen kaufen Cores selbst ein und arbeiten sie für den Weiterverkauf auf (Matsumoto & Ijomah 2013, S. 395). Aufgrund geringer oder keiner Interaktion mit dem OEM liegen dabei benötigte Produktinformationen i. d. R. nicht vor und müssen mittels *reverse engineering* ermittelt werden (Matsumoto & Ijomah 2013, S. 395 f., Lange 2017, S. 16). CRs umgehen diese Herausforderungen, indem sie durch Lizenz- und Vertragsvereinbarungen mit einem OEM die Aufarbeitung von Cores übernehmen (Matsumoto & Ijomah 2013, S. 396). Die Grenzen zwischen diesen Gruppen sind fließend, so kann beispielsweise ein CR auch unabhängig Cores vom Markt kaufen, diese unter eigenem Namen aufarbeiten und somit als IR agieren (Lange 2017, S. 17 f., Sundin & Östlin et al. 2008, S. 538 f.).

Weiterhin sind an einer RL Unternehmen beteiligt, die für die *Distribution* und somit die Befriedigung der Nachfrage auf den Absatzmärkten zuständig sind. Im AA ist dabei der automobiler Ersatzteilmarkt relevant (Steinhilper & Weiland 2015, S. 771). Zuletzt ist der *Recycling-Markt* beteiligt, der die Verarbeitung von Cores übernimmt, die für das Remanufacturing ungeeignet sind und somit auf allen drei Stufen zum Einsatz kommt (Kalverkamp 2018, S. 1127).

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf dem OER, da i. d. R. nur für diese die in Kapitel 5 getroffenen Annahmen hinsichtlich der Verfügbarkeit notwendiger Zusatzinformationen (z. B. Stammdaten wie Material- und Stücklisten) bei der Aufnahme von produktspezifischen Informationen gilt. Die übergeordneten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit können jedoch auch auf andere Arten von Remanufacturing-Unternehmen übertragen werden.

2.1.2.3 Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Rückführungslogistik

Aufgrund der großen Anzahl an beteiligten Akteuren in der RL steigt auch dessen Komplexität, insbesondere hinsichtlich der Planungs- bzw. Steuerungsaufgaben (Guide & van Wassenhove 2009, S. 12, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 5). Für die Berücksichtigung der RL ist eine Erweiterung der Supply Chain-Planungsmatrix von Fleischmann & Meyr et al. (2008) notwendig, welche ursprünglich die vier Hauptprozessschritte eines produzierenden Unternehmens, d. h. Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz, umfasst (Fleischmann & Meyr et al. 2008, S. 87): Die Erweiterung betrifft das *Management des Produktrückflusses*, die *Aufarbeitungsprozesse*, sowie das *Remarketing* bzw. die *Reintegration* der aufgearbeiteten Produkte in den (Sekundär-) Markt (Nuss & Sahamie et al. 2015, S. 420). Unterschieden wird dabei zwischen lang-, mittel- und kurzfristiger Planung bzw. Steuerung (vgl. Abbildung 2.2). Für eine vollständige Übersicht und detaillierte Erläuterung aller Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL sei auf Nuss & Sahamie et al. (2015) verwiesen.

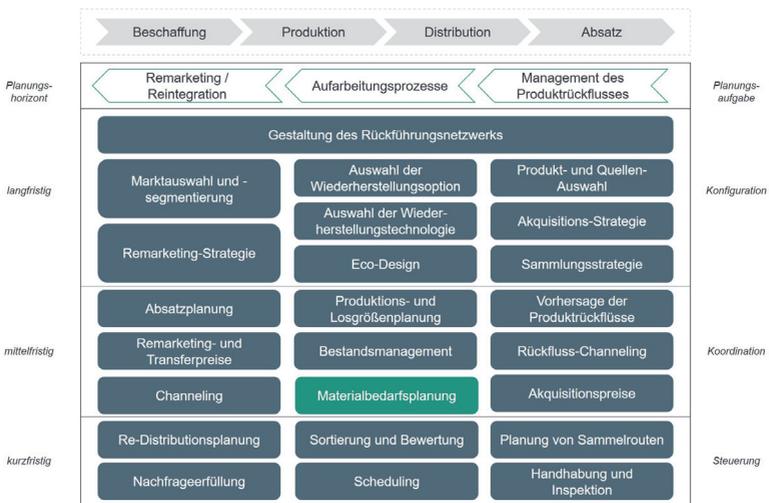


Abbildung 2.2: Matrix der Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Rückführungslogistik, in Anlehnung an Nuss & Sahamie et al. (2015).

Die *Materialbedarfsplanung*, welche im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, lässt sich dabei der mittelfristigen Planungsebene und somit der Koordination zuordnen (Nuss & Sahamie et al. 2015, S. 423). Aufgrund dieses Zeithorizonts liegt der Fokus der mittelfristigen Aufgaben im Allgemeinen auf der möglichst kosteneffizienten Nutzung vorhandener Kapazitäten (Gotzel & Inderfurth 2002, S. 101, Nuss & Sahamie et al. 2015, S. 425 f.).

2.1.3 Materialbedarfsplanung

Die MRP ist ein Teilgebiet der *Beschaffung*, welche definiert ist als "alle Maßnahmen zur Versorgung des Unternehmens mit jenen Produktionsfaktoren, die nicht selbst erstellt werden", d. h. die Bereitstellung von Personal, Anlagen, Kapital, Material und Informationen (Kummer & Grün et al. 2013, S. 114, Lasch 2021, S. 2). Ziel ist es, die richtigen Güter bzw. Dienstleistungen, in der richtigen Art, Menge und Qualität zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort zu möglichst geringen Kosten bereitzustellen (Lasch 2021, S. 2 f.). Dabei gilt es neben ökonomischen Zielgrößen auch ökologische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen (Lasch 2021, S. 268). Die MRP beschäftigt sich mit der Ableitung konkreter Bedarfe der in das Endprodukt eingehenden Erzeugnisse (Komponenten, Module, Einzelteile, Rohstoffe) nach Art, Menge und Termin aus der Produktionsprogrammplanung (Lasch 2021, S. 115).

Im Remanufacturing stellt der Austausch von fehlenden, verschlissenen oder veralteten Teilsystemen oder Komponenten eines Cores einen essentiellen Prozessschritt dar (Thierry & Salomon et al. 1995, S. 119, Khor & Udin 2012, S. 7, Abbey & Guide 2018, S. 374 f.). Hierzu ist es notwendig, neu produzierte Teilsysteme bzw. Komponenten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Zielgrößen und der erläuterten Unsicherheiten zu beschaffen und zu lagern (Ferrer & Whybark 2001, S. 114 f., Guide 2000, S. 473, Thevenin & Adulyasak et al. 2021, S. 475, Casper 2021, S. 75). Die folgenden Abschnitte erläutern hierzu die notwendigen Grundlagen hinsichtlich der Klassifikation von Materialien, der Bedarfsermittlung und Bestellmengenplanung sowie bestehender Bestellpolitiken. Abschließend wird auf die Besonderheiten der MRP im Remanufacturing eingegangen.

2.1.3.1 Klassifikation von Materialien

Aufgrund der in der Praxis üblicherweise großen Anzahl zu beschaffender Güter ist es nicht möglich, alle Bedarfe mit der gleichen Genauigkeit zu planen (Lasch 2021, S. 116). Daher wird im Folgenden ein Verfahren zur Klassifikation von Materialien sowie geeignete Strategien zur Bedarfsermittlung vorgestellt.

Der *Materialwert* und das *Beschaffungsrisiko* bestimmen maßgeblich über den Anspruch auf Genauigkeit und Dispositionsaufwand (Lasch 2021, S. 116). Eine Kombination aus ABC- und XYZ-Analyse kann entscheidungsunterstützend hinzugezogen werden, wobei erstere die Materialien entsprechend ihres Wert-Mengen-Verhältnisses und letztere hinsichtlich der Vorhersagbarkeit der Bedarfe klassifiziert (Lasch 2021, S. 116 ff.). Tabelle 2.1 veranschaulicht dabei das Ergebnis, woraus sich eine erste Indikation bzgl. Beschaffungsform und Dispositionsmethode ableiten lässt (Lasch 2021, S. 123). Aufgrund unsicherheitsbehalteter, schwankender und somit schwierig prognostizierbarer Bedarfe im Remanufacturing (vgl. Kapitel 2.1.1) sind die im Fokus dieser Arbeit stehenden Bereiche grau eingefärbt.

Tabelle 2.1: Kombination aus ABC- und XYZ-Analyse, in Anlehnung an Lasch (2021)

	A Hoher Wert	B Mittlerer Wert	C Geringer Wert
X Stetiger Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Programmgesteuerte Disposition • Kein / geringer Sicherheitsbestand • Produktionssynchrone Beschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Programm- / verbrauchsgesteuerte Disposition • Geringer Sicherheitsbestand • Produktionssynchrone Beschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgesteuerte Disposition • Mittlerer Sicherheitsbestand • Automatisierte Beschaffung zu festen Zeitpunkten & Mengen
Y Schwankender Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Programmgesteuerte Disposition • Geringer Sicherheitsbestand • Produktionssynchrone Beschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Programm- / verbrauchsgesteuerte Disposition • Mittlerer Sicherheitsbestand • Bestandsbezogene Beschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgesteuerte Disposition • Mittlerer / hoher Sicherheitsbestand • Vorratsbeschaffung
Z Sporadischer Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Personelle Disposition • Mittlerer Sicherheitsbestand • Schnelle Abrufbarkeit sichern 	<ul style="list-style-type: none"> • Programmgesteuerte / personelle Disposition • Hoher Sicherheitsbestand • Vorratsbeschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Programm- / verbrauchsgesteuerte Disposition • Hoher Sicherheitsbestand • Vorratsbeschaffung

Für Materialien mit einem hohen Wertanteil wird dabei häufig auf die *programmorientierte* und für Materialien mit geringem Wertanteil auf die *verbrauchorientierte Bedarfsermittlung* zurückgegriffen (Kummer & Grün et al. 2013, S. 127 ff., Lasch 2021, S. 124). Voraussetzung für die deterministische, programmorientierte Bedarfsermittlung ist jedoch ein prognostizierbarer Primärbedarf anhand fester Kundenaufträge oder Produktionspläne (Wannenwetsch 2014, S. 77, Lasch 2021, S. 132). Im Gegensatz dazu wird bei der verbrauchorientierten Bedarfsermittlung der zukünftige Materialbedarf prognostiziert und kommt auch dann zur Anwendung, wenn programmorientierte Verfahren nicht wirtschaftlich oder aufgrund von Unsicherheiten nicht anwendbar sind (Kummer & Grün et al. 2013, S. 127 ff., Lasch 2021, S. 156). Letzteres hat aufgrund der charakteristischen Eigenschaften des Remanufacturings eine höhere Relevanz und wird somit fokussiert.

2.1.3.2 Bedarfsermittlung und Bestellmengenplanung

Die Grundlage im Rahmen der MRP ist die Ermittlung des Bedarfs für einen definierten Zeitraum (Kummer & Grün et al. 2013, S. 114 f.). Unterschieden wird dabei in *Primär-, Sekundär-,* und *Tertiärbedarf* (Lasch 2021, S. 115). Der Primärbedarf ist mit der Nachfrage nach Endprodukten am Markt gleichzusetzen und beschreibt somit den Bedarf an verkaufsfähigen Produkten (Lasch 2021, S. 115). Als Sekundärbedarf werden die für die Produktion notwendigen Baugruppen, Komponenten und Rohstoffe bezeichnet, die aus Stücklisten abgeleitet oder mittels statistischer Schätzung ermittelt werden (Kummer & Grün et al. 2013, S. 131). Sonstige Hilfs- und Betriebsmittel werden dem Tertiärbedarf zugeordnet (Wannenwetsch 2014, S. 66, Lasch 2021, S. 131). Darüber hinaus erfolgt eine Einteilung in *Brutto- und Nettobedarf*: Der Bruttobedarf setzt sich dabei aus der Summe von periodenbezogenem Primär-, Sekundär- und Tertiärbedarf zusammen (Lasch 2021, S. 131). Durch Subtraktion der aktuellen Lagerbestände und erwarteten Lagerzugänge, sowie Addition der erwarteten Lagerabgänge wird der Nettobedarf ermittelt (Lasch 2021, S. 131).

Das Ergebnis der Bedarfsermittlung bildet das Fundament für die Bestellmengenplanung (Wannenwetsch 2014, S. 77). Da mit der Bedarfsermittlung jedoch weder Verkaufsbedingungen mit Lieferanten, noch Kosten für eine Bestellung berücksichtigt werden, erfolgt die Bestellmengenplanung separat (Kummer & Grün et al. 2013, S. 127 ff.). Hierzu ist die Bestimmung der kostenoptimalen Bestellmenge unter Berücksichtigung von Bestell-, Fehlmengen-, und Lagerkosten sowie einer Bedarfsschätzung notwendig (Wannenwetsch 2014, S. 77 f.). Ebenso müssen der aktuelle Lagerbestand sowie der Verbrauch bis zum Eintreffen der Bestellung berücksichtigt werden. Abbildung 2.3 stellt die wichtigsten Begriffe im Rahmen der Bestellmengenplanung dar.

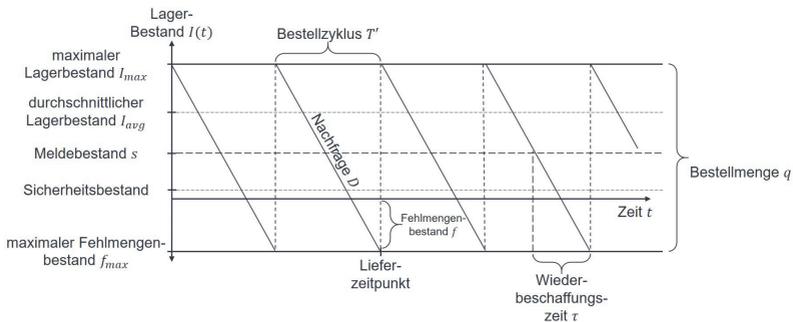


Abbildung 2.3: Begriffe aus der Bestellmengenplanung, in Anlehnung an Kummer & Grün et al. (2013), Lasch (2021) und Wannenwetsch (2021).

Die Nachfragerate D pro Zeiteinheit ist in deterministischen Modellen bekannt und konstant. In stochastischen Modellen ist diese Nachfragerate nur anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmbar und somit zu Beginn i. d. R. unbekannt (Lasch 2021, S. 243, Wannenwetsch 2021, S. 86 ff). Um diese Nachfrage zu bedienen, wird sich dem Lager bedient, welches einen maximalen Lagerbestand I_{max} und einen durchschnittlichen Lagerbestand I_{avg} besitzt (Wannenwetsch 2021, S. 69 f.). Sobald die Nachfrage den Lagerbestand übersteigt, entsteht ein Fehlmengenbestand f bis zum maximalen Fehlmengenbestand f_{max} , der entweder nachträglich erfüllt werden muss (engl. "backorder") oder zu verllorener Nachfrage (engl. "lost sales") führt (Lasch 2021, S. 213). Um dies zu verhindern, wird eine untere Schranke in Form eines Bestell- bzw. Meldebestands s eingeführt, zu welcher eine neue Bestellung über q Mengeneinheiten getätigt wird (Lasch 2021, S. 244). Die Liefer- bzw. Wiederbeschaffungszeit τ sowie die Risikoaversion bzw. der angestrebte Servicegrad werden in dem Meldebestand s berücksichtigt (Kummer & Grün et al. 2013, S. 127 ff., Lasch 2021, S. 243 f.). Die Zeitspanne zwischen zwei Bestellungen wird als Bestellzyklus T' bezeichnet.

Das *Economic Order Quantity* (EOQ)-Modell ist eines der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Modelle zur Bestimmung der optimalen Bestellmenge und des optimalen Bestellzeitpunkts (Lasch 2021, S. 219, Andler 1929, Harris 1915, Stefanic-Allmayer 1927). Demnach wird die Bestellmenge q in Abhängigkeit der durchschnittlichen Lagerhaltungskosten c_h , der konstanten Nachfrage D , sowie der bestellfixen Kosten c_K wie folgt berechnet (Lasch 2021, S. 220):

$$q = \sqrt{\frac{2 \cdot c_K \cdot D}{c_h}} \quad 2.1$$

Diese Formel kann als Grundlage für die Bestimmung der Bestellmengen und -zeitpunkte im Rahmen der Bestellpolitiken verwendet werden, welche im Folgenden vorgestellt werden.

2.1.3.3 Bestellpolitiken

Nachdem im Rahmen der Bedarfsermittlung und Bestellmengenplanung die Materialbedarfe für die zukünftigen Perioden ermittelt wurden, wird im Rahmen der Lagerhaltung bzw. Bestellpolitiken bestimmt, wann und wie viel bestellt werden soll (Lasch 2021, S. 211). Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht somit die Bestimmung optimaler Bestellzeitpunkte und -mengen (Lasch 2021, S. 211) für notwendige Neukomponenten im Remanufacturing, wobei als Entscheidungskriterium die Kosten und als zusätzliches Vergleichskriterium ökologische Aspekte herangezogen werden.

Bei Bestellpolitiken wird zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterschieden, wobei erstere bei einer programmorientierten (deterministischen) und letztere bei einer verbrauchsorientierten (stochastischen) Bedarfsermittlung zum Einsatz kommen (Lasch 2021, S. 211). Weiterhin wird zwischen statischen (konstanter Bedarf) und dynamischen (veränderlicher Bedarf) Bestellpolitiken unterschieden, wobei jeweils unterschiedliche Lösungsverfahren für den 1- und den n-Produkt-Fall existieren. (vgl. Abbildung 2.4, Lasch 2021, S. 211 ff., Domschke & Scholl et al. 1997). Aufgrund der bereits erläuterten Unsicherheiten bei der Bedarfsplanung im Remanufacturing sind insbesondere die verbrauchsorientierten und somit stochastischen Bestellpolitiken relevant. Diese werden bei Produkten oder Komponenten mit unbekanntem Bedarf eingesetzt und eignen sich somit für die Anforderungen im Remanufacturing (Lasch 2021, S. 243).

Der Bestellzeitpunkt und die Bestellmenge stellen dabei wesentliche Gestaltungshebel für die MRP dar (Brabänder 2020, S. 27 ff., Lasch 2021, S. 251). Bei den stochastischen Bestell-

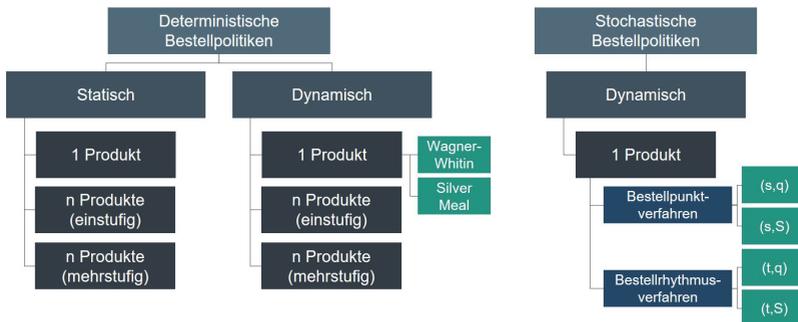


Abbildung 2.4: Klassifikation von Bestellpolitiken, in Anlehnung an Lasch (2021) und Domschke & Scholl et al. (1997).

politiken werden die Bestellrhythmus- und die Bestellpunktverfahren unterschieden (Lasch 2021, S. 251).

Bei den *Bestellpunktverfahren* liegt der Fokus auf dem Meldebestand s (Lasch 2021, S. 251). Dabei wird zwischen der (s,q) - und der (s,S) -Politik unterschieden (Lasch 2021, S. 252 f.). Bei der (s,q) -Politik wird bei Erreichen des Meldebestands s eine Bestellung in Höhe von fixen q Mengeneinheiten ausgelöst, während bei der (s,S) -Politik die Bestellmenge variabel so gewählt wird, dass der Ziellagerbestand S erreicht wird (Lasch 2021, S. 252 f.). Zur Umsetzung beider Bestellpolitiken wird eine kontinuierliche Bestandskontrolle bei Entnahme aus dem Lager angenommen, wobei der Meldebestand s so zu wählen ist, dass der Bedarf innerhalb der Wiederbeschaffungszeit gedeckt werden kann, ohne dass Fehlmengen entstehen (Lasch 2021, S. 251 ff.).

Bei den *Bestellrhythmusverfahren* liegt der Fokus auf dem Bestell- bzw. Überwachungsintervall t (Lasch 2021, S. 254 ff.). Dabei wird zwischen der (t,q) - und der (t,S) -Politik unterschieden (Lasch 2021, S. 255 ff.). Im Gegensatz zum Meldebestand existiert hierbei ein sog. Überwachungsintervall t , nach dessen Ablauf bei der (t,q) -Politik die Bestellmenge q bzw. bei der (t,S) -Politik die Auffüllung des Lagerbestands auf den Ziellagerbestand S erfolgt (Lasch 2021, S. 254 ff.). Diese Verfahren besitzen keine kontinuierliche Bestandsüberwachung und daher ein großes Risiko von Fehlmengen oder Überlagerbeständen, sofern das Überwachungsintervall t zu groß bzw. zu klein gewählt wurde (Lasch 2021, S. 254).

Neben den stochastischen Bestellpolitiken ist das *Wagner-Whitin*-Modell eines der bekanntesten *deterministischen* Verfahren (Wagner & Whitin 1958), welches alle Bedarfe der Planungsperiode zu Beginn benötigt und daher für den praktischen Einsatz unter Unsicherheit

mangels Echtzeitfähigkeit unpraktikabel erscheint. Es wird jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Benchmark gegenüber den stochastischen Bestellpolitiken verwendet. Für die exakte Lösung des Modells kann das *Kürzeste-Wege-Problem* genutzt werden. Hierzu wird ein Graph $G = (V, E, e)$ erzeugt, der für jede Periode t einen Knoten sowie einen weiteren fiktiven Knoten $T + 1$ als Senke enthält. Für jede Periode t und jede Periode $\tau > t$ wird der Graph um jeweils eine Kante ergänzt. Dabei entspricht die jeweilige Kante der Bestellung der Bedarfe von t bis $\tau - 1$ in der Periode t . Die Gewichtungen der Kanten e spiegeln die Kosten bestehend aus bestellfixen und Lagerhaltungskosten wider. Die optimale Lösung des Problems wird mittels Bestimmung des kostenoptimalen Weges durch den Graphen berechnet.

Neben den exakten Verfahren können heuristische Verfahren verwendet werden, die ein iteratives Vorgehen zur Bestimmung einer zulässigen Lösung verwenden. Bei der *Silver-Meal-Heuristik* (SM) bspw. wird beginnend bei Periode $t = 1$ die Bestellmenge so lange um die Bedarfsmenge der Folgeperiode erhöht, bis die durchschnittlichen Kosten pro Komponente und Periode der Folgeperiode die der aktuellen Periode übersteigen. Bei Erreichen des Abbruchkriteriums wird eine Bestellung ausgeführt und eine weitere Bestellung, beginnend mit dem Bedarf der Periode, die zum Abbruch führte, als neuer Ausgangspunkt verwendet (Domschke & Scholl et al. 1997; Fandel & Fistek et al. 2011). Das iterative Vorgehen der Heuristik ermöglicht es, dass nicht alle Bedarfe zu Beginn des Planungszeitraums bekannt sein müssen und somit ein echtzeitfähiges Vorgehen möglich ist, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wird.

2.1.3.4 Besonderheiten der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing

Die multidimensionalen Unsicherheiten hinsichtlich Zeitpunkt, Menge und Qualität der zurückgeführten Cores verursachen große Herausforderungen für die MRP im Remanufacturing (Ferrer & Whybark 2001, S. 114, Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 3238, Golinska-Dawson & Kawa 2011, S. 455 f.). Wie dargestellt, werden Materialbedarfe je nach Klassifikation der Materialien üblicherweise auf Grundlage von Absatzprognosen (verbrauchsorientiert) oder konkreten Lieferaufträgen durch Stücklistenauflösung (programmorientiert) berechnet. Obwohl auch für die im Remanufacturing aufgearbeiteten Produkte Stücklisten beim OER i. d. R. existieren (Ferrer & Whybark 2001), erscheint aufgrund der vorherrschenden Unsicherheiten und damit verbundenen unsicheren Rückflüsse von Cores die verbrauchsorientierte Bedarfsermittlung für Neukomponenten im Remanufacturing als zielführender. Dabei ist insbesondere für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevante MRP von fehlenden, verschlissenen oder veralteten Teilsystemen bzw. Komponenten eines Cores die Berücksichtigung der zugrunde liegenden Produktstruktur essentiell, da jede Komponente eines Cores zu einem unterschiedlichen Ergebnis hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit führen

kann (Zhang & Guan et al. 2019, S. 59 f., Ferrer & Whybark 2001, S. 114 f.). Hierzu kann die in Kapitel 2.1.1 eingeführte *Regenerationsrate* je Komponente verwendet werden (Ferrer & Whybark 2001, S. 119 f., Casper 2021, S. 75, Golinska-Dawson & Kawa 2011, S. 459). Aus der aggregierten Gegenwahrscheinlichkeit der Regenerationsrate lässt sich somit der Bedarf an notwendigen Neukomponenten abschätzen. Zur Bestimmung konkreter Bestellzeitpunkte und -mengen bieten sich im Remanufacturing insbesondere stochastische Bestellpolitiken, z. B. Bestellpunkt- oder Bestellrhythmusverfahren, an.

Aufgrund der hohen Unsicherheit, mit der die Regenerationsrate behaftet ist, erfolgt die MRP im Remanufacturing heutzutage i. d. R. jedoch manuell, da bestehende ERP-Systeme mit diesen Unsicherheiten sowie der geringen Datenverfügbarkeit nicht umgehen können (Thevenin & Adulyasak et al. 2021, S. 475, Chevreux & Hu et al. 2018). Eine vielgetroffene Annahme in der Literatur ist daher die Nutzung einer statischen bzw. durchschnittlichen Regenerationsrate (Ferrer & Whybark 2001, S. 119 f., Östlin 2008, S. 46, Zhang & Guan et al. 2019, S. 67 ff., Guide 2000, S. 474). In der Praxis basiert diese auf Erfahrungs- bzw. Vergangenheitswerten und wird bspw. für alle Komponenten eines Typs als einheitlich angenommen (Östlin 2008, S. 46, Zhang & Guan et al. 2019, S. 67 ff.). Da aufgrund der Ungenauigkeit dieser Durchschnittswerte entsprechend hohe Sicherheitsbestände vorgehalten werden müssen, um die Nachfrage bedienen zu können, führt diese Vorgehensweise zu hohen Beständen sowie resultierenden hohen Kosten, ist fehleranfällig und schöpft nicht das Potential aus, das durch einen höheren Informationsaustausch in der RL möglich wäre (Golinska-Dawson & Kawa 2011, S. 456 ff., Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6). Die vorliegende Arbeit widmet sich diesen potentiellen Effizienzsteigerungen in der MRP bedingt durch einen höheren Informationsaustausch zwischen Akteuren in der RL bzgl. der Regenerationsraten der Komponenten zurückfließender Cores. Um die multidimensionalen Unsicherheiten in der RL zu berücksichtigen wird ein Konzept entwickelt, welches instanzindividuelle Regenerationsraten der Komponenten berücksichtigt und diese bei der Aufnahme neuer Informationen regelmäßig aktualisiert. Somit erfolgt eine bessere Vorhersage des Rückflusses an wiederverwendbaren Komponenten, wodurch wiederum die MRP verbessert werden kann.

2.2 Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken

Ein effizienter Informationsaustausch gilt als ein entscheidendes Werkzeug, um Unsicherheiten in Produktions- und Logistiksystemen zu reduzieren (Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6). Eine verbesserte Koordination der Netzwerkakteure mittels Informationsaustausch gilt darüber hinaus als Ausgangspunkt für die Optimierung der Lieferkette im Allgemeinen bzw. der Rückführungslogistik (RL) im Speziellen (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 460). Kapitel 2.2.1 widmet sich daher der Definition und Identifikation kennzeichnender Merkmale von Informationen. Kapitel 2.2.2 erläutert daraufhin mögliche Lösungen der Informations- und

Kommunikationstechnik (IKT) zur technischen Realisierung eines Informationsaustauschs. Kapitel 2.2.3 schließt mit den besonderen Gegebenheiten und Herausforderungen des Informationsaustauschs in der RL.

2.2.1 Definition und Merkmale von Informationen

Zur Definition des Begriffs Information wird auf die sog. Wissenstreppe zurückgegriffen (vgl. Abbildung 2.5). Auf unterster Ebene befinden sich hierbei Zeichen (z. B. Buchstaben, Ziffern), die sich durch eine Ordnungsregel bzw. Syntax in Daten übertragen lassen (North 2011, S. 36, Krcmar 2015, S. 12). Diese Daten werden zu Informationen, wenn ein Bezug bzw. eine Bedeutung vorhanden ist (North 2011, S. 37). *Informationen* können somit als Daten definiert werden, die in einem Bedeutungskontext stehen und aus betriebswirtschaftlicher Sicht zur Entscheidungs- bzw. Handlungsvorbereitung dienen (North 2011, S. 37). Darauf aufbauend bezeichnet Wissen die effektive Vernetzung von Informationen (North 2011, S. 37).

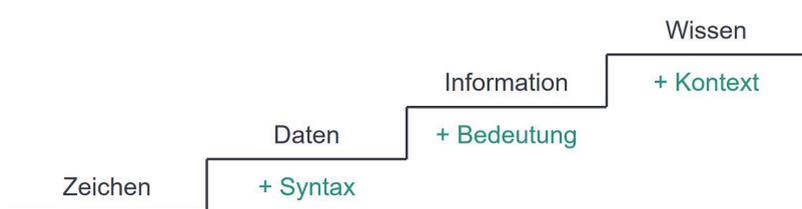


Abbildung 2.5: Ausschnitt aus der Wissenstreppe, in Anlehnung an North (2011).

Informationen können als Produktionsfaktor im Sinne der betrieblichen Leistungserstellung gesehen werden, haben jedoch einige essenzielle Unterschiede (Krcmar 2015, S. 15 f., Piller 2006). Hierzu zählen beispielsweise niedrige Vervielfältigungskosten, (fast) beliebige Teilbarkeit sowie eine einfache Logistik (Krcmar 2015, S. 16). Gleichzeitig sind Informationen jedoch keineswegs freie Güter und können daher einen kostenadäquaten Wert besitzen, wobei die Bestimmung dieses Werts bzw. des Preises häufig nur schwierig möglich ist (Krcmar 2015, S. 16). Da Informationen jedoch dem jeweiligen Verwender einen Nutzen stiften, wenn diese in Handeln umgesetzt werden, lässt sich der Wert beispielsweise anhand des (kumulierten) gestifteten Nutzens der Informationen bemessen (Krcmar 2015, S. 16, S. 161 f.). Dabei kann der Wert dieser Informationen durch Hinzufügen, Selektieren, Konkretisieren und Weglassen verändert und Informationen somit erweitert und verdichtet werden (Krcmar 2015, S. 16). Informationen unterscheiden sich zudem hinsichtlich Qualität, inhaltlicher und zeitlicher Genauigkeit, Vollständigkeit und Zuverlässigkeit (Krcmar 2015, S. 16).

Diesem Verständnis folgend ist ein *Informationssystem* ein System zur Verarbeitung von Informationen, welches alle geregelt betrieblichen und -externen Informationskanäle sowie

deren Infrastruktur zur Informationsgewinnung und -verarbeitung umfasst (Stich & Oedekoven et al. 2013, S. 258 f., Lassmann 2006, S. 291 f.). Die effiziente Gestaltung eines Informationssystems ermöglicht somit die *Transparenzsteigerung* im inner- und überbetrieblichen Kontext, wobei letztere insbesondere bei der informationstechnischen Zusammenarbeit mit Lieferanten und Kunden sowie der Auftrags- und Logistikplanung unterstützt (Stich & Oedekoven et al. 2013, S. 262 ff.). In Anlehnung an Treber (2020) lässt sich dieser Informationsaustausch anhand von fünf Merkmalen charakterisieren (vgl. Abbildung 2.6).

Richtung	Reichweite	Quantität	Aktualität	Qualität
Horizontal 	Bilateral  Multilateral 	Voller Zugang  Eingeschränkt  Kein Zugang 	In Echtzeit  Wiederkehrend  Auf Anfrage 	Hoch  Zufriedenstellend  Unbefriedigend 
Vertikal				

Abbildung 2.6: Merkmale des Informationsaustauschs, in Anlehnung an Treber (2020).

Demnach werden vertikale (innerhalb einer Organisation, Weber & Kummer 1998, S. 28, Wiendahl 2011, S. 297) und horizontale (Austausch zwischen Lieferanten, Produktionsstandorten und Kunden, Weber & Kummer 1998, S. 28) Informationsflüsse unterschieden. Weiterhin beschreibt die Reichweite die Anzahl der an dem Informationsaustausch beteiligten Akteure: In einem bilateralen Austausch erfolgt die Informationsweitergabe lediglich zwischen zwei Akteuren, in einem multilateralen Austausch sind mehr als zwei Akteure involviert (Otto 2002, S. 99, Ostertag 2008, S. 80, Bullinger & Spath et al. 2009, S. 405). Hinsichtlich Quantität lässt sich unterscheiden, welche Menge an Informationen in welchem Umfang mit den Akteuren ausgetauscht werden und somit in keinen, einen eingeschränkten, oder einen vollen Zugang unterschieden werden (Daecke 2013, S. 161, Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601). Weiterhin lässt sich der Informationsaustausch hinsichtlich der Aktualität, d. h. dem Grad der zeitlichen Informationssynchronisierung, in Echtzeit, wiederkehrend oder auf Anfrage unterteilen (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601). In Bezug auf die Qualität der ausgetauschten Informationen werden Zweckerfüllung, Reichhaltigkeit und Aktionsrelevanz verstanden, wobei Informationen als qualitativ hochwertig, zufriedenstellend oder unbefriedigend eingestuft werden können (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601, Eppler 2006, S. 1, Daecke 2013, S. 161).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein *horizontaler, multilateraler Informationsaustausch* fokussiert. Die RL wird dann als *transparent* bezeichnet, wenn außerdem eine hohe Quantität,

Aktualität und Qualität der ausgetauschten Informationen vorliegt. Jede Maßnahme, die dazu beiträgt einen solchen Zustand zu erreichen, wird als Transparenzsteigernd bezeichnet.

2.2.2 Informations- und Kommunikationstechnik

Die steigende Komplexität der Material- und Informationsflüsse hat dazu geführt, dass viele Unternehmen in *Informations- und Kommunikationstechnik* (IKT) zur Bereitstellung von Informationen investieren (Nyhuis 2008, S. 20, Bullinger & Spath et al. 2009, S. 27). Krcmar (2015) definiert diese als "Gesamtheit der zur Speicherung, Verarbeitung und Kommunikation zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie die Art und Weise, wie diese Ressourcen organisiert sind" (Krcmar 2015, S. 24). Die eingesetzten Technologien verbinden somit alle Mitarbeitenden eines Unternehmens sowohl intern, als auch mit externen Lieferanten und Kunden (North 2011, S. 32). Sie führen zu einer stärkeren Vernetzung sowie der Aktivierung von Synergien in Netzwerken (Bullinger & Spath et al. 2009, S. 27).

Innerhalb der IKT lassen sich die *Infrastruktur-* und die *Anwendungssystemebene* unterscheiden (Krcmar 2015, S. 24). Die Infrastrukturebene besteht aus Hard- und Software, die Daten und Informationen verarbeiten, speichern sowie die Kommunikation zwischen Einzelelementen ermöglichen (Krcmar 2015, S. 24). Hierbei kommen i. d. R. Auto-ID-Systeme (z. B. RFID-Chips) zum Einsatz, die sich wiederum in schrift- und symbolbasierte sowie elektronische Systeme unterscheiden lassen (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 816, Helmus 2009, S. 199). Zu den schrift- und symbolbasierten Systemen gehören bspw. die Klarschrifterkennung sowie die Verwendung von Data-Matrix- und Barcodes (Helmus 2009, S. 199, Finkenzeller 2015, S. 2). Magnet- und Chipkarten sowie RFID-Chips sind den elektronischen Auto-ID-Systemen zuzuordnen und zeichnen sich durch eine höhere Reichweite, Informationsdichte sowie Lese- und Schreibgeschwindigkeiten aus (Helmus 2009, S. 199, Finkenzeller 2015, S. 9). Vorzugsweise werden dabei Informationen bzgl. Bezeichnung, Objekttyp, Menge, Bedarfs- und Herkunftsort sowie Ein- bzw. Austrittszeitpunkt ermittelt (Stich & Oedekoven et al. 2013, S. 271).

Die Anwendungssystemebene stellt die Verknüpfung zu Datenbanken her und enthält bspw. das "Enterprise Ressourcen Planning" (ERP), das "Manufacturing Execution System" (MES), Lagerverwaltungssysteme (WMS, engl. "Warehouse Management System") sowie Transportmanagement-Systeme (TMS), welche die unternehmensweite Planung, Steuerung und Überwachung von Beschaffung, Auftragsverwaltung, Produktion, Qualitätssicherung und Verkauf unterstützen (Krcmar 2015, S. 22, Alpar & Alt et al. 2016, S. 32 ff.). Neben diesen betrieblichen Anwendungssystemen existieren außerdem überbetriebliche Anwendungssysteme, die den Informationsaustausch im Netzwerk ermöglichen, z. B. Supply Chain Management Systeme.

me (SCM-Systeme) und Lieferantenmanagement-Systeme (Wannenwetsch 2014, S. 509 ff., Hausladen 2016, S. 89 f.).

Mit dieser Vielzahl an Technologien und Anwendungssystemen lässt sich der Informationsaustausch verbessern und die Informationsübertragungszeit signifikant reduzieren. Die vorliegende Arbeit setzt auf diesen Erkenntnissen auf und untersucht die Rolle eines erhöhten Informationsaustauschs in der RL als Befähiger zur Verbesserung der MRP im Remanufacturing. In Kapitel 7 wird ein Ausblick darauf gegeben, wie das vorgestellte Konzept hinsichtlich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) umgesetzt werden kann.

2.2.3 Informationsaustausch in der Rückführungslogistik

Im Remanufacturing bzw. in der RL werden vier verschiedenen Informationsarten unterschieden: (i) Informationen hinsichtlich der Zusammensetzung der Produkte (Materialien, Mengen, Wert, potentiell gefährliche Eigenschaften, Verbindungstypen), (ii) Informationen über das Ausmaß und die Unsicherheit der Produktrückflüsse, (iii) Informationen über die Märkte für aufgearbeitete Produkte, und (iv) Informationen über die Endverwertung der Produkte und die Abfallwirtschaft (Thierry & Salomon et al. 1995, S. 116). Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. (2015) ergänzen Informationen über das Produktdesign, den Produktionsprozess sowie bzgl. verschiedener Qualitätssicherungsaufgaben während des zirkulären Produktlebenszyklus (CPLC, engl.: "Circular Product Life Cycle"), die sie wiederum in mehrere Unterkategorien einteilen (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015, S. 784). Ebenso werden in der mittlerweile zurückgezogenen Spezifikation PAS 1049 Informationen zum Recycling bzw. zur Wiederverwendung von Produkten angegeben, u. a. zur Art und Menge von Komponenten sowie zur Reihenfolge der Demontage (PAS 1049:2004-12). Die produktspezifischen Informationen zum CPLC stammen von verschiedenen Stakeholdern in der gesamten Wertschöpfungskette, d. h. von der Produktentwicklung, über die Herstellung, den Einsatz des Produkts bis hin zu EoL-Informationen und liegen somit in großen Teilen außerhalb der Kontrolle des Originalherstellers bzw. des Remanufacturing-Unternehmens (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015, S. 780). Für Planungsaufgaben im Remanufacturing bzw. in der RL gilt jedoch, je früher Informationen verfügbar sind, desto effizienter können diese zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden (Abbey & Guide 2018, S. 375).

Die konkrete Nutzung dieser Informationen bringt einige Vorteile mit sich: Übergeordnet stellt eine hohe Transparenz in der RL ein Befähiger zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Attraktivität zirkulärer Geschäftsmodelle insgesamt dar (MacArthur 2013, S. 9). Ein effizienter CPLC-Informationsaustausch kommt allen Stakeholdern zugute und kann somit zu einer höheren Kundenzufriedenheit beitragen (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015, S. 780).

Insbesondere für das Remanufacturing gilt, dass dieser Informationsaustausch einen wichtigen Hebel darstellt, um die multidimensionalen Unsicherheiten hinsichtlich Qualität, Menge und Zeitpunkt der zurückfließenden Cores zu reduzieren und die Planung und Steuerung des Remanufacturings zu verbessern (Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6). Dabei können insbesondere die fortschreitende Digitalisierung und damit verbundene Fortschritte in der IKT genutzt werden, um Produkte und Materialien entlang der Lieferkette und den Produktstatus potentiell sogar während des Gebrauchs zu verfolgen (MacArthur 2013, S. 11, Casper 2021, S. 76). Der Zeitpunkt der Informationsverfügbarkeit entscheidet dabei insbesondere darüber, inwieweit die Planungssicherheit beim Remanufacturing erhöht werden kann (Sundin & Dunbäck 2013, S. 6). Dabei gilt, dass bspw. die Eignung eines Cores für das Remanufacturing so früh wie möglich erfolgen sollte, um unnötige Transporte und zusätzliche Kosten zu vermeiden (Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 5). Weiterhin wurde die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Informationsausprägungen und der Stärke bzw. dem Ort der Auswirkung festgestellt (Okorie & Charnley et al. 2020, S. 11).

Diesen Vorteilen stehen jedoch vielfältige Herausforderungen gegenüber. Aufgrund der Komplexitäten im Material- und Informationsfluss des Remanufacturing-Prozesses erfordern auch zu entwickelnde Lösungen für die Datenerfassung und -verwaltung eine entsprechende Flexibilität (Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015, S. 270, Guide 2000, S. 468 ff., Tolio & Bernard et al. 2017, S. 591 f.). Gleichzeitig führen die Vertraulichkeit von Produkteigenschaften und -informationen sowie die Verteilung der Informationen über alle Unternehmen der Wertschöpfungskette zu Informationsasymmetrien (Tolio & Bernard et al. 2017, S. 588, Guide & van Wassenhove 2001, S. 153). Die mangelnde Aufnahme von Informationen sowie mangelnde Plattformen für den Wissensaustausch bzw. die Informationsübertragung reduzieren die Wirtschaftlichkeit und somit die Attraktivität des Remanufacturings (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015, S. 782, Barquet & Rozenfeld et al. 2013, S. 6). Die mangelnde Verfügbarkeit von Informationen kann zudem zu Verzögerungen im Remanufacturing-Prozess führen (Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 14).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden *produktspezifische Informationen* der Cores bzgl. der Reduktion von Unsicherheiten in der RL fokussiert, die sowohl aus notwendigen Stamminformationen ((i), z. B. Zusammensetzung des Cores), als auch aus CPLC-Informationen ((ii), z. B. zum aktuellen Zustand, Menge und Ort der Cores) bestehen. Entsprechend der Annahme, dass eine frühzeitige Informationsverfügbarkeit einen größeren Nutzen stiftet, wird ein Konzept vorgestellt, welches die Informationen möglichst früh in der RL aufnimmt und verfügbar macht. Mithilfe von Rezeptormodellen wird der spezifische Nutzen einzelner Informationsarten auf ausgewählte Planungs- bzw. Steuerungsaufgaben identifiziert. Mit Hilfe einer dynamischen Modellierung wird zudem der Wert bzw. die Wichtigkeit von Infor-

mationen gegenüber der Menge von Informationen und der Anzahl an Informationsquellen untersucht.

2.3 Simulationsbasierte Optimierung

Aufgrund der Komplexität realer Systeme wie einer Rückführungslogistik (RL) ist es kaum möglich, alle Sachverhalte und Zusammenhänge analytisch zu erfassen und zu berücksichtigen (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 36). Stattdessen erfolgt die Gestaltung, Planung und Steuerung realer Systeme i. d. R. anhand von Modellen (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 36). Ein Modell ist dabei definiert als eine "vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen" (VDI 3633-1, S. 3). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell einer RL mit den relevanten Material- und Informationsflüssen sowie der MRP erstellt. Hierzu erläutert Kapitel 2.3.1 die notwendigen Begriffsdefinitionen. Anschließend geht Kapitel 2.3.2 auf spezifische Kopplungsmethoden zwischen Simulation und Optimierung ein. Kapitel 2.3.3 schließt mit der Vorstellung eines systematischen Vorgehens zur Durchführung von Simulationsstudien und der statistischen Versuchsplanung.

2.3.1 Begriffsdefinitionen

In den folgenden Abschnitten werden Begrifflichkeiten bzgl. Simulation, Optimierung und simulationsbasierter Optimierung definiert.

2.3.1.1 Definition Simulation

Eine Simulation ist nach VDI-Richtlinie 3633 im Umfeld von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen definiert als das "Nachbilden eines realen Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt" (VDI 3633-1, S. 3). Es kann somit als Prognosemodell für komplexe Systeme verstanden werden, um Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu untersuchen, die analytisch aufgrund zufälliger Ereignisse nicht handhabbar sind (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 36). Mithilfe von Simulationsexperimenten können außerdem gezielte empirische Untersuchungen des Verhaltens eines Modells stattfinden, indem Parameter und Strukturvariablen systematisch variiert werden (vgl. Kapitel 2.3.3, VDI 3633-1, S. 3).

Simulationsmodelle lassen sich hinsichtlich spezifischer Eigenschaften charakterisieren (vgl. Tabelle 2.2, Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 15 ff.). Zunächst lassen sich Modelle bzgl. ihres Verhaltens über die Zeit in *statische* und *dynamische* Modelle unterscheiden (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 15). Dynamische Modelle können weiterhin in *kontinuierlich*

und *diskret* bzgl. Zeit und Zustand unterteilt werden (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 15). Bei einer kontinuierlichen Betrachtung der Zeit werden die positiven reellen Zahlen als Zeitmenge T zugrunde gelegt, während bei der diskreten Untersuchung die Zeitmenge T in ihre abzählbare Menge von Zeitpunkten t_1, t_2, t_3, \dots unterteilt wird (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 15 f.). Analog dazu kann auch die Zustandsmenge Z diskret (z. B. Behälter leer oder voll) oder kontinuierliche (z. B. Füllgrad des Behälters) beschrieben werden (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 16). In dynamischen Simulationsmodellen kann weiterhin hinsichtlich der Abbildung von Zufällen in *deterministische* und *stochastische* Modelle unterschieden werden, wobei in letzterem Fall bspw. Systemzustände auf der Basis von Übergangswahrscheinlichkeiten eintreten (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 16). Abschließend werden Simulationsmodelle in (*nicht*) *terminierende* Modelle unterteilt, wobei terminierende Modelle durch definierte Startbedingungen sowie die Existenz eines natürlichen, den Ablauf begrenzenden Ereignisses definiert sind (z. B. Öffnungszeiten, Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 17).

Tabelle 2.2: System- und Modelleigenschaften im Überblick, in Anlehnung an Gutenschwager & Rabe et al. (2017).

Eigenschaft	Ausprägungen	
Zeitverhalten	statisch	dynamisch
Zeitmenge T	diskret	kontinuierlich
Zustandsmenge Z	diskret	kontinuierlich
Abbildung von Zufällen	stochastisch	deterministisch
Terminierung	terminierend	nicht terminierend

Auf Grundlage des gewählten Abstraktionsgrads können die ereignisdiskrete, die agentenbasierte und die “System Dynamics“ Simulation unterschieden werden (vgl. Abbildung 2.7, Grigoryev 2022, S. 13). “System Dynamics“-Simulationen werden meist für strategische Fragestellungen genutzt und arbeiten mit einem hohen Abstraktionsgrad (Grigoryev 2022, S. 13). Prozessorientierte Ansätze mit einem mittleren bis geringen Abstraktionsgrad werden i. d. R. als ereignisdiskrete Simulation modelliert (Grigoryev 2022, S. 13). Das Anwendungsfeld der agentenbasierten Simulation ist sehr umfassend und kann je nach Abstraktionsgrad sowohl physische Objekte (z. B. Produkte) als auch ganze Unternehmen repräsentieren (Borshchev 2013, S. 12).

In der Realität führen die Modellierungsziele, das abzubildende System oder die Verfügbarkeit von Daten häufig zu Herausforderungen, die nur durch die Nutzung von Multi-Methoden Modellen lösbar sind (Borshchev 2013, S. 13 ff.). Ein klassisches Beispiel hierfür stellt die agentenbasierte Simulationsmethode dar: internes Agentenverhalten wird dabei bspw.

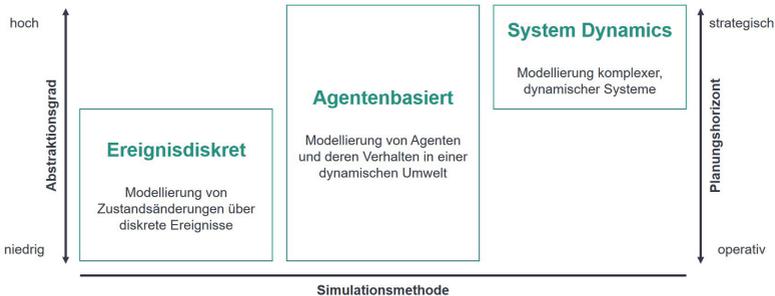


Abbildung 2.7: Unterscheidung verschiedener Simulationsmethoden, in Anlehnung an Law (2015) und Grigoryev (2022).

durch "System Dynamics" oder ereignisdiskrete Modellierungen abgebildet (Grigoryev 2022, S. 14).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein dynamisches Modell mit diskreter Zeit- und Zustandsmenge sowie einer stochastischen Abbildung von Zufällen entwickelt, welches durch definierte Kriterien terminiert. Darüber hinaus ist eine Kombination aus agentenbasierter und ereignisdiskreter Simulation relevant, um den erforderlichen Abstraktions- bzw. Detaillierungsgrad zu erreichen.

Die wesentlichen Vorteile von Simulationen sind ihre geringen Kosten gegenüber einer aufwendigen Umsetzung in der Realität (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 76), die Möglichkeit zur Abbildung komplexer Systeme, die Flexibilität in der Modellierung, sowie die Visualisierung des modellierten Systems (Grigoryev 2022, S. 10 f.). Simulationen werden daher insbesondere in stochastischen und dynamischen Systemen eingesetzt (März & Krug et al. 2011, S. 10). Diesen Vorteilen stehen jedoch Nachteile gegenüber: Die Ergebnisse einer Simulationsstudie bedürfen einer Interpretation, wobei insbesondere bei einer hohen Anzahl an Parametern und teilweise gegenläufigen Verhaltens von Zielgrößen nicht trivial ist, wie die Stellgrößen parametrisiert werden müssen, um gewisse Zielvorgaben bzw. ein "Optimum" zu erreichen (März & Krug et al. 2011, S. 10). An dieser Stelle kann ein Optimierungsmodell unterstützen. Die notwendigen Grundlagen hierzu werden im Folgenden vorgestellt.

2.3.1.2 Definition Optimierung

Optimierung ist ein Teilgebiet des "Operations Research", welches Probleme aus der Realität in quantitative, analytische Modelle überführt, mathematische Ansätze zur Lösung entwickelt und somit gegebene Zielfunktionen minimiert oder maximiert (Stecca & Lanza et al. 2016, S. 1, März & Krug et al. 2011, S. 21). In Erweiterung zu den Ursache-Wirkungs-Beziehungen

einer Simulation enthalten Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle somit eine Zielfunktion zur Bewertung und Auswahl von Handlungsalternativen (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 36). Dabei werden innerhalb der skalaren Optimierung verschiedene Methoden unterschieden, je nachdem ob die verwendeten Parameter, Zielfunktion(en) und Nebenbedingungen stochastisch, deterministisch oder fuzzy sind (vgl. Abbildung 2.8). Im Fokus der vorliegenden Arbeiten steht die deterministische, lineare Optimierung, welche durch eine lineare Zielfunktion und Nebenbedingungen sowie ganzzahlige oder kontinuierliche Entscheidungsvariablen charakterisiert ist (Stecca & Lanza et al. 2016, S. 2 ff.). Für weitere Literatur in diesem Themengebiet sei auf Stecca & Lanza et al. (2016) und Nickel & Stein et al. (2014) verwiesen.



Abbildung 2.8: Optimierungsmethoden innerhalb der skalaren Optimierung, in Anlehnung an Stecca & Lanza et al. (2016).

Die Zielfunktion stellt das zu erreichende Ziel dar, z. B. die Maximierung des Gewinns oder die Minimierung der Kosten, und kann sich aus mehreren Faktoren bzw. Variablen $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, die mit Parametern $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ gewichtet sind, zusammensetzen (Nickel & Stein et al. 2014, S. 8). Die Variablen stellen dabei Entscheidungen dar, z. B. die Produktionsmenge je Periode, und werden dementsprechend Entscheidungsvariablen genannt (Nickel & Stein et al. 2014, S. 8). Nebenbedingungen bzw. Restriktionen enthalten Einschränkungen (z. B. Kapazitäten), die bei der Lösung des Problems eingehalten werden müssen, und können durch (Un-) Gleichungen mit Hilfe des Vektors $b = (b_1, \dots, b_m)^T$ dargestellt werden (Nickel & Stein et al. 2014, S. 8). Sie enthalten dabei neben den Entscheidungsvariablen auch Parameter $A = (a_{i,j})$, mittels derer mögliche Werte und Mengen (z. B. mögliche Standorte) explizit angegeben werden können (Nickel & Stein et al. 2014, S. 8).

Ein lineares Optimierungsproblem in Standardform wird somit wie folgt aufgestellt, wobei "s. t." für "subject to" bzw. "unter den Nebenbedingungen" steht (Nickel & Stein et al. 2014, S. 9 ff.):

$$\begin{aligned} \max c^T x & & 2.2 \\ \text{s. t. } Ax \leq b & & 2.3 \\ x \geq 0 & & 2.4 \end{aligned}$$

Mit Hilfe problemspezifischer Lösungsverfahren lässt sich unter Berücksichtigung der abgebildeten Nebenbedingungen ein zulässiger Lösungsraum für das Entscheidungsproblem bestimmen (Mayer 2011, S. 219). Jede der in diesem Lösungsraum enthaltenen Lösungen steht für eine mögliche Entscheidungsalternative (Mayer 2011, S. 219). Die optimale Lösung wird demnach so ausgewählt, dass ein bestmögliches Verhalten des modellierten Systems erreicht wird (Mayer 2011, S. 219). Bekannte Lösungsverfahren sind bspw. der Simplex-Algorithmus zur Lösung reellwertiger, linearer Optimierungsprobleme sowie das "Branch-and-Bound"-Verfahren zur Lösung gemischt-ganzzahliger, linearer Optimierungsprobleme (Nickel & Stein et al. 2014, S. 22 ff., S. 192 ff.). Ein Problem dieser exakten Lösungsverfahren liegt in dem exponentiellen Rechenaufwand zur Lösung großer Probleminstanzen (Nickel & Stein et al. 2014, S. 215). An dieser Stelle wird häufig auf Heuristiken zurückgegriffen, die eine gute, aber nicht notwendigerweise optimale Lösung eines Problems mit akzeptablem Rechenaufwand ermitteln (Nickel & Stein et al. 2014, S. 215). Im Allgemeinen kann zwar keine Garantie für die Güte der Lösung gegeben werden, jedoch folgen Heuristiken plausiblen und erfolgsversprechenden Vorgehensregeln und sind damit zusätzlich leichter nachvollziehbar (Nickel & Stein et al. 2014, S. 215). Dabei wird in Konstruktionsheuristiken, Verbesserungsheuristiken und Heuristiken zur Bestimmung von unteren oder oberen Schranken unterschieden (Nickel & Stein et al. 2014, S. 215). Für weitere Literatur in diesem Bereich sei auf Nickel & Stein et al. (2014) verwiesen.

Analog zur Simulation haben auch Optimierungsmodelle und -methoden Vor- und Nachteile. Zu den Vorteilen der Optimierung zählt beispielsweise das nachvollziehbare Finden einer optimalen (bzw. im Fall einer Heuristik i. d. R. einer hinreichend guten) Lösung für eine gegebene Problemstellung (März & Krug et al. 2011, S. 11). Demgegenüber steht als wesentlicher Nachteil der hohe Modellierungsaufwand zur Bestimmung von analytischen Zusammenhängen, der insbesondere bei komplexen Problemen meist den Mehrwert übersteigt (März & Krug et al. 2011, S. 31).

2.3.1.3 Definition simulationsbasierte Optimierung

Um die jeweiligen Vorteile von Simulation und Optimierung zu kombinieren bzw. die jeweiligen Nachteile auszugleichen, kann eine simulationsbasierte Optimierung angewendet werden

(März & Krug et al. 2011, S. 3 ff.). Dadurch können einerseits die praxisrelevante Komplexität und Berücksichtigung von Zufallsereignissen (Simulation) und andererseits das Auffinden besserer Lösungen und der Einblick in die Lösungsfindung (Optimierung) ermöglicht werden (März & Krug et al. 2011, S. 31). Ziel der simulationsbasierten Optimierung ist es, verbesserte Einstellungen für Systemparameter unter Berücksichtigung von definierten Zielgrößen zu finden (Fu 2002, S. 193). Die Rolle der Simulation ist dabei die Bewertung des erstellten Szenarios, während die Optimierung die beste Auswahl der Parameter unter einem gegebenen Zielkriterium bestimmt (März & Krug et al. 2011, S. 13 ff.). Abbildung 2.9 stellt den konzeptionellen Zusammenhang von Simulation und Optimierung bei diesem Vorgehen dar (März & Krug et al. 2011, S. 12).

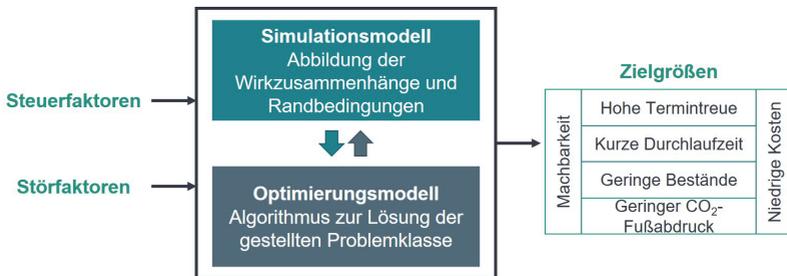


Abbildung 2.9: Konzept der simulationsbasierten Optimierung, in Anlehnung an März & Krug et al. (2011).

Die Auswahl der *Einflussgrößen* (bzw. Steuerfaktoren) ist in engem Zusammenhang mit den Zielgrößen zu treffen (März & Krug et al. 2011, S. 29). Die Anzahl dieser hat direkten Einfluss auf den Rechenaufwand und sollte daher sorgfältig entschieden werden (März & Krug et al. 2011, S. 29). Grundsätzlich wird zwischen drei Arten von Einflussgrößen unterschieden: (i) Parametervariationen (z. B. Veränderungen von Lager- oder Produktionskapazitäten), (ii) Zuordnungen (z. B. Auswahl einer bestimmten Bestellpolitik für einen Netzwerkteilnehmer oder einen Produkttypen) und (iii) Permutationen (z. B. Anzahl möglicher Auftragsreihenfolgen) (März & Krug et al. 2011, S. 29 f.). Im Gegensatz dazu stellen *Störfaktoren* stochastisches Verhalten dar, welche während der simulationsbasierten Optimierung nicht gezielt variiert werden (Kleppmann 2020, S. 13).

Die Festlegung der *Zielgröße(n)* bildet zusammen mit den Einflussgrößen die Grundlage für die Beschreibung der Zusammenhänge in dem modellierten System (März & Krug et al. 2011, S. 30). Dabei gilt es zunächst, die allgemeine *Machbarkeit* des Modells sowie die damit verbundene Gültigkeit der Nebenbedingungen festzustellen. Darauf aufbauend zählen u. a. eine hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeiten und die Minimierung von Beständen zu den

klassischen Zielgrößen im Produktions- und Logistikumfeld (März & Krug et al. 2011, S. 30 f.). Diese münden meist in einer gemeinsamen Zielgröße, z. B. der übergeordneten *Kostenreduktion* (März & Krug et al. 2011, S. 32). Neben kostenbezogenen, ökonomischen Zielgrößen können jedoch auch ökologische Zielgrößen, z. B. die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks, berücksichtigt werden (Buscher 2018, S. 17). Zur konkreten Verknüpfung von Simulation und Optimierung gibt es verschiedene Möglichkeiten, auf die das folgende Kapitel 2.3.2 im Detail eingeht.

2.3.2 Kopplung von Simulation und Optimierung

Simulation und Optimierung können entsprechend ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten, ihrer Relation von Unter- bzw. Überordnung, sowie der zeitlichen Abfolge der Berechnungen entweder sequentiell oder hierarchisch miteinander verknüpft werden, wodurch sich vier grundlegende Kopplungsmethoden ergeben (vgl. Abbildung 2.10, März & Krug et al. 2011, S. 42). In der praktischen Anwendung sind dabei auch Kombinationen aus diesen vier Kopplungsmethoden möglich (März & Krug et al. 2011, S. 42).

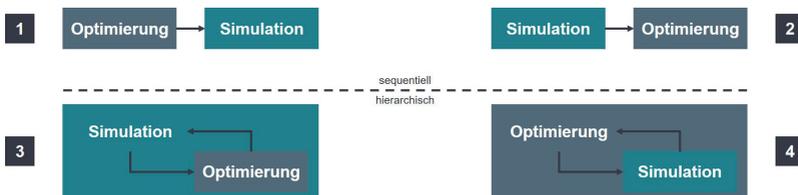


Abbildung 2.10: Kategorisierung der Kopplungsmethoden von Simulation und Optimierung, in Anlehnung an März & Krug et al. (2011).

In der sequentiellen Verknüpfung erfolgt die vollständige Ausführung der einzelnen Phasen ohne zeitliche Überschneidung aufeinander (März & Krug et al. 2011, S. 43 f., VDI 3633-12, S. 4 f.). Im ersten Fall wird dabei zunächst ein Optimum berechnet, welches als Eingangsparameter in der Simulation genutzt wird, um das Systemverhalten detaillierter zu analysieren (VDI 3633-12, S. 5). Im zweiten Fall werden mit Hilfe des Simulationsmodells Parameter ermittelt, die dem Optimierungsmodell übergeben werden können, um den Lösungsraum einzuschränken und somit die Lösungsfindung zu beschleunigen (VDI 3633-12, S. 5). Bei hierarchischen Verknüpfungen werden Optimierung bzw. Simulation jeweils als Submethode während des Ablaufs der Hauptmethode aufgerufen (VDI 3633-12, S. 4). Ist die Optimierung in die Simulation integriert, wird mit dem Optimierungsverfahren der weitere Verlauf der Simulation durch die Auswahl einer geeigneten Alternative bestimmt (VDI 3633-12, S. 6). Hierzu wird der Ist-Zustand des Simulationsmodells an das Optimierungsmodell in Form von Eingangsparametern übergeben, während die von der Optimierung zurückgegebenen

Werte als Entscheidungsparameter in der Simulation dienen (VDI 3633-12, S. 6). Die vierte Kopplungsmethode entspricht der Integration der Simulation in die Optimierung, d. h. mit Hilfe der Simulation lässt sich das dynamische Systemverhalten unter Verwendung der ermittelten Parameter aus dem Optimierungsalgorithmus prognostizieren (VDI 3633-12, S. 6 f.). Diese Simulationsergebnisse werden anschließend bewertet, woraufhin eine Alternativensuche durch das Optimierungsverfahren erfolgt (VDI 3633-12, S. 6 f.).

Tabelle 2.3 stellt eine Auswahl von heuristischen und exakten Verfahren zur Lösung von simulationsbasierten Optimierungsmodellen unter Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen dar (Amaran & Sahinidis et al. 2014, S. 310, März & Krug et al. 2011, S. 11, Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 120 ff.). Die Angabe in der Spalte "Kopplungsmethode(n)" bezieht sich auf die in Abbildung 2.10 vorgestellten Kopplungsmethoden von Simulation und Optimierung. Für eine ausführliche Klassifizierung von Verfahren der simulationsbasierten Optimierung sei auf Figueira & Almada-Lobo (2014) verwiesen.

Tabelle 2.3: Klassifizierung ausgewählter Lösungsverfahren der simulationsbasierten Optimierung, in Anlehnung an Figueira & Almada-Lobo (2014) und Amaran & Sahinidis et al. (2014).

Verfahren	Diskret	Kontinuierlich	Lokal	Global	Kopplungsmethode(n)
Rangbasierte Selektion	x			x	1
Sample Path-Optimierung	x		x		2
Metaheuristiken	x	x		x	1, 3
Zufällige Suche	x		x		1, 3
Stochastische Approximation		x	x		2, 4

Die *rangbasierte Selektion* ist ein Verfahren zur Lösung stochastischer Entscheidungsprobleme, indem verfügbare Alternativen aus einem gegebenen Lösungsraum Θ in eine Reihenfolge gebracht werden (Mayer 2011, S. 221). Die Auswahl wird dann bspw. anhand eines vordefinierten Zielkriteriums oder Konfidenzniveaus getroffen (Mayer 2011, S. 221, Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 121). Die *Sample Path-Optimierung* eignet sich insbesondere für eine sequentielle Verknüpfung von Simulation und Optimierung (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 122). Es wird zunächst eine hinreichend große Anzahl von Szenarien generiert, die die Überführung eines stochastischen Optimierungsproblems in ein deterministisches ermöglichen (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 122). Die Auswertung des Optimierungsmodells erfolgt dann mit Hilfe der zuvor festgelegten und simulierten Szenarien (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 122). Im Kontext der simulationsbasierten Optimierung können *Metaheuristiken* angewendet werden, um die Evaluation der heuristischen Lösung mit Hilfe des Simulationsmodells durchzuführen (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 121, Amaran & Sahinidis et al. 2014, S. 304). Bekannte Vertreter der Metaheuristiken sind bspw. genetische

Algorithmen, die durch Selektion, Mutationen und Kreuzungen einzelner Lösungen den Suchraum definieren und darin eine möglichst gute Lösung suchen (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 121). Bei der *zufälligen Suche* erfolgt, ausgehend von einer Startlösung, die lokale Suche in der Nachbarschaft, wobei die Suchrichtung mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt werden kann (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 121 f., Fu 2002, S. 200 ff.). Zuletzt zählt die *stochastische Approximation* zu den gradientenbasierten Verfahren und kommt dann zum Einsatz, wenn eine analytische Berechnung des Gradienten der Zielfunktion nicht möglich ist (Figueira & Almada-Lobo 2014, S. 122).

Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird eine simulationsbasierte Optimierung verwendet, um einerseits die multidimensionalen Unsicherheiten und komplexen Zusammenhänge in einer RL im Rahmen der Simulation abzubilden und andererseits die MRP im Rahmen der Optimierung durchzuführen. Aufgrund des iterativen Zusammenspiels aus Simulation und Optimierung scheinen hierfür insbesondere hierarchische Verknüpfungsmethoden vielversprechend, in denen die Simulation als Haupt- und die Optimierung als Submethode verwendet wird. Mit Hilfe der rangbasierten Selektion erfolgt daraufhin eine Auswahl einer hinreichend guten und geeigneten Lösung.

2.3.3 Simulationsstudien und statistische Versuchsplanung

Simulationsstudien stellen ein systematisches Vorgehen dar, in dem Simulation eingesetzt wird, um eine vorab definierte Fragestellung zu beantworten (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 141, VDI 3633-1, S. 3 f.). Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird der Begriff äquivalent für die Durchführung von Studien der simulationsbasierten Optimierung verwendet. Der Ablauf einer Simulationsstudie ist in fünf Phasen gegliedert (vgl. Abbildung 2.11, VDI 3633-1, S. 18 ff.). Parallel zu den fünf Phasen erfolgt die Beschaffung und Aufbereitung der für die Simulation benötigten Daten (VDI 3633-1, S. 19). Die Ergebnisse der jeweiligen Phasen unterliegen einer kontinuierlichen Verifikation und Validierung (VDI 3633-1, S. 19 ff.). Im Gegensatz zu der sequenziell dargestellten Reihenfolge kommt es in der Realität i. d. R. zu weiteren Iterationen, bei denen einzelne Phasen wiederholt und erneut durchlaufen werden (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 142 f.).

Im Rahmen der *Aufgabendefinition* wird die mittels Simulation durchzuführende Aufgabe festgelegt und Ziele definiert (VDI 3633-1, S. 21). Dies unterstützt bei der Definition eines effizienten Experimentplans sowie bei der Interpretation der Simulationsergebnisse (VDI 3633-1, S. 21). Im Rahmen der *Systemanalyse* entsteht aus einem gedanklichen ein symbolisches Konzeptmodell, welches zunächst noch nicht ablauffähig oder experimentierbar ist (VDI 3633-1, S. 22). Dabei werden Systemgrenzen sowie ein Detaillierungsgrad gewählt, die zur Beantwortung der mit der Zieldefinition festgelegten Fragestellung nützlich sind (VDI

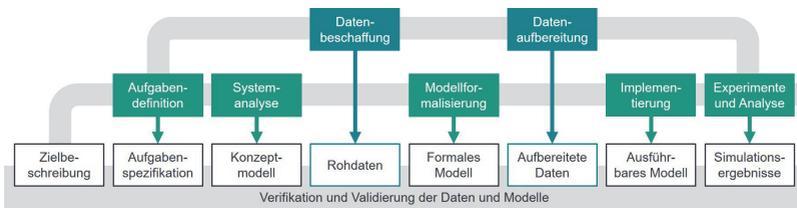


Abbildung 2.11: Ablauf einer Simulationsstudie, in Anlehnung an Gutenschwager & Rabe et al. (2017), VDI 3633-1.

3633-1, S. 22). Die *Modellformalisierung* und *Implementierung* nutzen das erstellte Konzeptmodell für die Umsetzung in ein ablauffähiges und experimentierbares Simulationsmodell (VDI 3633-1, S. 31). Zur Umsetzung werden bspw. Zustandsübergangs- oder Blockdiagramme sowie Entscheidungstabellen für Strategien und Regeln verwendet (VDI 3633-1, S. 31). Die Implementierung kann unter Verwendung einer Programmiersprache oder eines Simulationswerkzeugs erfolgen (VDI 3633-1, S. 31 f.). Die *Datenbeschaffung* und *-aufbereitung* stellt sicher, dass die für die Simulationsstudie notwendigen Daten von Rohdaten in aufbereitete Daten überführt werden (VDI 3633-1, S. 33). Diese Phasen werden parallel zu den bisherigen Phasen durchgeführt, müssen aber zur Implementierung abgeschlossen sein (VDI 3633-1, S. 33). Im Rahmen der *Experimente und Analysen* erfolgt die Definition der zu variierenden Parameterwerte sowie deren Reihenfolge, sodass das Simulationsziel mit möglichst wenigen Simulationsläufen erreicht wird (VDI 3633-1, S. 35). Die Interpretation der Simulationsergebnisse ist besonders essenziell, da diese die Qualität der Rückschlüsse und der abgeleiteten Maßnahmen für die Realität bestimmt (VDI 3633-1, S. 36). Simulationswerkzeuge können dabei über die Bereitstellung der Darstellungsmöglichkeiten Statistik, Monitoring und Animation unterstützen, jedoch obliegt dem Planer die letztliche Interpretation der Ergebnisse (VDI 3633-1, S. 36 f.). Die *Verifikation und Validierung* erfolgt parallel zu allen Phasen und prüft die Richtigkeit und Eignung der Phaseergebnisse (VDI 3633-1, S. 37). Unter Verifikation ist dabei eine umfassende Kontrolle des erstellten Programms auf syntaktische Fehler sowie die formale Korrektheit zu verstehen. Validierung meint die hinreichende Übereinstimmung des Modells bzw. des modellierten Verhaltens mit der Realität bzw. dem realen Verhalten (VDI 3633-1, S. 37).

Die statistische Versuchsplanung (DoE, engl.: "Design of Experiments") ist eine Methode zur effizienten und systematischen Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen für reale Experimente oder Computersimulationen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 1 ff.). Ziel der DoE bei Computersimulationen ist es, einerseits mit möglichst wenigen Simulationsläufen möglichst aufschlussreiche und gehaltvolle Aussagen über die Zusammenhänge

in einem System treffen zu können und andererseits den Vergleich von Simulationsergebnissen durch unterschiedliche Parametereinstellungen zu ermöglichen (Dean & Voss et al. 2017, S. 1 ff.). Dadurch wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Zielgrößen in dem betrachteten System ermittelt (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 5 f., Kleppmann 2020, S. 12). Die Eingangsgrößen werden dabei auch als Faktoren und ihre jeweiligen Ausprägungen als Faktorstufen bezeichnet (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 5 f.).

Zur Gestaltung der Versuchsreihen existieren vielfältige Versuchsdesigns. Bei *vollfaktoriellen Versuchsplänen* werden alle möglichen Kombinationen der Faktorstufen getestet (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 6). Aufgrund der Komplexität und des Aufwands bei einer hohen Anzahl an Faktoren und Faktorstufen werden jedoch i. d. R. *teillfaktorielle Versuchspläne* eingesetzt, um die Zahl der Versuche bei gleichzeitig minimalem Informationsverlust möglichst gering zu halten (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28). Gleichzeitig können damit jedoch Wechselwirkungen zwischen den Faktoren nicht mehr eindeutig zugeordnet werden (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28 f.). *Screening-Versuchspläne* basieren auf der Darstellung eines Versuchsplans als lineares Gleichungssystem, wobei jeder Versuch eine Gleichung liefert (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28 ff.). Bei nicht-linearen Zusammenhängen werden *Versuchspläne mit quadratischem Beschreibungsmodell* verwendet, wobei der Aufwand jedoch enorm ansteigt (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 39 ff., Kleppmann 2020, S. 288). Hierzu existieren bspw. "Central-Composite-Design"- oder "Box-Behnken-Design"-Versuchspläne (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 40 ff.). Bei Computersimulationen bieten sich raumfüllende Versuchspläne (SFD, engl. "Space-Filling-Designs") an, bei denen die zu testenden Faktorkombinationen zufällig im zulässigen Lösungsraum verteilt werden (Law 2015, S. 671 f.). Die Verteilung der einzelnen Faktoren erfolgt dabei häufig gleich- oder normalverteilt (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 189 f.). Ein Vorteil von SFDs liegt darin, dass die zu untersuchenden Faktoren entsprechend ihrem real zu erwartenden Verhalten variiert werden (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 231). Das Monte-Carlo-Verfahren, das Latin-Hypercube-Design oder das Uniform-Design stellen beispielhafte Methoden zur Erzeugung raumfüllender Versuchspläne dar (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 226).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellt der Grad des Informationsaustauschs und die Steuerung der MRP die Eingangsgrößen bzw. Faktoren und die zu entwickelnden Kennzahlen die Zielgrößen dar, für die Wirkzusammenhänge ermittelt werden. Dabei wird das Latin-Hypercube-Design in Kombination mit individuellen Versuchsplänen genutzt, um einerseits eine möglichst raumfüllende Untersuchung des Lösungsraums und andererseits die Untersuchung besonders interessanter bzw. vielversprechender Kombinationen sicherzustellen.

3 Stand der Forschung

Das folgende Kapitel stellt den aktuellen Stand der Forschung im Themenfeld der Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) vor. Zunächst werden hierzu aus der Zielsetzung Anforderungen an den Lösungsansatz abgeleitet (Kapitel 3.1). Anschließend erfolgt die Vorstellung und Bewertung bestehender Forschungsansätze zur Materialbedarfsplanung (MRP) in der RL, zum Nutzen von Informationen im Remanufacturing, sowie zur simulationsbasierten Optimierung in der RL (Kapitel 3.2). Abschließend erfolgt die Ableitung eines Forschungsdefizits für die Transparenzsteigerung in der RL zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung (Kapitel 3.3).

Für vertiefende Literatur in dem Themengebiet sei zusätzlich auf die Übersichten von Chanintrakul & Coronado Mondragon et al. (2009), Subramoniam & Huisinigh et al. (2009), Moon (2017), Mujkić & Kraslawski et al. (2018) und Kara & Hauschild et al. (2022) verwiesen.

3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz

Auf Basis der in Kapitel 1.2 formulierten Zielsetzung ergeben sich insgesamt zwölf Anforderungen, die zur Bewertung des existierenden Stands der Forschung herangezogen werden. Anhand des Erfüllungsgrads der verschiedenen Anforderungen lässt sich ein Forschungsdefizit ableiten, welches mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Lösungsansatz adressiert wird. Für eine übersichtliche Darstellung sind die zwölf Anforderungen in die folgenden vier Kategorien gegliedert:

- **Problemstellung und Netzwerkstruktur:** In Kapitel 2.1.2 wurde gezeigt, dass in der RL Planungs- und Steuerungsprobleme mit lang-, mittel- und kurzfristigen Zeithorizonten existieren (vgl. Fleischmann & Meyr et al. 2008; Nuss & Sahamie et al. 2015). Daher ist zunächst eine Unterscheidung bestehender Ansätze hinsichtlich des **Planungshorizonts der Problemstellung (A1)** erforderlich. Mit der Berücksichtigung weiterer Akteure wird zudem die Komplexität dieser Problemstellung verstärkt (vgl. Kalverkamp 2018; Guidat & Uoti et al. 2015). Um Erkenntnisse über die Wechselwirkungen innerhalb der RL auf die verschiedenen Akteure zu gewinnen, wird daher die **Mehrstufigkeit der RL (A2)** zu einer weiteren Anforderung.
- **Informationsaustausch und Transparenzsteigerung:** Aufgrund der Mehrstufigkeit der RL (vgl. A2) ist es ebenso notwendig, einen **mehrstufigen Informationsaustausch (A3)** in der RL, d. h. einen Austausch und eine Bereitstellung von Informationen zwischen mehreren Netzwerkteilnehmern, abzubilden (vgl. Kapitel 2.2.3, Goltso & Ponte et al. 2019; Casper & Sundin 2018). Aufgrund von Abhängigkeiten zwischen spezifischen

Informationsausprägungen (z. B. Produktnummer, Qualität) und deren unterschiedlichen Auswirkungen in nachgelagerten Planungs- und Steuerungsprozessen (vgl. Okorie & Charnley et al. 2020) ist eine weitere Anforderung, **mehrere Informationsausprägungen (A4)** zu berücksichtigen. Um eine möglichst frühe (d. h. möglichst nah am Endkunden) und gleichzeitig kostengünstige Informationsaufnahme zu berücksichtigen, werden IKT zum entscheidenden Befähiger (vgl. Kapitel 2.2.2). Dabei wird die **Berücksichtigung der Informationsaufnahme (A5)** zu einer weiteren Anforderung (vgl. Kalverkamp & Raabe 2018).

- **Materialbedarfsplanung (MRP) im Remanufacturing:** Die besonderen Herausforderungen der MRP im Remanufacturing wurden in Kapitel 2.1.3 vorgestellt. Im Gegensatz zu den in der Literatur häufig verwendeten statischen Regenerationsraten basierend auf Erfahrungs- oder Vergangenheitswerten (vgl. Ferrer & Whybark 2001) zielt die vorliegende Arbeit auf die **Berücksichtigung dynamischer, instanzindividueller Regenerationsraten (A6)** zur Verbesserung der MRP ab. Zur Berechnung dieser dynamischen Regenerationsraten müssen jedoch zunächst die **Einflüsse produktspezifischer Informationen (A7)** auf die MRP untersucht und identifiziert werden (vgl. Treber 2020). Mit Hilfe der **Einbeziehung der zugrunde liegenden Produktstruktur (A8)**, d. h. der Berücksichtigung von enthaltenen Teilsystemen und Komponenten eines Produkts (vgl. Malolan & Mathirajan 2020), können die Informationen dann genutzt werden, um eine effiziente Neuteilebeschaffung im Remanufacturing zu realisieren. Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. (2018) haben ermittelt, dass die gewählte **Strategie der Aufarbeitung (A9)** des Remanufacturers einen entscheidenden Einfluss auf relevante Kenngrößen hat. Unterschieden wird dabei i. d. R. zwischen einer sog. Push- (direkte Weiterverarbeitung der Cores) und einer Pull-Strategie (Aufarbeitung der Cores bei Bedarf), wobei mittels Übergang zu einer Pull-Strategie die Durchlaufzeit signifikant reduziert werden kann (vgl. Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018, S. 275).
- **Methodik und Abbildung von Wirkzusammenhängen:** Um eine möglichst realitätsnahe Untersuchung von Wirkzusammenhängen zu erreichen und zeitliche Entwicklungen berücksichtigen zu können (vgl. Parker & Riley et al. 2015; Arnold & Isermann et al. 2008; Barquet & Rozenfeld et al. 2013), muss die RL in einem **dynamischen System (A10)** abgebildet werden. Von besonderer Bedeutung sind außerdem die im Remanufacturing vorherrschenden multidimensionalen Unsicherheiten (vgl. Kapitel 2.3.2), Goltsov & Ponte et al. 2019; Sundin & Dunbäck 2013). Daher ist eine **Modellierung von Unsicherheiten (A11)** notwendig. Zur umfassenden Unterstützung der im Fokus stehenden Entscheidung und der Handlungsempfehlungen ist eine Bewertung alternativer Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich verschiedener Zielgrößen notwendig (vgl. Kapitel

2.3.1). Neben ökonomischen Auswirkungen sind insbesondere ökologische Faktoren relevant (vgl. Benoy & Owen et al. 2014). Eine **multikriterielle Bewertung (A12)** soll die Berücksichtigung unterschiedlicher Dimensionen einer Entscheidung sicherstellen.

3.2 Bewertung bestehender Forschungsansätze

Im Folgenden werden relevante Forschungsarbeiten zu den drei Themengebieten Materialbedarfsplanung (MRP, Kapitel 3.2.1), Informationsaustausch (Kapitel 3.2.2) und simulationsbasierte Optimierung (Kapitel 3.2.3) jeweils mit Schwerpunkt auf das Remanufacturing bzw. die Rückführungslogistik (RL) vorgestellt sowie hinsichtlich der in Kapitel 3.1 abgeleiteten Anforderungen bewertet. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3.3 ein Forschungsdefizit abgeleitet.

3.2.1 Ansätze für die Materialbedarfsplanung im Remanufacturing

Mit der MRP für das Remanufacturing im Allgemeinen beschäftigen sich bereits einige Veröffentlichungen (z. B. Spengler 1998; Fleischmann 2000; Östlin 2008; Östlin & Sundin et al. 2008; Zhang & Guan et al. 2019; Malolan & Mathirajan 2020; Bag & Dhamija et al. 2021). Weitere Ansätze befassen sich mit der Beschaffung von Cores bei gegebener Nachfrage (z. B. Ferrer & Whybark 2001; Ferrer 2003; Panagiotidou & Nenes et al. 2013), mit der Beschaffung zum Ausgleich von Neu- und aufgearbeiteten Produkten (z. B. Mahadevan & Pyke et al. 2003; Kuo 2011; Sundin & Dunbäck 2013; Boutarfa & Senoussi et al. 2020; Mawandiya & Jha et al. 2020) oder mit Beschaffungsentscheidungen in der linearen Logistik (z. B. Lau & Xie et al. 2008; Thevenin & Adulyasak et al. 2021). Dieser Logik folgend werden die genannten Ansätze im Folgenden im Detail erläutert.

Spengler (1998) präsentiert in seiner Arbeit einen integrierten Prozess zur Produktions-, Demontage- und Recyclingplanung. Dabei geht er insbesondere auf die Ermittlung des Bruttobedarfs sowie des Bruttoangebots und damit das Spannungsfeld aus Nachfrage und Angebot ein. Im Anwendungsfall des Recyclings validiert er seinen Ansatz, vernachlässigt jedoch einen mehrstufigen Informationsaustausch sowie die Ermittlung instanzindividueller und dynamischer Regenerationsraten. (Spengler 1998)

Fleischmann (2000) entwickelt quantitative Entscheidungsunterstützungsmodelle für die Planung, Implementierung und Steuerung der RL. Er entwickelt hierzu u. a. ein Markov-Entscheidungsmodell zur Bestimmung der optimalen Bestell- und Lagerhaltungspolitik in einer geschlossenen Lieferkette (CLSC, engl. "Closed-Loop Supply Chain"). Anhand einer Fallstudie zeigt er, dass die (s,S) -Bestellpolitik als optimal angesehen werden kann, unter der Annahme, dass das Angebot von Cores und die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten

unabhängig sind. Ein erweiterter Informationsaustausch wird als möglicherweise vorteilhaft genannt, jedoch nicht im Detail untersucht und quantifiziert. (Fleischmann 2000)

Östlin (2008) und Östlin & Sundin et al. (2008) untersuchen Herausforderungen und Treiber für das Remanufacturing, insbesondere für die RL und die MRP. Um den multidimensionalen Unsicherheiten entgegenzuwirken schlagen die Autoren vor, Komponenten von Remanufacturingprodukten in vier Typen zu unterteilen: (1) Komponenten, die immer ausgetauscht werden, (2) Komponenten, die direkt wiederverwendet oder aufgearbeitet werden können, (3) Komponenten, die ausgetauscht werden müssen, aber vorrätig oder eine sehr kurze Lieferzeit haben, und (4) Komponenten, die ausgetauscht werden müssen und deren Verbrauch anhand von Vorhersagen bestimmt werden muss, da eine Bestellung erst bei Auftauchen eines Defekts nicht mehr rechtzeitig ankommen würde (Östlin & Sundin et al. 2008). Anhand dieser Kategorisierung sollte die Bestandsverwaltung und Bestellstrategie unterschiedlich gehandhabt werden. Beide Ansätze berücksichtigen die Mehrstufigkeit der RL sowie des Informationsaustauschs. Östlin (2008) betrachtet darüber hinaus mehrere Informationsausprägungen, z. B. hinsichtlich des gewählten Anreizsystems bzw. in Abhängigkeit der zu treffenden Entscheidung. Eine dynamische Modellierung und die Ableitung von Handlungsempfehlungen hieraus erfolgt jedoch nicht. (Östlin 2008; Östlin & Sundin et al. 2008)

Zhang & Guan et al. (2019) ermitteln eine geeignete Bestell- und Lagerhaltungspolitik für den Ein-Produkt-Fall mit mehreren Komponenten unter Einbeziehung der Produktstruktur im Kontext eines vertragsgebundenen Remanufacturing-Unternehmens (CR). Hierzu stellen die Autoren ein mathematisches Modell auf, um die verschiedenen Lagerbestände (Cores, aufgearbeitete Komponenten, neue Komponenten, aufgearbeitete Produkte) abzubilden, sowie Bestellzeitpunkte und -mengen zu ermitteln und vergleichen die Lösungsqualität des Modells anhand eines Vergleichs zwischen Partikel-Schwarm-Optimierung und genetischem Algorithmus. Anhand einer realen Fallstudie eines CRs von Baumaschinen wird gezeigt, dass für fast jede Komponente individuell unterschiedliche, optimale Bestell- und Lagerstrategien existieren, wodurch sich individuelle Bestellzeitpunkte und -mengen ergeben. Der Ansatz berücksichtigt jedoch keine Bestellmodelle mit kontinuierlicher Bestandsaufnahme und vernachlässigt die Modellierung einer mehrstufigen RL und einem damit einhergehendem Informationsaustausch. (Zhang & Guan et al. 2019)

Malolan & Mathirajan (2020) stellen einen Lösungsansatz für strategische (Bestimmung optimaler Kapazitäten der RL, Break-Even-Point für Kapitalinvestitionen) und taktische (optimale Beschaffung, Lagerhaltung und Produktion) Problemstellungen im Remanufacturing vor. Hierzu modellieren sie einen 5-stufigen Ansatz, in dem mittels (nicht-) linearen ganzzahligen Optimierungsmodellen Lösungen für die Problemstellungen ermittelt werden. Dabei können insbesondere demontierte und aufgearbeitete Komponenten der zugrundeliegenden

Produktstruktur gleichwertig zu neu beschafften Komponenten verwendet werden. Die Ergebnisse basieren auf Daten eines indischen OEMs und zeigen einen positiven Effekt der vorgestellten Modelle auf den Gewinn anhand der Optimierung von Lager-, Produktions- und Remanufacturing-Mengen sowie eine verbesserte Befriedigung der Nachfrage aufgrund einer gesteigerten Flexibilität des Remanufacturing-Systems. Die Autoren vernachlässigen dabei jedoch die Modellierung von produktbezogenen Unsicherheiten hinsichtlich Menge, Qualität und Zeitpunkt des Produktrückflusses. (Malolan & Mathirajan 2020)

Bag & Dhamija et al. (2021) übertragen das Konzept der *Beschaffung 4.0* (abgeleitet aus Industrie 4.0-Prinzipien, vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015) auf Remanufacturing-Systeme und identifizieren notwendige Ressourcen und Bedingungen. Hierzu führen die Autoren eine empirische Studie über Unternehmen in Südafrika durch und leiten ein Echtzeitbestandstracking sowie selbstauslösende Bestellungen als wichtige Handlungsfelder für *Beschaffung 4.0* im Remanufacturing ab. Befähiger hierzu sind nach Bag & Dhamija et al. (2021) die durchgehende Digitalisierung der verwendeten Systeme und ausreichend vorhandene Daten (z. B. produktspezifische Daten der Cores) als Input für Beschaffungsentscheidungen. Die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen (z. B. Verknüpfung der Netzwerkakteure über eine digitale Plattform, Weitergabe von produktspezifischen Informationen) werden nur konzeptionell und die konkrete Nutzung der Informationen nicht vorgestellt. (Bag & Dhamija et al. 2021)

Mit der Beschaffung von Cores bei gegebener Kapazität bzw. Nachfrage unter der Annahme einer "unendlichen" Core-Quelle beschäftigen sich u. a. die Arbeiten von Ferrer & Whybark (2001) und Ferrer (2003), in denen die Bedarfsplanung und Losgrößenpolitiken für die MRP im Remanufacturing untersucht wird. Hierzu wird jeweils ein lineares Optimierungsmodell entwickelt, welches die operativen Kosten minimiert. Anhand von Beispieldaten für Starter und Generatoren wird aus der *Reverse Bill of Materials* (RBoM) die Produktstruktur abgeleitet und Schätz- und Durchschnittswerte für die Regenerationsraten ermittelt, wodurch erforderliche Bedarfe abgeleitet werden (Ferrer & Whybark 2001). Eine Unsicherheitsmodellierung findet in Form des unbekanntes Ergebnisses aus Demontage und Aufarbeitung statt, welches gegenüber der Kapazität und Lieferzeit externer Lieferanten abgewogen wird (Ferrer 2003). Die Autoren merken an, dass die Informationsanforderungen des entwickelten Systems sehr hoch sind, diese bis dato jedoch durch Expertenschätzungen generiert wurden. (Ferrer & Whybark 2001; Ferrer 2003)

Panagiotidou & Nenes et al. (2013) untersucht, inwiefern eine frühzeitige Stichprobenprüfung von Cores die Beschaffungsentscheidung von diesen und damit die Wirtschaftlichkeit des Remanufacturings beeinflusst. Hierzu stellen die Autoren Formeln zur Bestimmung der

optimalen Stichprobengröße, zur Entscheidung ob ein Core-Los mit einem bestimmten Stichprobenergebnis lohnenswert für das Remanufacturing ist, und zur Bestimmung der optimalen Beschaffungsmenge dieser Cores auf, unter Annahme einer bekannten Nachfrage und einem unendlichen Angebot an Cores. Zur adäquaten Berücksichtigung der Unsicherheit wird hierzu jedem Core eine Wahrscheinlichkeit hinsichtlich der Eignung zum Remanufacturing zugeteilt, anhand derer das Stichprobenergebnis und weitere Entscheidungen beeinflusst werden. Die Stichprobenprüfung erweist sich insbesondere dann als vorteilhaft, wenn es große Unterschiede zwischen den optimalen Beschaffungsmengen von verschiedenen Core-Losen gibt und wenn durch frühzeitig verfügbare Produktinformationen über Cores ein zuvor unprofitables Remanufacturing profitabel gestaltet werden kann. Die Autoren vernachlässigen jedoch die Möglichkeit der Core-individuellen Prüfung, Aufnahme und Weitergabe von Informationen sowie die Beschaffungsplanung von notwendigen neuen Komponenten für das Remanufacturing. (Panagiotidou & Nenes et al. 2013)

Ein weiterer Fokus von bestehenden Ansätzen liegt auf der Beschaffung zum Ausgleich von Neu- und aufgearbeiteten Produkten. Mahadevan & Pyke et al. (2003) analysieren bspw. die Produktionssteuerung und das Lagermanagement eines Remanufacturing-Standortes zur Bestimmung des optimalen Zeitpunktes der Produktionsfreigabe für das Remanufacturing sowie der optimalen Anzahl an Neuprodukten, die zusätzlich produziert werden müssen. Hierzu entwickeln die Autoren drei Heuristiken, die basierend auf einer Push-Strategie sowie in Abhängigkeit der Rückgabequote von Cores, Strafkosten für unerfüllte Aufträge, und Durchlauf- bzw. Lieferzeiten geeignete Parameter für die Entscheidungsprobleme ermittelt. Anhand einer dynamischen Simulation verifizieren die Autoren ihren Ansatz, zeigen eine kurze Laufzeit und einen geringen Optimalitätsfehler der Heuristiken, und leiten untere und obere Schranken für die optimale Lösung der Entscheidungsvariablen ab. Das Lagermanagement findet jedoch lediglich auf Produkt- und nicht auf Komponentenebene statt. (Mahadevan & Pyke et al. 2003)

Die Arbeit von Kuo (2011) untersucht unterschiedliche Bestandsmanagementstrategien in einer CLSC. Hierzu entwickelt der Autor ein dynamisches Simulationsmodell einer mehrstufigen, geschlossenen Lieferkette inklusive Informationsaustausch und untersucht darin die Bestands- und Aufarbeitungspolitiken des *remanufacture-to-stock* (RMTS), *reassembly-to-order* (RATO), sowie des *remanufacture-to-order* (RMTO). Anhand einer Case Study eines Unternehmens mit 70 % Neuproduktion und 30 % Remanufacturing-Anteil wird gezeigt, dass die Durchlaufzeit sowie die Gesamtkosten mit einem steigenden Anteil an Remanufacturing ebenfalls steigen, während sich die durchschnittliche Abfallmenge reduziert, unabhängig von der gewählten Bestandspolitik. In dem Ansatz bleiben jedoch mehrere Informationsausprägungen sowie deren Einflüsse auf die MRP unberücksichtigt. (Kuo 2011)

Sundin & Dunbäck (2013) identifizieren Herausforderungen in der RL mechatronischer und elektronischer Komponenten der Automobilbranche. Hierzu führen die Autoren sechs semi-strukturierte Interviews mit kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) im AA in Deutschland und Schweden durch, um zunächst bestehende Herausforderungen aus der Literatur zu validieren und anschließend neue, fallspezifische Herausforderungen zu identifizieren. Neben bereits bekannten Herausforderungen (unsichere Menge, Zeitpunkt und Qualität der Cores) wurden im Rahmen der Interviews die fehlende Identifikation und Sortierung der Cores bei der Quelle, die stochastischeren Fehlerbilder bei elektronischen gegenüber mechatronischen Komponenten, sowie die dadurch entstehende erhöhte Komplexität beim Ausgleich von Angebot von Cores und der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten identifiziert. Die daraus abgeleiteten, komplexeren Planungs- und Steuerungsaufgaben im Remanufacturing gegenüber der klassischen Produktion (z. B. Lagerplanung und -steuerung, Beschaffung) sowie die Vorteilhaftigkeit der Nutzung produktspezifischer Informationsausprägungen werden nur genannt, konkrete Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen werden jedoch nicht abgeleitet. (Sundin & Dunbäck 2013)

Boutarfa & Senoussi et al. (2020) untersuchen die Produktionsplanung in einer mehrstufigen CLSC, in dem nach der Nachfrage von Neuprodukten und aufgearbeiteten Produkten unterschieden wird, erstere jedoch im Fall von Engpässen letztere substituieren können. Hierzu entwickeln die Autoren ein kostenminimierendes gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell (MILP), welches u. a. die optimalen Entscheidungen für die Anzahl zu sammelnder Cores, die Anzahl zu produzierender bzw. aufzuarbeitender (Neu-) Produkte, sowie die Anzahl zu bestellender Komponenten für die Neuproduktion bestimmt. Anhand fiktiv generierter Datenschlussfolgern die Autoren u. a., dass eine Substitution von aufgearbeiteten Produkten durch Neuprodukte nur in bestimmten Fällen ökonomisch vorteilhaft ist. Ein mehrstufiger Informationsaustausch und die damit einhergehende Transparenzsteigerung werden jedoch nicht berücksichtigt. (Boutarfa & Senoussi et al. 2020)

In der Arbeit von Mawandiya & Jha et al. (2020) wird ein Modell zur zentralisierten Bestimmung der Produktions- und Bestandspolitik in einer zweistufigen CLSC bei stochastischer Nachfrage und stochastischem Rückfluss von Cores vorgestellt. Hierzu entwickeln die Autoren einen Algorithmus, um die optimale Losgröße der beiden produzierenden Akteure zu bestimmen und somit die erwarteten Gesamtkosten des Systems zu minimieren. Anhand eines fiktiven Zahlenbeispiels kann die Vorteilhaftigkeit der CLSC gegenüber der linearen Lieferkette gezeigt werden unter den Annahmen, dass die Remanufacturing-Kosten geringer sind als die Kosten der Neuproduktion, die Nachfragevariation gering ist und die Rücklaufquote der Cores annähernd 100 % beträgt. Das Modell vernachlässigt jedoch realitätsnahe Komplexitäten, das Vorhandensein mehrerer, geographisch verteilter Akteure der gleichen

Stufe in der RL, sowie einen mehrstufigen Informationsaustausch. (Mawandiya & Jha et al. 2020)

Zuletzt werden beispielhaft zwei Ansätze berücksichtigt, die sich mit Beschaffungsentscheidungen in der linearen Logistik beschäftigen, wobei ein besonderer Fokus auf die methodische Übertragbarkeit dieser auf den Kontext einer RL gelegt wird. Lau & Xie et al. (2008) untersuchen den Effekt des Informationsaustauschs und einer frühen Auftragszusage auf die Leistung von vier unterschiedlichen Bestell- und Lagerhaltungspolitiken in einer einfachen Lieferkette mit einem kapazitierten Lieferanten und vier Vertriebspartnern. Hierzu stellen sie ein dynamisches Simulationsmodell auf, in dem die zweistufige Lieferkette unter verschiedenen Bedingungen (Bestell- und Lagerhaltungspolitik, Informationsaustausch, frühere Auftragszusage) abgebildet wird. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass die *Economic Order Quantity* (EOQ)-Bestellpolitik zu den niedrigsten Kosten für die gesamte Lieferkette führt, wohingegen die *Periodic Order Quantity* (POQ)- oder *Silver Meal* (SM)-Bestellpolitiken lediglich zu besseren Ergebnissen für einzelne Akteure in der Lieferkette führen, und zum anderen, dass ein Informationsaustausch, insbesondere bzgl. detaillierter Auftragsdaten, zu signifikanten Kosteneinsparungen für alle Akteure führen kann. Obwohl die Autoren Unsicherheiten bzgl. der Nachfrage berücksichtigen, werden Unsicherheiten, die für die RL charakteristisch sind (z. B. Zeitpunkt der zurückkommenden Cores) nicht abgebildet. (Lau & Xie et al. 2008)

Thevenin & Adulyasak et al. (2021) untersuchen die MRP in der linearen Produktion für den Fall einer unsicheren Nachfrage. Hierzu entwickeln die Autoren ein stochastisches, mehrstufiges und kapazitiertes Optimierungsmodell sowie zwei Heuristiken zur Ausführung der MRP in Echtzeit. Anhand numerischer Studien wird gezeigt, dass die stochastische Optimierung signifikante Kosteneinsparungen gegenüber der deterministischen MRP mit anschließender Berechnung eines Sicherheitsbestands einbringen und die von den Heuristiken bestimmten Lösungen eine Optimalitätslücke von weniger als 4 % aufweisen. Die speziellen Herausforderungen in der RL sowie ein Informationsaustausch werden jedoch nicht berücksichtigt. (Thevenin & Adulyasak et al. 2021)

3.2.2 Ansätze über den Nutzen von Informationen in Netzwerken

Es existieren bereits vielfältige Forschungsarbeiten, die sich mit der Vorteilhaftigkeit eines erhöhten Informationsaustauschs zwischen beteiligten Akteuren in Wertschöpfungsketten beschäftigen. Einige Ansätze betrachten dabei lediglich die Informationsaufnahme und -verarbeitung am Remanufacturing-Standort (z. B. Tang & Naim 2004; Denzel & Ferguson et al. 2010; Zikopoulos 2017; Okorie & Charnley et al. 2020). Darüber hinaus befassen sich die meisten Ansätze mit der Modellierung des Informationsaustauschs in einer mehrstufigen RL (z. B. Ferguson & Guide et al. 2009; Ketzenberg 2009; van Wassenhove & Zikopoulos

2010; Köhler 2011; Walther 2010; Stöltig 2006; Barquet & Rozenfeld et al. 2013; Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015; Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015). Weitere Ansätze sind häufig statisch oder betrachten lediglich eine Periode zur Analyse der Effekte des Informationsaustauschs (z. B. Sundin 2004; Zikopoulos & Tagaras 2007; Zikopoulos & Tagaras 2008; Li & Chao et al. 2012; Cannella & Bruccoleri et al. 2016). Abschließend können Forschungsarbeiten zu linearen Wertschöpfungsnetzwerken als relevant eingestuft werden (z. B. Cachon & Fisher 2000; Treber 2020). Dieser Logik folgend werden die genannten Ansätze im Folgenden im Detail erläutert.

Tang & Naim (2004) untersuchen die Produktionsplanung und -steuerung in Abhängigkeit unterschiedlicher Informationsverfügbarkeiten in einer CLSC, wobei letzteres einer Push-Strategie folgt. Hierzu werden eine System Dynamics-Simulation entwickelt und Transferfunktionen aufgestellt, die den Zeitpunkt der Auftragsfreigabe für das Produktionssystem und somit den Bestand im Fertiglager (bestehend aus Neuprodukten und aufgearbeiteten Produkten) ermitteln. Anhand von drei Szenarien mit unterschiedlichen Graden der Informationsverfügbarkeit zeigen die Autoren, dass eine höhere Informationsverfügbarkeit zu einer besseren Systemperformance führt und den Bullwhip-Effekt reduziert. Der Ansatz vernachlässigt jedoch den Ort der Informationsaufnahme in der RL sowie die Zusammenhänge und Abhängigkeiten unterschiedlicher Informationsausprägungen auf die Planungs- und Steuerungsaufgaben. (Tang & Naim 2004)

Denzel & Ferguson et al. (2010) untersuchen die Produktions- und Bestandspolitik im Remanufacturing unter unsicherer Qualität und Anzahl der Cores und einer Einteilung in Qualitätsklassen mit variierender Nachfrage in jeder Periode. Hierzu stellen die Autoren ein multi-periodisches stochastisches Optimierungsmodell auf, welches in jeder Periode die Entscheidungen trifft, wie viele Cores in Qualitätsklassen eingeteilt und je Klasse aufgearbeitet werden, und wie viele Cores und aufgearbeitete Produkte als Bestand in die nächste Periode überführt werden. Anhand von Beispieldaten wird gezeigt, dass die Einteilung der Cores in Qualitätsklassen vorteilhaft ist und dadurch ca. 99 % aller Cores aus der besten Qualitätsklasse aufgearbeitet und Bestände reduziert werden. Obwohl die Autoren mit Hilfe ihres Ansatzes die Eigenschaften eines dynamischen Systems sowie die Modellierung von Unsicherheiten bereits gut erfüllen sowie die Herausforderungen hinsichtlich der Informationsaufnahme skizzieren, vernachlässigen sie Aspekte eines mehrstufigen Informationsaustauschs bzw. hinsichtlich mehrerer Informationsausprägungen in einer mehrstufigen RL. (Denzel & Ferguson et al. 2010)

In dem Ansatz von Zikopoulos (2017) werden die Implikationen hinsichtlich der unsicheren Qualität der Cores auf die Produktions- und Bedarfsplanung im Remanufacturing untersucht. Mit Hilfe einer analytischen Formulierung der Planungsentscheidungen optimieren die Autoren

diese unter verschiedenen Szenarien (z. B. deterministische oder stochastische Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten). Die Validierung erfolgt anhand von Daten eines Bürogeräteherstellers und zeigt u. a., dass die Nichtberücksichtigung der Qualitätsunsicherheit der Cores zu hohen Zusatzkosten in der Produktions- und Bedarfsplanung führen kann und dies bereits bei einer geringen Qualitätsvarianz der Cores gilt. Daraus schlussfolgert der Autor, dass die Aufnahme von Informationen hinsichtlich der Core-Qualität bereits vor Eintritt in den Remanufacturingprozess effizienzsteigernd wirken kann. Unberücksichtigt bleibt jedoch ein mehrstufiger Informationsaustausch in der RL sowie die Modellierung in einem dynamischen System. (Zikopoulos 2017)

In der Arbeit von Okorie & Charnley et al. (2020) werden die Auswirkungen von sog. *smart remanufacturing*, d. h. der Verfügbarkeit von Produktinformationen während des Aufarbeitungsprozesses, auf die Leistungsfähigkeit des Remanufacturings untersucht. Hierzu modellieren die Autoren eine mehrstufige RL mit Hilfe der System Dynamics, der ereignisdiskreten sowie der agentenbasierten Simulation, um eine Empfehlung hinsichtlich der besten Simulationsmethode zu machen. Anhand der Ergebnisse der verschiedenen Simulationsmethoden (z. B. reduzierte Durchlaufzeit, bessere Kapazitätsauslastung) schlussfolgern die Autoren, dass (i) die Verfügbarkeit von Produktinformationen die Leistungsfähigkeit verbessern kann und (ii) die vorherrschende Komplexität in Remanufacturing-Systemen hybride Modellierungstechniken erfordern, um die Systeme ganzheitlich abbilden zu können. Eine Umsetzung dieser hybriden Modellierung sowie unterschiedliche Informationsausprägungen vernachlässigen die Autoren jedoch. (Okorie & Charnley et al. 2020)

Viele existierende Ansätze modellieren zur Analyse der Vorteilhaftigkeit von Informationen in der RL eine zwei- oder mehrstufige Lieferkette. So ermitteln bspw. Ferguson & Guide et al. (2009) die Auswirkungen einer Einteilung von Cores in verschiedene Qualitätsklassen auf die taktische Produktionsplanung. Hierzu stellen die Autoren ein gewinnmaximierendes Optimierungsmodell auf, um die optimale Anzahl an Cores je Qualitätsklasse, die je Periode aufgearbeitet wird, sowie den optimalen Lagerbestand an (aufgearbeiteten Gebraucht-) Produkten je Periode zu bestimmen. Anhand von realen Daten zeigen die Autoren, dass die Einteilung von Cores in fünf Qualitätsklassen den größten Vorteil hat und damit der Gesamtgewinn um bis zu 4 % gesteigert werden kann. Der Ansatz trifft jedoch stark vereinfachende Annahmen, z. B. hinsichtlich eines deterministischen Rückflusses an Cores mit bekannter Verteilung dieser auf die Qualitätsklassen sowie einer deterministischen Nachfrage, und berücksichtigt darüber hinaus weder einen mehrstufigen Informationsaustausch noch die Bedarfs- und Lagerhaltung auf Komponentenebene. (Ferguson & Guide et al. 2009)

In der Arbeit von Ketzenberg (2009) wird der Wert von Informationen in einer CLSC unter Berücksichtigung von Unsicherheit hinsichtlich Nachfrage, Rückfluss von Cores, Regenerati-

onsraten und Kapazitätsauslastung untersucht. Hierzu entwickelt der Autor ein kostenminimierendes, multi-periodisches Optimierungsmodell, welches die Anzahl neu zu produzierender Produkte, die Anzahl aufzuarbeitender Produkte sowie die Anzahl zu entsorgender Cores als Entscheidungsvariablen bestimmt. Anhand von drei Szenarien mit unterschiedlichem Informationsaustausch resultiert, dass der Wert von Informationen hinsichtlich der Regenerationsraten in einer Kostenreduktion zwischen 0 % und 14,2 % resultiert. Die Arbeit vernachlässigt jedoch die Berücksichtigung der Informationsaufnahme sowie die Bedarfsplanung und Lagerhaltung auf Komponentenebene. (Ketzenberg 2009)

In dem Ansatz von van Wassenhove & Zikopoulos (2010) wird der Effekt einer Überbewertung der Core-Qualität durch den Lieferanten in einer zweistufigen RL auf die Core-Beschaffungsentscheidungen des Remanufacturers und letztlich auf die Profitabilität analysiert. Sie stellen hierzu ein 1-periodisches, gewinnmaximierendes lineares Optimierungsmodell auf, in dem die Core-Qualität vom Lieferanten tendenziell überschätzt wird und die tatsächliche Qualität erst beim Remanufacturer bekannt wird. Anhand von Beispieldaten zeigen die Autoren, dass sich bei schlechter Klassifizierungsgenauigkeit der Cores in die Qualitätsklassen bei gleichzeitig großem Unterschied in der Attraktivität der verschiedenen Qualitätsklassen der Gesamtgewinn gegenüber dem theoretisch maximal möglichen Gewinn signifikant reduziert, woraus abgeleitet wird, dass eine Corebeschaffung mit geringen Unterschieden in Anschaffungskosten zwischen den Qualitätsklassen zu einer höheren Robustheit hinsichtlich der Profitabilität des Gesamtsystems führt. Unberücksichtigt bleiben in dem Ansatz jedoch die mehrperiodische, dynamische Betrachtung sowie die Einflüsse produktspezifischer Informationen auf Produktions- und Beschaffungsentscheidungen. (van Wassenhove & Zikopoulos 2010)

Köhler (2011) untersucht in seiner Dissertation die ökologischen Auswirkungen der RL im Remanufacturing (sog. regenerative Lieferkette). Er entwickelt hierzu ein Konzept zum Vergleich mehrstufiger Lieferketten der Neuproduktion gegenüber mehrstufigen regenerativen Lieferketten, anhand dessen der Beitrag dieser zum Klimawandel quantifiziert wird. Anhand von drei Referenzprodukten aus dem AA und unter Einbeziehung der konkreten Produktstruktur kommt er zu dem Ergebnis, dass die Prozesse der Rohstoffgewinnung und des Urformens (+72,73 %), des Reinigens (-77,65 %) und des Trennens (+54,15 %) die größten Einflüsse auf die Umweltauswirkungen der RL haben, wobei ein positiver Wert bedeutet, dass die Umweltauswirkungen der Lieferkette der Neuproduktion die der regenerativen Lieferkette überwiegen und ein negativer Wert umgekehrt zu interpretieren ist. Gleichzeitig führt der durch den Transport beigetragene Anteil zum Klimawandel aufgrund der komplexen Prozesse in der RL von 9 % bei einem Neuprodukt auf 16 % für ein aufgearbeitetes Produkt zu steigenden Umweltauswirkungen. Der Einfluss produktspezifischer Informationen bzgl. Cores sowie

die Modellierung von Planungs- und Steuerungsproblemen wird jedoch nicht berücksichtigt. (Köhler 2011)

Walther (2010) untersucht in ihrer Arbeit die Gestaltung und Koordination nachhaltiger Wertschöpfungsnetzwerke. Basierend auf einer Modellierung der unterschiedlichen Produktphasen, ausgehend von der Produktentwicklung über die Produktion, Nutzung und Entsorgung, stellt die Autorin ein Konzept zur unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit entlang nachhaltiger Wertschöpfungsketten vor. Die Lieferantenbeziehungen sowie ein Informationsaustausch entlang der Kette stellen dabei zentrale Bestandteile dar, deren Bedeutung anhand konkreter Fallbeispiele aufgezeigt wird. Dennoch vernachlässigt Walther (2010) die explizite Modellierung zirkulärer Wertschöpfungsnetzwerke bzw. des Remanufacturings und der damit einhergehenden Herausforderungen in Bezug auf die Nutzung von Informationen für nachgelagerte Planungs- und Steuerungsaufgaben. (Walther 2010)

Stölting (2006) untersucht in ihrer Dissertation das Remanufacturing elektronischer Investitionsgüter. Anhand einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung entwickelt die Autorin Strategien und Planungsinstrumente zur Implementierung von Remanufacturing-Systemen, u. a. mit Fokus auf eine Kosten-Nutzen-Analyse, die Umweltauswirkungen sowie die Integration von Remanufacturing in die Geschäftsstrategie. Der Informationsaustausch im Remanufacturing-System wird lediglich genannt und konzeptionell behandelt, eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Potentialen eines erhöhten Informationsaustauschs erfolgt jedoch nicht. (Stölting 2006)

In der Arbeit von Barquet & Rozenfeld et al. (2013) wird ein generisches und integriertes Modell eines Remanufacturing-Systems entwickelt. Basierend auf einer Literaturrecherche und der Anwendung der allgemeinen Systemtheorie werden die charakteristischen Elemente, Unsicherheiten und Beziehungen untereinander identifiziert und beschrieben. Zu diesen Elementen zählen u. a. die RL inkl. Beziehungen zu den Core-Lieferanten sowie der Informationsaustausch innerhalb des Gesamtsystems, die von den Autoren als essenziell betrachtet werden, um eine effiziente Planung und Steuerung der Remanufacturingprozesse sowie des Gesamtsystems zu ermöglichen. Die Informationsaufnahme wird in dem Ansatz jedoch nicht berücksichtigt. (Barquet & Rozenfeld et al. 2013)

In weiteren Arbeiten werden Arten von CPLC-Informationen und Hindernisse eines erhöhten, mehrstufigen Informationsaustauschs (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015) sowie Ursachen für Unsicherheiten im Material- und Informationsfluss von Remanufacturing-Unternehmen identifiziert (Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015). Hierzu führen die Autoren semi-strukturierte Interviews und Expertenworkshops mit fünf Remanufacturing-Unternehmen

durch. Sie identifizieren sechs Kategorien von CPLC-Informationen (z. B. Produktdesign-Spezifikationen, Produktionsinformationen, Qualitätssicherungsinformationen), Hindernisse des geringen Informationsaustauschs (z. B. geringes Bewusstsein der Vorteilhaftigkeit von Informationen) und stellen Möglichkeiten vor, um den Informationsaustausch zu erhöhen (z. B. schnellerer Informationsaustausch durch engere Anbindung der Stakeholder mittels Plattform für den Wissensaustausch). Die Autoren berücksichtigen jedoch nicht die Informationsaufnahme sowie deren Nutzung für nachgelagerte Planungs- und Steuerungsaufgaben. (Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015; Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015)

In weiteren Ansätzen werden dynamische Effekte durch eine statische bzw. ein-periodische Modellierung vernachlässigt. So werden bspw. in der Dissertation von Sundin (2004) Gestaltungsrichtlinien für ein sog. *Design for Remanufacturing* (DfRem) entwickelt und deren Auswirkungen auf den Remanufacturing-Prozess untersucht. Basierend auf theoretischen Überlegungen wird zunächst ein generischer Remanufacturing-Prozess entwickelt und anschließend eine *Remanufacturing Property Matrix* (RemPro) abgeleitet, die die Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaften und den generischen Remanufacturing-Prozessschritten aufzeigt. Die theoretischen Ergebnisse werden anhand von sechs Fallstudien validiert, wobei u. a. gezeigt wird, dass eine bessere Kontrolle über die vorausgehenden Lebenszyklusphasen, d. h. die Design- und Nutzungsphase des Produkts sowie die RL, dabei helfen kann, die üblicherweise hohen Lagerbestände aufgrund der multidimensionalen Unsicherheiten zu reduzieren. Eine konkrete Modellierung der Rückführungslogistik sowie die Identifikation von Verbesserungspotential in dieser bleibt in der Arbeit von Sundin (2004) jedoch außen vor. (Sundin 2004)

Die Arbeiten von Zikopoulos & Tagaras (2007) und Zikopoulos & Tagaras (2008) analysieren die Wirtschaftlichkeit von Aufarbeitungsprozessen unter Unsicherheit bezüglich der Qualität der Cores (Zikopoulos & Tagaras 2007) bzw. Unsicherheit von Sortierprozessen vor der Demontage auf Basis von grundlegenden Nutzungsdaten der Cores (Zikopoulos & Tagaras 2008). Die Autoren stellen hierzu jeweils ein zweistufiges, 1-periodisches Modell bestehend aus Sammel- und Aufarbeitungsstandorten auf, um gewinnmaximierende Beschaffungs- und Produktionsentscheidungen (Losgröße der Beschaffung vom Sammelstandort, Losgröße des Aufarbeitungsprozesses) zu treffen. Anhand numerischer Beispiele zeigen die Autoren, dass ein einfacher Sortierprozess unter der Annahme einer geringen Ungenauigkeit der aufgenommenen Informationen ökonomisch vorteilhaft sein kann (Zikopoulos & Tagaras 2008). Aufgrund der 1-periodischen Modellierung vernachlässigen die Autoren jedoch dynamische Effekte und untersuchen nicht, inwiefern das frühere Bekanntwerden von Informationen (z. B. Produktqualität) sich auf das System auswirkt. (Zikopoulos & Tagaras 2007; Zikopoulos & Tagaras 2008)

Li & Chao et al. (2012) untersuchen die Anforderungen an Material- und Informationsfluss für die zirkuläre Verwendung von gebrauchten Elektro- und Elektronikprodukten (WEEE). Hierzu entwickeln sie eine Informationsmanagement-Architektur, um einen sicheren und effizienten Informationsaustausch zwischen den Stakeholdern, d. h. von der Produktion über die Nutzungsphase bis zum Recycling bzw. Remanufacturing, zu ermöglichen. Anhand einer Fallstudie von LCD-Fernsehern ermitteln die Autoren acht Informationskategorien, die für die zirkuläre Verwendung essentiell sind, z. B. Fabrikinformationen (Produktidentifikation, Stückliste), CPLC-Informationen (Nutzungshistorie, Produktzustand) und technologische Informationen (Demontagemöglichkeit, Gefahrstoffe). Trotz Berücksichtigung mehrstufiger Netzwerke bleibt die Nutzung dieser Informationen für spezifische Planungs- oder Steuerungsaufgaben unberücksichtigt und es wird keine multikriterielle Bewertung im Rahmen eines dynamischen Systems vorgenommen. (Li & Chao et al. 2012)

Cannella & Bruccoleri et al. (2016) untersuchen das Verhalten von Bestell- und Bestandspolitiken in einer mehrstufigen CLSC unter variierenden Einflussgrößen, u. a. einem variierenden, mehrstufigen Informationsaustausch. Hierzu entwickeln die Autoren eine System Dynamics-Simulation einer CLSC mit einer flexiblen Anzahl an Stufen in der RL sowie unter verschiedenen Markt- und Betriebsbedingungen. Anhand einer statistischen Versuchsplanung wird u. a. gezeigt, dass eine höhere Transparenz bzgl. produktspezifischer Informationen einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Resilienz des Systems hat und insbesondere der Bullwhip-Effekt sowie Bestandsschwankungen reduziert werden. Verschiedene Informationsausprägungen sowie die Informationsaufnahme bleiben jedoch unberücksichtigt. (Cannella & Bruccoleri et al. 2016)

Abschließend existieren vielfältige Forschungsarbeiten zum Nutzen von Informationen in linearen Lieferketten. Beispielhaft und aufgrund ihrer Relevanz werden im Folgenden zwei Ansätze hieraus vorgestellt: Cachon & Fisher (2000) untersuchen die Auswirkungen des Informationsaustauschs in einer zweistufigen, linearen Lieferkette auf die Kosten der Auftragspolitik, die Durchlaufzeiten und kleinere Losgrößen. Die Autoren modellieren die Problemstellung für die verschiedenen Auftragspolitiken anhand von zwei Szenarien in einem dynamischen System: (i) kein Informationsaustausch und (ii) vollständiger Informationsaustausch im Sinne von stochastischen Nachfrage- und Lagerbestandsdaten. Anhand simulationsbasierter Experimente auf Basis fiktiver Daten leiten die Autoren eine durchschnittliche Kostenreduktion von 2,2 % sowie eine Durchlaufzeitreduktion von durchschnittlich 21 % für den Fall des vollständigen Informationsaustauschs gegenüber dem Fall ohne Informationsaustausch ab. Der Ansatz fokussiert sich jedoch lediglich auf den Informationsaustausch in einer linearen Lieferkette und trifft weitreichende Annahmen, die für den Fall einer RL nicht getroffen werden können. (Cachon & Fisher 2000)

Treber (2020) untersucht in seiner Dissertation das Potential eines verstärkten, mehrstufigen Informationsaustauschs in linearen Produktionsnetzwerken zur Verbesserung des Störungsmanagements. Hierzu wird eine ereignisdiskrete Ablaufsimulation entwickelt, um Wirkzusammenhänge zwischen verschiedenen Informationsausprägungen und dem Störungsmanagement zu ermitteln und zu quantifizieren. Anhand einer Metamodellierung zeigt Treber (2020), dass im Auftragsmanagement der Informationsaustausch möglichst zielgerichtet erfolgen sollte, während für die Behebung von Qualitätsproblemen ein möglichst starker Informationsaustausch angestrebt werden sollte. Der Ansatz fokussiert sich jedoch auf den Informationsaustausch in linearen Produktionsnetzwerken und lässt die besonderen Herausforderungen der RL daher außen vor. (Treber 2020)

3.2.3 Ansätze zur simulationsbasierten Optimierung in der Rückführungslogistik

Abschließend gibt es in der Literatur bereits vielfältige Ansätze, die Planungs- oder Steuerungsprobleme im Remanufacturing bzw. in der RL entweder unter Verwendung von Simulation oder Optimierung lösen (vgl. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Eine Übersicht über bestehende quantitative Modelle ist beispielsweise in Fleischmann (2000) und Farshid & Golpira (2019) enthalten. Im Gegensatz dazu befassen sich lediglich wenige Forschungsarbeiten im Themenfeld des Remanufacturings mit einer Kombination aus Simulation und Optimierung. Diese Arbeiten lassen sich hinsichtlich ihres zeitlichen Betrachtungshorizonts unterteilen: So befasst sich ein Teil der Arbeiten mit strategischen Fragestellungen (vgl. Swarnkar & Harding 2009; Suyabatmaz & Altekin et al. 2014; Oflazgil 2017) und ein anderer Teil mit taktisch-operativen Problemstellungen (vgl. Li & González et al. 2009; Thammatadatrakul & Chiadamrong 2019), welche im Folgenden im Detail erläutert werden.

Swarnkar & Harding (2009), Suyabatmaz & Altekin et al. (2014) und Oflazgil (2017) verwenden eine simulationsbasierte Optimierung zur Beantwortung strategischer Fragestellungen, z. B. hinsichtlich der Konfiguration von Remanufacturing-Netzwerken (Swarnkar & Harding 2009), der Standortplanung von Testzentren (Suyabatmaz & Altekin et al. 2014) bzw. der Bewertung alternativer Geschäftsmodelle in der RL (Oflazgil 2017). Dabei kommen sowohl Methoden der ereignisdiskreten Simulation (vgl. Swarnkar & Harding 2009; Suyabatmaz & Altekin et al. 2014) als auch der "System Dynamics"-Simulation (vgl. Oflazgil 2017) zur Anwendung. Auf Seiten der Optimierung werden sowohl heuristische Verfahren wie bspw. eine genetische Optimierung (vgl. Swarnkar & Harding 2009) als auch exakte, lineare Optimierungsverfahren (vgl. Suyabatmaz & Altekin et al. 2014; Oflazgil 2017) eingesetzt. Die Verknüpfung erfolgt entweder sequentiell (vgl. Swarnkar & Harding 2009; Oflazgil 2017) oder hierarchisch (vgl. Suyabatmaz & Altekin et al. 2014). Diese Arbeiten bilden somit ein dynamisches System ab und berücksichtigen die Modellierung von Unsicherheiten in der RL. Aufgrund des Fokus der

Arbeiten auf strategische Fragestellungen vernachlässigen sie jedoch die MRP sowie die Auswirkungen eines erhöhten Informationsaustauschs in der RL.

Li & González et al. (2009) entwerfen ein hybrides simulationsbasiertes Optimierungsmodell, um den Einfluss eines losgrößenbasierten Produktrückflusses inkl. Prioritätsklassen auf die Produktionsplanung im Remanufacturing zu untersuchen. Das dynamische Simulationsmodell, welches Unsicherheiten bzgl. Menge und Zeitpunkt des Produktrückflusses abbildet, wird dabei von einem genetischen Optimierungsmodell ergänzt, welches u. a. die Lagerkapazitäten, die Anzahl der Arbeiter sowie die Größe der Puffer zwischen den Stationen als Entscheidungsvariablen enthält. Anhand einer Fallstudie zur Aufarbeitung gebrauchter Computer in den USA validieren die Autoren ihr Modell und ermitteln einen potentiellen Gewinnzuwachs von 15,8 %. Die Autoren berücksichtigen jedoch weder die Mehrstufigkeit der RL noch die Potentiale eines erhöhten Informationsaustauschs. (Li & González et al. 2009)

Thammatadatrakul & Chiadamrong (2019) untersuchen Lagerhaltungs- und Priorisierungsstrategien für ein integriertes Remanufacturing- und Produktionssystem mit einem gemeinsamen Fertigteilelager, wobei die Kosten für den Remanufacturing-Prozess von der Qualität der Cores abhängig sind. Die Autoren ermitteln zunächst mit Hilfe des Optimierungsmodells eine Initiaillösung unter deterministischen Annahmen und wenden dann Simulation und Optimierung iterativ an, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium (z. B. obere Schranke für Anzahl an Iterationen) erreicht wird. Anhand fiktiver Beispieldaten kommen die Autoren zu dem Fazit, dass eine koordinierte Produktions- und Lagerhaltungspolitik zwischen Neuproduktion und Aufarbeitung von Cores zu einer Reduktion der unvorhersehbaren Bedingungen aufgrund eines unsicheren Produktrückflusses führen. Neben der Qualitätsabhängigkeit des Remanufacturings bleiben weitere produktspezifische Informationen sowie eine mehrstufige RL unberücksichtigt. (Thammatadatrakul & Chiadamrong 2019)

3.3 Ableitung des Forschungsdefizits

Die vorhergehenden Kapitel zeigen, dass zwar vielfältige verwandte Forschungsarbeiten existieren, von denen jedoch bislang kein Ansatz die in Kapitel 3.1 abgeleiteten Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Tabelle 3.1 stellt eine zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Ansätze hinsichtlich dieser Anforderungen dar.

Bestehende Literatur beschäftigt sich sowohl mit lang-, mittel- und kurzfristigen Problemen, die verschiedene Planungs- und Steuerungsaufgaben in einer RL abdecken (A1). Komplexe und mehrstufige Netzwerkstrukturen (A2), die insbesondere im Automotive Aftermarket AA vorherrschen, werden hingegen nur selten und unzureichend berücksichtigt, z. B. in den Ansätzen von Cannella & Bruccoleri et al. (2016) und Okorie & Charnley et al. (2020), in

denen ein dreistufiges Netzwerk betrachtet wird. In weiteren Ansätzen wird zwar die Komplexität und Mehrstufigkeit der RL theoretisch beschrieben, allerdings findet entweder keine dynamische Modellierung und Bewertung (vgl. Östlin 2008) oder keine explizite Modellierung des Informationsaustauschs (vgl. Köhler 2011) statt. Der Ansatz von Kuo (2011) ist dabei hinsichtlich seiner Relevanz für die vorliegende Arbeit sowohl bezüglich des mittelfristigen Planungshorizontes, als auch hinsichtlich der mehrstufigen und dynamischen Modellierung des Material- und Informationsflusses in der RL hervorzuheben.

Weitere Defizite sind in Bezug auf die Auswirkungen einer Steigerung des Informationsaustauschs und der Transparenz in einer mehrstufigen RL vorhanden: Obwohl Cannella & Bruccoleri et al. (2016) eine mögliche Reduktion des Bullwhip-Effektes ermitteln, wird die explizite Modellierung eines mehrstufigen Informationsaustauschs in der RL (A3) vernachlässigt. Treber (2020) analysiert zwar die Auswirkungen eines mehrstufigen Informationsaustauschs unter Berücksichtigung der Netzwerkstruktur, vernachlässigt jedoch die besonderen Herausforderungen und Rahmenbedingungen der RL. Hinsichtlich der Einbeziehung mehrerer Informationsausprägungen (A4) identifizieren Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. (2015) zwar verschiedene Informationsarten und deren -ausprägungen im Allgemeinen bzw. Li & Chao et al. (2012) für den Anwendungsfall der Elektro- und Elektronikindustrie im Speziellen, vernachlässigen jedoch die Modellierung des konkreten Nutzens dieser. In den Arbeiten von Ferguson & Guide et al. (2009), Denzel & Ferguson et al. (2010) und Zikopoulos (2017) und van Wassenhove & Zikopoulos (2010) wird hingegen nur das übergeordnete Merkmal der Qualität betrachtet. Eine umfassende Berücksichtigung des Orts und Aufwands der Informationsaufnahme (A5) ist hingegen nicht gegeben. Einzig der Ansatz von Zikopoulos (2017) berücksichtigt den Ort und die Auswirkungen einer frühzeitigen Informationsaufnahme auf die Produktions- und Bedarfsplanung, vernachlässigt jedoch den Aufwand dieses Schrittes.

Der im Remanufacturing notwendige Austausch und Ersatz von nicht mehr funktionsfähigen Komponenten eines Cores und der damit verbundene Bezug von Neukomponenten wird lediglich in den Arbeiten von Zhang & Guan et al. (2019) und Malolan & Mathirajan (2020) berücksichtigt. Darüber hinaus betrachtet nur Zhang & Guan et al. (2019) realitätsnahe Herausforderungen wie bspw. notwendige Lieferzeiten. Jedoch leisten einige Autoren Vorarbeiten bzgl. der Einteilung von Cores in Qualitäts- bzw. Prioritätsklassen, um für diese spezifischere Entscheidungen zu treffen (vgl. Denzel & Ferguson et al. 2010; Ferguson & Guide et al. 2009; van Wassenhove & Zikopoulos 2010; Li & González et al. 2009). Die Berechnung dynamischer, instanzindividueller Regenerationsraten (A6) bei der MRP wird jedoch in keinem der analysierten Ansätze hinreichend betrachtet. Die Einflüsse von produktspezifischen Informationen (A7) auf die Beschaffungsentscheidungen, insbesondere die Anpassung von Bestellmengen und -zeitpunkten, werden in den analysierten Ansätzen ebenfalls nur

eingeschränkt berücksichtigt. Lediglich Zikopoulos (2017) und Thammatadatrakul & Chiadamrong (2019) beziehen das übergeordnete Merkmal der Corequalität in die Produktions- und Beschaffungsplanung ein. Auch die dem Core zugrundeliegende Produktstruktur (A8), d. h. die Berücksichtigung enthaltener Teilsysteme und Komponenten, wird häufig von der Betrachtung ausgeschlossen. Stattdessen werden in der existierenden Literatur Produkte lediglich als Gesamtsystem betrachtet sowie bspw. in CLSC Neuprodukte und aufgearbeitete Cores als perfekte Substitute angenommen (vgl. Kuo 2011; Mawandiya & Jha et al. 2020). Diese Annahme kann jedoch für das Remanufacturing im Allgemeinen bzw. für den AA im Speziellen i. d. R. nicht getroffen werden (Gupta 2013; Robotis & Bhattacharya et al. 2005; Kalverkamp 2018). Köhler (2011) und Malolan & Mathirajan (2020) beziehen die spezifische Produktstruktur in ihre Untersuchungen mit ein und analysieren diesen Ansatz anhand von beispielhaften Produkten aus der automobilen Anwendung. Zuletzt wird nur in der Minderheit der Ansätze die Aufarbeitung mittels Pull-Strategie modelliert (A9), obwohl bestehende Arbeiten dadurch klare Vorteile bzgl. der Reduktion der multidimensionalen Unsicherheiten, Kosten und Durchlaufzeiten zeigen (Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015).

Eine dynamische Modellierung (A10) wird mehrheitlich verfolgt, indem Simulation oder mehrperiodische Optimierung als Entscheidungsunterstützungssysteme zur Anwendung kommen (vgl. Thammatadatrakul & Chiadamrong 2019; Cannella & Bruccoleri et al. 2016; Tang & Naim 2004). Die für das Remanufacturing typischen, multidimensionalen Unsicherheiten (A11) werden nur eingeschränkt abgebildet, häufig mit einem Fokus auf den unsicherheitsbehafteten Zustand der Cores und die resultierende Erfolgswahrscheinlichkeit für das Remanufacturing (vgl. Ferrer 2003; Panagiotidou & Nenes et al. 2013; Denzel & Ferguson et al. 2010). Weniger Ansätze beschäftigen sich auch mit anderen Unsicherheitsarten in der RL, z. B. hinsichtlich des unsicheren Zeitpunkts bzw. Menge der zurückfließenden Cores (vgl. Ketzenberg 2009). Zuletzt ist festzustellen, dass sich die Mehrheit der Autoren lediglich mit der Untersuchung ökonomischer Zielgrößen wie Kosten und Durchlaufzeiten befassen. Neben dieser Dimension sind jedoch auch ökologische Auswirkungen von Interesse, insbesondere bedingt durch das steigende Umweltbewusstsein in Gesellschaft und Politik. Lediglich Kuo (2011) und Sundin (2004) nehmen eine hinreichende multikriterielle Bewertung (A12) vor, wobei sie die soziale Dimension der Nachhaltigkeit unberücksichtigt lassen.

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, diese Forschungslücke mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Ansatz zu schließen.

Tabelle 3.1: Bewertung relevanter Forschungsansätze (in alphabetischer Reihenfolge) zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik.

		Problemstellung und Netzwerkstruktur	Informationsaustausch und Transparenzsteigerung	Materialbedarfsplanung im Remanufacturing	Methodik und Abbildung von Wirkzusammenhängen
		Planungshorizont der Problemstellung (A1)	Mehrstufiger Informationsaustausch (A3) Mehrere Informationsausprägungen (A4) Berücksichtigung der Informationsaufnahme (A5)	Barockbelegung dynamischer Regenerationsraten (A6) Einflüsse prozokspezifischer Informationen (A7) Einbeziehung der zugrundeliegenden Produktstruktur (A8) Strategie der Aufarbeitung (A9)	Dynamisches System (A10) Modellierung von Unsicherheiten (A11) Multikriterielle Bewertung (A12)
○	nicht erfüllt				
◐	geringfügig erfüllt				
◑	teilweise erfüllt				
◒	größtenteils erfüllt				
◓	voll erfüllt				
3.2.1 Ansätze für die Materialbedarfsplanung im Remanufacturing					
	Big & Dhamija et al. (2021)	3	◐	◐	◐
	Boutarfa & Senoussi et al. (2020)	3	◐	◐	◐
	Ferrer (2003)	2	◐	◐	◐
	Ferrer & Whybark (2001)	3	◐	◐	◐
	Fleischmann (2000)	1, 2	◐	◐	◐
	Kuo (2011)	2	◐	◐	◐
	Lau & Xie et al. (2008)	2	◐	◐	◐
	Malolan & Mathirajan (2020)	1, 2	◐	◐	◐
	Mahadevan & Pyke et al. (2003)	3	◐	◐	◐
	Mawandya & Jha et al. (2020)	2, 3	◐	◐	◐
	Östlin (2008)	1, 2, 3	◐	◐	◐
	Östlin & Sundin et al. (2008)	2, 3	◐	◐	◐
	Panagiotidou & Nenes et al. (2013)	3	◐	◐	◐
	Spengler (1999)	3	◐	◐	◐
	Sundin & Dumbäck (2013)	1, 2	◐	◐	◐
	Thevenin & Adulyasak et al. (2021)	2	◐	◐	◐
	Zhang & Guan et al. (2019)	3	◐	◐	◐
3.2.2 Ansätze über den Nutzen von Informationen in Netzwerken					
	Barquet & Rozenfeld et al. (2013)	1	◐	◐	◐
	Cachon & Fisher (2000)	3	◐	◐	◐
	Cannella & Brucocoli et al. (2016)	2	◐	◐	◐
	Denzel & Ferguson et al. (2010)	2	◐	◐	◐
	Ferguson & Guide et al. (2009)	2	◐	◐	◐
	Ketzenberg (2009)	2, 3	◐	◐	◐
	Köhler (2011)	1	◐	◐	◐
	Kurliova-Palisaitiene & Lindkvist et al. (2015)	2	◐	◐	◐
	Kurliova-Palisaitiene & Sundin (2015)	2	◐	◐	◐
	Li & Chao et al. (2012)	2	◐	◐	◐
	Okone & Chamley et al. (2020)	2, 3	◐	◐	◐
	Stötting (2006)	1, 2	◐	◐	◐
	Sundin (2004)	1	◐	◐	◐
	Tang & Nam (2004)	2	◐	◐	◐
	Treber (2020)	1, 2	◐	◐	◐
	van Wassenhove & Zikopoulos (2010)	2, 3	◐	◐	◐
	Walther (2010)	1, 2	◐	◐	◐
	Zikopoulos (2017)	3	◐	◐	◐
	Zikopoulos & Tagaras (2007)	1, 2	◐	◐	◐
	Zikopoulos & Tagaras (2009)	2, 3	◐	◐	◐
3.2.3 Ansätze zur simulationsbasierten Optimierung in der Rückführungslogistik					
	Li & González et al. (2009)	2, 3	◐	◐	◐
	Oflazgil (2017)	1	◐	◐	◐
	Suyabatmaz & Atekin et al. (2014)	1	◐	◐	◐
	Swamkar & Harding (2009)	1	◐	◐	◐
	Thammatadatrakul & Chadamrong (2019)	2, 3	◐	◐	◐

Legende: 1 - langfristiq, 2 - mittelfristiq, 3 - kurzfristig

4 Überblick über den Lösungsansatz

Auf Basis des in Kapitel 3.3 identifizierten Forschungsdefizits wird im Folgenden der Lösungsansatz zur Erreichung der in Kapitel 1.2 formulierten Zielsetzung einer Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) für die Verbesserung der Materialbedarfsplanung (MRP) im Remanufacturing vorgestellt.

Die effiziente Planung und Steuerung der RL ist ein essentieller Bestandteil und Erfolgsfaktor für zirkuläre Geschäftsmodelle im Remanufacturing. Aufgrund multidimensionaler Unsicherheiten ist die Planung und Steuerung der RL jedoch komplex. Wie in Kapitel 2.1 erläutert, wird während des Remanufacturings u. a. die Teilverbindung zwischen den Komponenten eines Cores aufgehoben und die Komponenten auf ihre Wiederverwendbarkeit geprüft bzw. entsprechende Aufarbeitungsschritte durchgeführt. Komponenten, die nicht mehr aufgearbeitet werden können, müssen dabei durch zu beschaffende Neukomponenten ersetzt werden. Die Ermittlung der Bestellzeitpunkte und -mengen wird aufgrund der multidimensionalen Unsicherheiten der zurückfließenden Cores erheblich erschwert.

Mit Hilfe eines erhöhten, mehrstufigen Informationsaustauschs in der RL soll die MRP dieser Neukomponenten für das Remanufacturing verbessert werden, indem produktbezogene Unsicherheiten reduziert und Prognosen über den Rückfluss von Cores verbessert werden. Hierzu wird ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell entwickelt, welches Wirkzusammenhänge zwischen einem erhöhten Informationsaustausch und der MRP in Form von ökonomischen und ökologischen Auswirkungen identifiziert und somit für die Quantifizierung des Nutzens der Informationsaufnahme und -weitergabe in der RL für die MRP von neuen Komponenten als Entscheidungsunterstützung dient. Abschließend werden anhand einer rangbasierten Selektion die Güte der ermittelten Lösungen gegenüber einer Benchmark-Lösung und einer Nutzwertanalyse sowie der PROMETHEE-Methode Handlungsempfehlungen und Insensitivitätsintervalle hinsichtlich der zu verwendenden Bestellpolitik sowie der Priorisierung der zu erhebenden Informationen abgeleitet.

Aufgrund der Relevanz und Komplexität der RL im AA (vgl. Kapitel 1.1 und Kapitel 2.1.2) fokussiert sich diese Arbeit auf die Modellierung und Analyse ebendieser. Dabei wird wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben die Sicht eines OER-Unternehmens angenommen, bspw. eines Tier 1-Zulieferers aus der klassischen automobilen Wertschöpfungskette. In Kapitel 7 wird ein Ausblick darauf gegeben, wie das vorgestellte Konzept auf andere Branchen übertragbar ist. Hinsichtlich der Rückgabe von EoL-Produkten sowie der zugehörigen Informationsaufnahme und -weitergabe wird ein bereits existierendes Geschäftsmodell bzw. Anreizsystem angenommen, sodass dieses in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Das modellierte Remanufacturing-System legt den Fokus auf die RL, sodass die Prozessschritte

der Aufarbeitung selbst vereinfacht modelliert werden. Zusätzlich wird angenommen, dass lediglich eine Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten besteht, d. h. die lineare Produktion für den Primärmarkt wird nicht berücksichtigt.

Zur Erreichung der Zielsetzung ist der Lösungsansatz in drei Abschnitte unterteilt, die in Kapitel 5 im Detail erläutert werden (vgl. Abbildung 4.1). Im ersten Abschnitt (vgl. Kapitel 5.1-5.3) findet zunächst die Formalisierung und Modellierung der Systemelemente statt, d. h. es werden *Beschreibungsmodelle* entsprechend des Abstraktionsgrades des zugrunde liegenden Planungshorizontes einer mittelfristigen MRP entwickelt (A1). Dabei wird in Kapitel 5.1 der Materialfluss in der RL modelliert. Aufgrund der mehrstufigen RL (A2) umfasst dies zunächst die Identifikation von Core-Quellen im AA und die daraus resultierende Ableitung von Materialflüssen (vgl. Kapitel 5.1.1). Darauf aufbauend erfolgt eine wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses in der RL, die die beteiligten Akteure, relevante produktions- und logistikbezogene Aspekte, sowie Steuerungsregeln und Schnittstellen dieser formalisiert (vgl. Kapitel 5.1.2). Abschließend wird die Modellierung der einzelnen Elemente aus der RL daraus abgeleitet (vgl. Kapitel 5.1.3). Damit erfolgt die Charakterisierung der RL und Ableitung von Materialflüssen. Als weiterer Bestandteil der Beschreibungsmodelle findet in Kapitel 5.2 die Modellierung des mehrstufigen Informationsaustauschs in der RL statt (A3). Hierzu erfolgt zunächst die Identifikation produktspezifischer Informationen, die heutzutage noch nicht aufgenommen bzw. weitergegeben werden, aber als potentiell nützlich bewertet werden (vgl. Kapitel 5.2.1). Aus diesen produktspezifischen Informationen wird ein Rezeptormodell abgeleitet, welches den spezifischen Nutzen einzelner Informationsausprägungen auf ausgewählte Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL darstellt (A4, vgl. Kapitel 5.2.2). Abschließend erfolgt die Modellierung eines zentralen Informationsagenten, welcher den Zugriff einzelner Agenten entsprechend der Berücksichtigung der Informationsaufnahme steuert und somit eine effizientere MRP ermöglichen kann (A5, vgl. Kapitel 5.2.3). Zusammenfassend wird somit das Potential eines erhöhten Informationsaustauschs in der RL auf nachgelagerte Planungs- bzw. Steuerungsaufgaben ermittelt. Zusätzlich erfolgt in Kapitel 5.3 die Modellierung der MRP der zu beschaffenden Neukomponenten. Hierzu wird zunächst ein Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten (A6) mit Hilfe der zuvor identifizierten und relevanten Produktinformationen (A7) vorgestellt (vgl. Kapitel 5.3.1). Anschließend findet die Modellierung stochastischer Bestellpolitiken statt, welche die dynamischen Regenerationsraten als Input nutzen, um daraus die optimale Bestellmenge bzw. den optimalen Bestellzeitpunkt je Komponente (A8, A9) zu ermitteln. Zum Vergleich dieser Bestellpolitiken wird außerdem eine deterministische Bestellpolitik modelliert, welche von einem perfekten Informationsstand ausgeht (vgl. Kapitel 5.3.2). Abschließend erfolgt die Entwicklung eines Kennzahlensystems bestehend aus ökonomischen und ökologischen

Kennzahlen zur zielgerichteten Bewertung von zu treffenden Entscheidungen (vgl. Kapitel 5.3.3).

Zur Identifikation und Quantifizierung der Wirkzusammenhänge werden auf Basis der Beschreibungsmodelle anschließend *Analysemodelle* entwickelt. In Kapitel 5.4 wird ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell vorgestellt, welches auf den Erkenntnissen der Beschreibungsmodelle aufbaut. Dabei wird zunächst der Aufbau des Simulationsmodells für den Material- und Informationsfluss beschrieben, um das dynamische System der RL abzubilden (A10, vgl. Kapitel 5.4.1). Anschließend erfolgt die Vorstellung des Optimierungsmodells für die MRP, die die multidimensionalen Unsicherheiten der RL berücksichtigt (A11, vgl. Kapitel 5.4.2). Außerdem erfolgt die Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung, sodass die Beziehung zwischen Simulation und Optimierung definiert wird (vgl. Kapitel 5.4.3). In Kapitel 5.4.4 wird abschließend ein Vorgehen zur strukturierten und zielgerichteten Durchführung von Experimenten und damit zur zielgerichteten Identifikation und Quantifizierung von Wirkzusammenhängen unter Berücksichtigung multikriterieller Zielgrößen vorgestellt (A12).

Zuletzt wird im Rahmen der *Entscheidungsmodelle* in Kapitel 5.5 ein allgemeingültiges Vorgehen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen aus den zuvor vorgestellten Beschreibungs- und Analysemodellen vorgestellt.

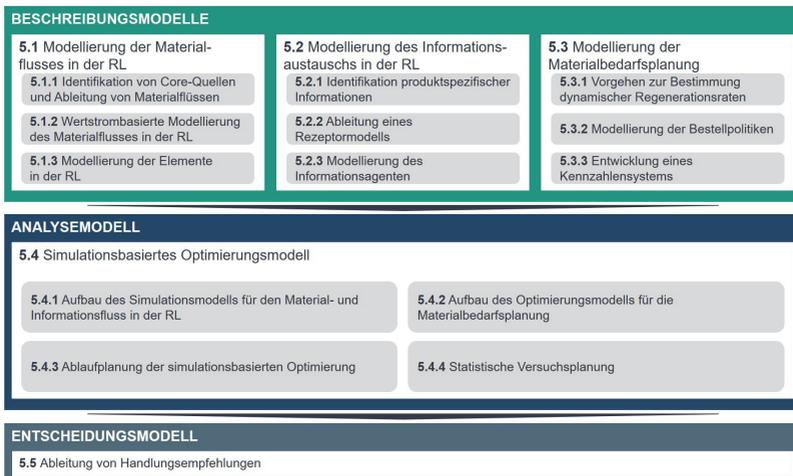


Abbildung 4.1: Überblick über den Lösungsansatz.

5 Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik

Nachdem Kapitel 4 einen Überblick über den Lösungsansatz gegeben hat, geht das folgende Kapitel im Detail auf diesen ein. Kapitel 5.1-5.3 stellen die Beschreibungsmodelle dar, Kapitel 5.4 widmet sich dem Analysemodell und Kapitel 5.5 präsentiert das Entscheidungsmodell.

5.1 Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik

Die Rückführungslogistik (RL) umfasst die Planung, Implementierung und Steuerung des Transports von physischen Gütern und der damit verbundenen Informationen vom Verbrauchsort zu einem Ort der angemessenen Wiederverwendung (Rogers & Tibben-Lembke 1998; Dekker & Fleischmann et al. 2004). Im ersten Teil der Beschreibungsmodelle liegt die Modellierung des Materialflusses im Fokus. Hierzu sind zunächst die Besonderheiten des Automotive Aftermarkets (AA) sowie die daraus resultierende Ableitung von Materialflüssen zu berücksichtigen (Kalverkamp & Raabe 2018, vgl. Kapitel 5.1.1). Anschließend erfolgt die wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses (vgl. Kapitel 5.1.2) sowie die Ableitung der Modellierung der Elemente in der RL (vgl. Kapitel 5.1.3).

5.1.1 Identifikation von Core-Quellen und Ableitung von Materialflüssen

Die Versorgung des Remanufacturings mit zurückgeführten Cores ist Grundvoraussetzung für das Remanufacturing. Hierzu ist zunächst die Identifikation geeigneter Core-Quellen sowie die Ableitung resultierender Materialflüsse notwendig (Kalverkamp & Raabe 2018), welche im folgenden im Detail erläutert werden. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Weldner 2021¹, A_Eisen 2021). Aufgrund der Komplexität und der branchenabhängigen Eigenschaften wird dies für den der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Anwendungsfall des AA detailliert diskutiert. Für weitere Literatur im Bereich des Core-Akquisitionsmanagements sei auf Gaur & Subramoniam et al. (2017) und Daniel & Guide et al. (2000) verwiesen.

Nach Kalverkamp & Raabe (2018) werden im automobilen Remanufacturing markengebundene (autorisierte) und unabhängige Werkstätten sowie automobiler Endverwerter (sog. "Schrottplätze") als potentielle Quellen von Cores identifiziert (Kalverkamp & Raabe 2018). Aufgrund geringer, zu erwartender Core-Mengen und -Qualitäten von Schrottplätzen (Kalverkamp & Raabe 2018) werden diese im Rahmen der Modellierung in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Außerdem wird auf eine Modellierung von Core-Brokern als weitere Quelle für Cores verzichtet, da diese lediglich als zwischengeschaltete Großhändler

¹ Studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden, sind im weiteren Verlauf der Arbeit nach dem Format (A_<Nachname><Jahr>) referenziert.

agieren (vgl. Kalverkamp & Raabe 2018; Steinhilper 1998). Ebenso werden Endkunden nicht als weitere Core-Quellen modelliert, um die Komplexität des modellierten Systems handhaben zu können (vgl. Sundin & Dunbäck 2013).

Aus den beiden verbleibenden Core-Quellen, den *markengebundenen* (OES, engl.: "Original Equipment Service") und den *unabhängigen Werkstätten* (IAM, engl.: "Independent Aftermarket") lassen sich mögliche Materialflüsse ableiten, die als Basis für die Modellierung dienen (vgl. Abbildung 5.1). Aufgrund der in Kapitel 4 getroffenen Fokussierung entwickelt die vorliegende Arbeit keine neuen, zirkulären Geschäftsmodelle bzw. Anreizsysteme. Daher müssen existierende Abläufe und Materialflüsse genutzt werden, um die Machbarkeit des zu entwickelnden Konzepts sicherzustellen. Dabei sind insbesondere diejenigen Fälle interessant, in denen die Werkstätten frei über die ausgebauten Cores verfügen können bzw. dafür keine weitere lokale Verwendung mehr existiert, sodass eine Sammlung und Weiterverwendung dieser mit wenig Aufwand umgesetzt werden kann. Hierzu wurden acht semi-strukturierte qualitative Experteninterviews mit Vertretern dieser beiden Core-Quellen durchgeführt und ausgewertet. Diese Untersuchungsmethode eignet sich insbesondere zur Erschließung neuer Erkenntnisse sowie der Formalisierung von Expertenwissen (vgl. Boyatzis 1998; Helfferich 2011; Misoch 2019; Kuckartz 2012; Bogner & Littig et al. 2014). Die Interviews wurden mit Fokus auf Produkte durchgeführt, die potentiell zukünftig in Remanufacturing-Portfolios aufgenommen werden sollen. Neben den heutzutage üblichen mechatronischen Produkten (z. B. Startermotoren, Generatoren, Bremsstäbel) lag der Fokus somit insbesondere auf elektronischen Produkten (z. B. Steuergeräte (ECUs), Casper 2021). Der verwendete Interviewleitfaden sowie weiterführende Informationen sind in Anhang A1.1-A1.4 dargestellt.

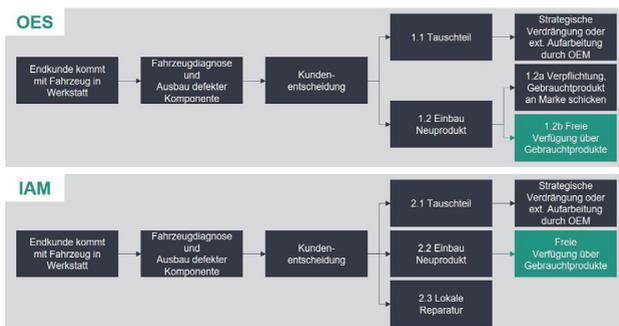


Abbildung 5.1: Ableitung von Materialflüssen aus den identifizierten Core-Quellen, grün: fokussierte Materialflüsse (A_ Weldner 2021).

Für markengebundene Werkstätten (OES, vgl. Abbildung 5.1 oben) ergeben sich zwei mögliche Materialflüsse für Produkte, die aus einem Fahrzeug ausgebaut und potentiell dem Remanufacturing als Core zugeführt werden sollen. Es kann entweder ein sog. "Tauschteil" (1.1) bei der ihr zugehörigen Marke bestellt und eingebaut werden. Der ausgebaute Core geht dann üblicherweise an den Automobilhersteller (OEM), der entweder mittels Vorkaufrecht eine strategische Verdrängung von Cores auf dem Markt verfolgt ("preemption strategy", vgl. Ferguson & Toktay 2006) oder externe Unternehmen mit der Aufarbeitung der Produkte beauftragt ("contracted remanufacturing", CR, vgl. Kapitel 2.1.2). In letzterem Fall entspricht das "Tauschteil" i. d. R. einem aufgearbeiteten Produkt. Alternativ können Werkstätten ein Neuprodukt über ihre zugehörige Marke bestellen und in das Fahrzeug des Endkunden einbauen (1.2). Je nach Anforderungen, vertraglicher Verpflichtungen und Integrationsgrad der markengebundenen Werkstätten mit ihrer Marke sind diese dann entweder verpflichtet, die ausgebauten Cores an ihre zugehörige Marke zurückzuschicken (1.2a) oder sie können frei darüber verfügen (1.2b).

Für unabhängige Werkstätten (IAM, vgl. Abbildung 5.1 unten) ergeben sich hingegen drei unterschiedliche Materialflüsse. Zunächst besteht analog zu den Optionen der OES-Werkstätten die Möglichkeit der Bestellung eines Tauschteils (2.1) vom OEM und der damit üblicherweise einhergehenden Verpflichtung zur Rücksendung des entsprechenden Cores sowie des Einbaus eines Neuproduktes (2.2). Darüber hinaus wurde in den durchgeführten Interviews bei den IAM-Werkstätten die Möglichkeit einer lokalen Reparatur (2.3) genannt, welche für Endkunden i. d. R. eine höhere Wartezeit sowie Unsicherheiten bzgl. der Qualität der Reparatur bedeutet und daher von OES-Werkstätten nicht angeboten wird. Wie bereits erwähnt sind insbesondere diejenigen Fälle relevant, in welchen die Werkstätten frei über die ausgebauten Cores verfügen können. Diese relevanten Pfade zur Modellierung der Materialflüsse sind daher in Abbildung 5.1 grün dargestellt. Die zugrundeliegenden Geschäftsprozesse zur Gestaltung und Steuerung von Core-Rückflüssen sind in Anhang A2.1-A2.4 dargestellt.

5.1.2 Wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik

Auf Grundlage der abgeleiteten Materialflüsse aus den beiden Core-Quellen der OES- und IAM-Werkstätten lassen sich charakteristische Merkmale des Materialflusses sowie maßgebende Annahmen zur Konzeption und Modellierung identifizieren. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Eisen 2021, A_Lindemann 2020). Auf Netzwerkebene muss zunächst festgelegt werden, welche Akteure in Hinblick auf die Zielsetzung von Relevanz und somit in die Betrachtung einzubeziehen sind (vgl. van Wassenhove & Zikopoulos 2010; Zikopoulos 2017; Suyabatmaz & Altekin et al. 2014; Swarnkar & Harding 2009; Kalverkamp & Raabe 2018). Neben den identifizierten

Core-Quellen, die in der Modellierung als Werkstätten $wk \in WK$ zusammengefasst werden, sowie Standorten des fokalen Remanufacturing-Unternehmens $rest \in ReSt$ sind dies in einer RL i. d. R. Sammelstandorte $sast \in SaSt$ sowie externe oder interne Lieferanten $l \in L$. Für das fokale Remanufacturing-Unternehmen müssen zudem notwendige Prozessschritte sowie Steuerungsmechanismen für die Aufarbeitung von Cores definiert werden (vgl. Abbildung 5.2).

Der Materialfluss in der betrachteten RL lässt sich in zwei Phasen unterteilen: (1) der eigentliche Rückwärtsfluss der Cores $co \in CO$ von Werkstätten über Sammelstandorte zum Remanufacturing-Standort, welcher als *Push*-Prozess modelliert wird und (2) der Prozess zur Aufarbeitung dieser Cores und Befriedigung der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten D_{rpro} , im Vorwärtsfluss, welcher als *Pull*-Prozess modelliert wird.

In der ersten Phase der RL können beliebige Wahrscheinlichkeitsverteilungen $WV_{co,t,wk}$ zur Modellierung des Ankunftsprozesses von Cores co in Periode t an Werkstatt wk auftreten. Weiterhin können die optionalen Prozessschritte der Informationsaufnahme und Qualitätsbeurteilung von Cores durch Werkstätten bzw. Sammelstandorte zum Aussortieren dieser führen, sodass dies nicht erst beim Remanufacturing-Standort erfolgt. Das sich daraus ggfs. ergebende Einsparpotential durch einen erhöhten Informationsaustausch ist einer der Untersuchungsgegenstände der vorliegenden Arbeit. Nach der Core-Annahme am Remanufacturing-Standort werden diese in ihre Komponenten kom_{co} demontiert und eingelagert. Aufgrund des modellierten *Push*-Prozesses werden somit alle Cores, die zurückfließen und aufgrund der aufgenommenen Informationen nicht als ungeeignet für das Remanufacturing deklariert und somit aussortiert werden, nach diesem Vorgehen behandelt. Die aussortierten Cores können bspw. dem Recycling zugeführt werden, wobei dieser Schritt nicht im Fokus steht und somit aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit in Abbildung 5.2 nicht dargestellt ist.

In der zweiten Phase folgen die Prozesse zur Aufarbeitung, Remontage und Testen der Cores beim Remanufacturing-Standort und dem Versand zu neuen Endkunden. Um einen in Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit angemessenen Detaillierungsgrad der Modellierung zu realisieren, wird auf die Modellierung weiterer Prozessschritte verzichtet. Die modellierten Prozessschritte pr besitzen je Core, Komponente bzw. aufgearbeitetem Produkt individuelle und unsicherheitsbehaftete Bearbeitungszeiten $t_{co,pr}$, $t_{kom,pr}$ bzw. $t_{rpro,pr}$, woraus sich wiederum individuelle Prozesskosten $c_{co,pr}$, $c_{kom,pr}$ bzw. $c_{rpro,pr}$ ergeben. Im Fall von unzureichend vorhandenen Komponenten aus der RL können interne oder externe Lieferanten $l \in L$ in Anspruch genommen werden. Hierzu wird ein Beschaffungsauftrag $besa \in BesA$ vom Remanufacturing-Standort an den Lieferanten generiert, woraus sich eine Sendung $sed \in Sed$ ergibt, die mittels Transport $trans \in Trans$ zum Remanufacturing-Standort

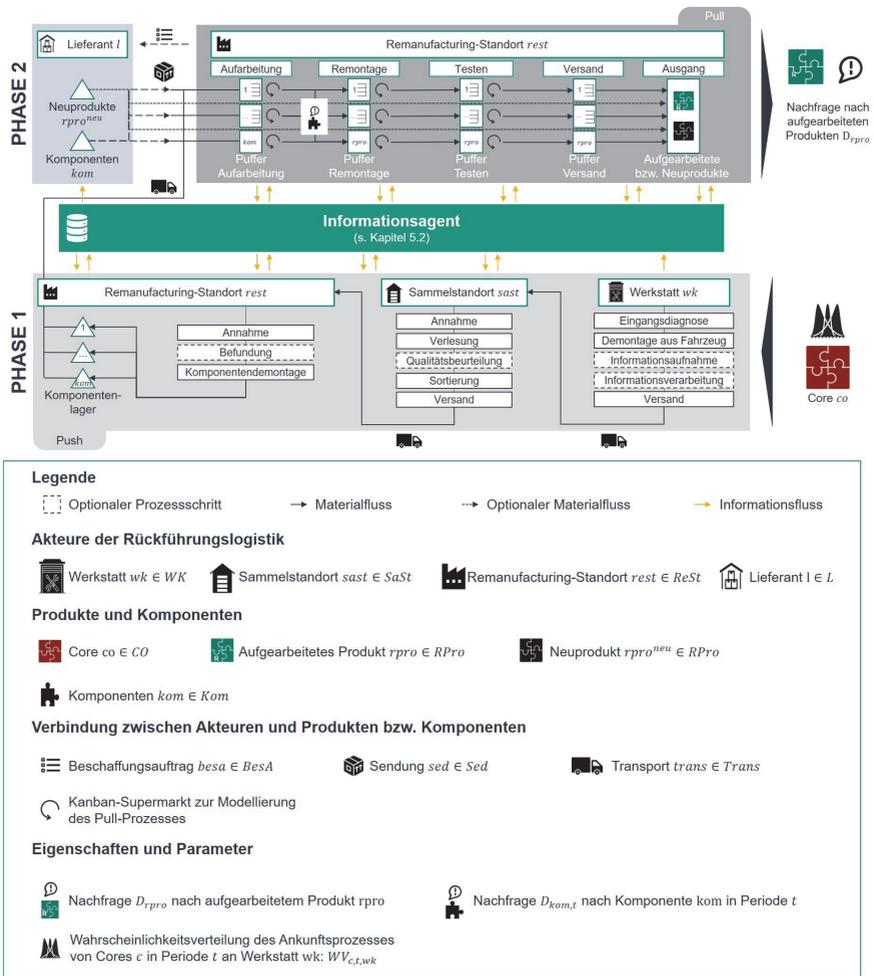


Abbildung 5.2: Wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik (A_Nilles 2022, A_Eisen 2021).

transportiert wird. Zur Sicherstellung der Generalisierbarkeit des modellierten Systems ist neben der Abbildung des Remanufacturings als zirkuläre Wertschöpfungsmethode auch eine klassische lineare Produktion möglich, indem von Lieferanten $l \in L$ Neuprodukte bezogen werden. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen in der Literatur (vgl. Goltsovs & Ponte et al. 2019; Cannella & Bruccoleri et al. 2016; Tang & Naim 2004; Malolan & Mathirajan 2020;

Mahadevan & Pyke et al. 2003) steht dieses sog. "hybrid Remanufacturing-Manufacturing"-System jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Stattdessen wird die lineare Produktion lediglich als *Fallback-Option* betrachtet, um Kundennachfrage auch bei unzureichender Core-Verfügbarkeit bedienen zu können. Die dadurch entstehenden Kosten sind in der Realität i. d. R. höher als die Remanufacturing-Kosten und können daher als eine Art Strafkosten verstanden werden, z. B. für Fehlmengen. Während der Prozessschritte der Befundung, Komponentendemontage und Aufarbeitung kann es erneut zum Aussortieren von Cores bzw. deren Komponenten kommen, da bspw. Defekte erst nach erfolgter Demontage erkennbar sind (Sundin 2004). Auf Ebene der Komponenten kommt es dabei zur Realisierung der instanzindividuellen Regenerationsrate. Analog zu den frühzeitig aussortierten Cores können auch die aussortierten Komponenten bspw. dem Recycling zugeführt werden, was jedoch nicht im Fokus der Arbeit steht und somit nicht abgebildet ist.

Dies stellt weitere Herausforderungen für die Beschaffung von Neukomponenten dar, da ein erhöhter Informationsaustausch die unsicherheitsbehafteten Regenerationsraten zwar präzisieren, die Unsicherheit aber nicht vollständig eliminieren kann. Wie bereits erläutert, beschreibt die Regenerationsrate im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Komponente erfolgreich aufgearbeitet und weiterverwendet werden kann. Obwohl auch diese Prozesse in der Literatur bisher häufig als *Push*-Steuerung modelliert werden, liefern andere Forschungsansätze Hinweise, dass eine verbrauchsgesteuerte *Pull*-Steuerung nicht nur das Streben nach Ressourceneffizienz positiv beeinflusst, sondern auch die multidimensionalen Unsicherheiten sowie Lagerbestände reduziert werden können und der Ausgleich von Angebot und Nachfrage effizienter möglich ist (vgl. Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015; Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018; Goltsos & Ponte et al. 2019; Poles 2013).

Zur Entkopplung des modellierten *Pull*-Prozesses, der durch eine Bestellung nach aufgearbeiteten Produkten von Endkunden ausgelöst und mit Hilfe von Kanban-Kreisen modelliert wird, existieren somit Pufferkapazitäten zwischen den modellierten Prozessschritten. Dadurch können Schwankungen in Bearbeitungszeiten und fehlende Nachschübe von notwendigen Komponenten bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden (vgl. Arnold & Isermann et al. 2008; Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015). Die Auffüllung dieser Puffer erfolgt aus den jeweils vorgelagerten Prozessen. Wie bereits erwähnt müssen für den Fall eines nicht ausreichenden Lagerbestands an Cores zur Deckung der Nachfrage weitere Komponenten von Lieferanten bezogen werden (vgl. Zhang & Guan et al. 2019; Malolan & Mathirajan 2020; Kalverkamp 2018; Guide 2000). Diese Nachschubversorgung wird durch ein entsprechendes Beschaffungs- und Bestandsmanagement geregelt (s. Kapitel 5.3).

Abhängig vom entsprechend gewählten Anreizsystem zur Rückgabe von Cores gehen auch dessen Eigentumsverhältnisse im Verlauf der RL an verschiedene Akteure über. Da diese nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen, werden auch Übergänge in den Eigentumsverhältnissen nicht weiter berücksichtigt.

5.1.3 Modellierung der Elemente in der Rückführungslogistik

Die Modellierung der Elemente in der RL orientiert sich an objektorientierten Paradigmen, um eine hohe Flexibilität und Modularität zu realisieren (Gutenschwager & Rabe et al. 2017). Die Modellierung erfolgt mit Hilfe der standardisierten Modellierungssprache *Systems Modeling Language* (SysML), die auf dem Sprachkern der *Unified Modeling Language* (UML) basiert und für Modellierungszwecke weit verbreitet ist (Nyamsi 2020). Grundsätzlich wird SysML in Struktur- (statisch) und Verhaltensmodelle (dynamisch) unterschieden, wobei für ersteres Profil-, Blockdefinitions-, interne Block-, Parameter-, und Paketdiagramme und für letzteres Aktivitäts-, Zustands-, Sequenz-, und Anwendungsfalldiagramme als Modellierungswerkzeuge dienen (Schönherr 2014). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Eisen 2021, A_Nilles 2022). Das Profildiagramm der RL ist in Abbildung 5.3 dargestellt und liefert eine dem festgelegten Detaillierungsgrad entsprechende Beschreibung des Systems.

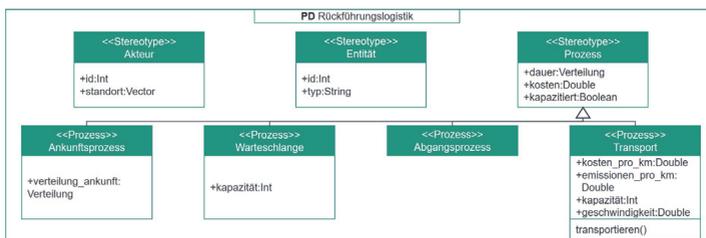


Abbildung 5.3: Profildiagramm (PD) der Domäne Rückführungslogistik (A_Eisen 2021).

Ein Profildiagramm (PD) stellt verschiedene Stereotypen einer betrachteten Domäne zusammenfassend dar. Das PD der Domäne RL besteht somit aus verschiedenen *Stereotypen*, d. h. Systembausteinen, die als Schablone für die Definition der einzelnen Bausteine verwendet werden können (Schönherr 2014). Integraler Bestandteil der RL sind die *Akteure*, wobei jeder Akteur eine eindeutige Identifikationsnummer sowie einen geographischen Standort in Form eines Vektors besitzt. Die Attribute der Blöcke werden in der Form *Attributname:Datentyp* angegeben. Weitere Stereotypen im PD sind *Entitäten*, welche Cores, Komponenten und aufgearbeitete Produkte darstellen können. Diese besitzen neben ihrer eindeutigen Identifikation zusätzliche Informationen zum Core-, Komponenten- bzw. Produkttypen. Darüber

hinaus existiert der Stereotyp *Prozess*, welcher im Allgemeinen eine Prozessdauer und resultierende -kosten sowie Informationen, ob der Prozess kapazitiert ist, enthält. Typische Prozesse können dabei bspw. Demontage-, Aufarbeitungs-, sowie Informationsaufnahme- und -weitergabeprozesse sein. Aufgrund ihrer Besonderheiten werden Ankunfts-, Warteschlangen-, Abgangs- und Transportprozesse spezifischer modelliert. Ein Ankunftsprozess kann dabei sowohl die Ankunft eines Cores in einer Werkstatt als auch die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten darstellen. Da die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten unter den vorgestellten Annahmen (insb. aufgrund des Charakters der Ersatzteilversorgung im AA durch das Remanufacturing) ausschließlich vom Sekundärmarkt ausgeht und somit keine direkte Abhängigkeit von Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten und Angebot zurückfließender Cores besteht, wird auf eine Modellierung mittels prozentualer Abhängigkeit von Nachfrage und zurückgeführten Cores verzichtet (vgl. Tang & Naim 2004; Cannella & Bruccoleri et al. 2016; Ferrer & Whybark 2001; Mawandiya & Jha et al. 2020). Die beiden relevanten Ankunftsprozesse werden stattdessen mit Hilfe unabhängiger Poisson-Prozesse modelliert, woraus sich exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten ergeben, um die zeitlichen Unsicherheiten hinreichend zu berücksichtigen (vgl. Mahadevan & Pyke et al. 2003; Li & González et al. 2009). Ein Warteschlangenprozess dient neben der Lagerung auch zur Realisierung des vorgestellten Kanban-Systems und damit zur Realisierung der Pull-Steuerung im zweiten Teil der modellierten RL (vgl. Abbildung 5.2). Dieser ist in jedem Fall kapazitiert und besitzt somit eine gegebene Kapazität. Ein Abgangsprozess entspricht einer Senke, z. B. im Fall von frühzeitig ausgeschleusten Cores oder Komponenten, die nicht weiter für das Remanufacturing verwendet werden können. Der Transportprozess wird in Anhang A3.1 im Detail erläutert.

Im Folgenden werden essenzielle Bausteine und deren Besonderheiten vorgestellt, welche aus verschiedenen Diagrammen bestehen, die jeweils einen Teilaspekt der Struktur bzw. des Verhaltens visualisieren. Zunächst ist dabei für die Analyse der Wirkzusammenhänge in der RL die Modellierung der Cores als *Entitäten* essenziell. Entitäten umfassen dabei alle Elemente, die zwischen ortsfesten Akteuren transportiert werden und Prozesse zu ihrer Ausführung veranlassen. Die in Abbildung 5.3 dargestellten Eigenschaften bzgl. Identifikationsnummer und Typ des Stereotypen *Entität* werden dabei vererbt. Abbildung 5.4 stellt das zugehörige Blockdefinitionsdiagramm (BDD) der Entität *Core* dar (vgl. Goodall & Sharpe et al. 2019).

Die Entität *Core* besteht aus produktspezifischen Informationen (vgl. Kapitel 5.2) sowie einer Stückliste um den Produktaufbau des Cores zu berücksichtigen. Auf dieser Grundlage wird zwischen *Core* und der Entität *Komponente* eine Aggregationsbeziehung modelliert, d. h. einerseits, dass ein *Core* mehrere *Komponenten* besitzen kann und andererseits, dass die Existenz der *Komponente(n)* unabhängig vom übergeordneten Ganzen ist, was insbesondere



Abbildung 5.4: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) der Entität Core (Goodall & Sharpe et al. 2019, A_Eisen 2021).

in Hinblick auf die Demontage eine essenzielle Voraussetzung ist. Weiterhin werden die Blöcke *Status* und *Prozesshistorie* im BDD des Cores modelliert, die jeweils in einer 1:1-Beziehung mit dem Block Core stehen. Der Block *Status* enthält dabei sowohl Attribute die anzeigen, ob Produktinformationen an den verschiedenen Standorten aufgenommen wurden, als auch Informationen zum aktuellen Standort und dem nächsten erforderlichen Prozess. Der Block *Prozesshistorie* entspricht einer Logdatei und protokolliert alle Prozesse, die ein Core durchläuft, sowie deren Ergebnisse und Statuswechsel. Diese Modellierung gilt analog auch für alle weiteren Entitäten, d. h. für Komponenten und aufgearbeitete Produkte.

Als Blöcke des Stereotyps *Akteur* werden Werkstätten, Sammelstandorte, Remanufacturing-Standorte sowie Lieferanten definiert. Wie bereits erwähnt beginnt der Rückwärtsfluss bei Werkstätten und auf die explizite Modellierung eines Akteurs Kunde wird verzichtet. Dadurch werden Knotenpunkte im Netzwerk und somit die Komplexität der Modellierung signifikant reduziert. Repräsentativ wird das BDD des Akteurs *Werkstatt* in Abbildung 5.5 dargestellt und im Folgenden erläutert.

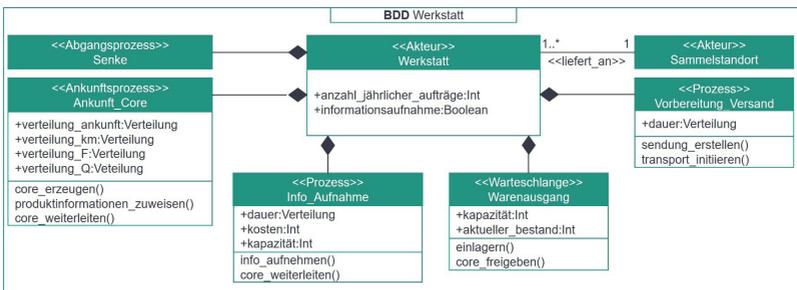


Abbildung 5.5: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs Werkstatt (A_Eisen 2021).

Werkstätten besitzen Attribute zur Definition der jährlichen Aufträge sowie zur Bestimmung, ob in der Werkstatt Informationen erhoben werden oder nicht. Zentraler Prozess der Werkstätten

ist der Ankunftsprozess der Cores. Neben der bereits erläuterten Wahrscheinlichkeitsverteilung hinsichtlich der Ankunft der Cores, müssen weitere Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Ausprägungen der aufgenommenen Informationen (Kilometerstand x_{km} , Fehlercode x_F , Qualität x_Q , vgl. Kapitel 5.2) sowie deren Auswirkungen auf die dynamische Regenerationsrate der enthaltenen Komponenten angenommen werden. Ferguson & Guide et al. (2009), Thammatadatrakul & Chiadamrong (2019) und Okorie & Charnley et al. (2020) nutzen hierzu bspw. eine Gleichverteilung, Zikopoulos (2017) verwendet unterschiedlich parameterisierte Beta-Binomialverteilungen (wobei für die Parameter $\alpha = \beta = 1$ ebenfalls eine Gleichverteilung möglich ist), und Ferrer & Whybark (2001) und Mawandiya & Jha et al. (2020) nutzen diskrete Verteilungen mittels der Festlegung von Prozentsätzen. Durch die flexible Modellierung in dieser Arbeit ist die Verwendung beliebiger Wahrscheinlichkeitsverteilungen möglich. Für weiterführende Literatur im Bereich der Modellierung des Ankunftsprozesses von Cores sei auf die Arbeiten von Matsumoto & Umeda et al. (2016), Liang & Jin et al. (2014), Goltos & Ponte et al. (2019) und Zhou & Xie et al. (2016) verwiesen. Damit werden die im Remanufacturing typischen Unsicherheiten hinsichtlich Qualität, Zeitpunkt und Anzahl der zurückfließenden Cores berücksichtigt und adäquat modelliert. Mit Hilfe der Funktionen *core_erzeugen()* und *produktinformationen_zuweisen()* werden Entitäten des Typs Core in einem festgelegten zeitlichen Abstand erzeugt und die Ausprägungen der für die Bestimmung der dynamischen Regenerationsrate relevanten Informationsattribute festgelegt (vgl. Abbildung 5.4).

Neben dem Ankunftsprozess existieren weitere Prozesse in der Werkstatt: die Aufnahme von Informationen inkl. entsprechender Eigenschaften hinsichtlich Dauer, Kosten und Kapazitäten hat eine Statusänderung des Cores zur Folge. Der Block *Warenausgang* vom Stereotyp *Warteschlange* dient einer Zwischenlagerung und Konsolidierung der Cores bevor mittels des Prozesses *Vorbereitung_Versand* eine Sendung erstellt und ein anschließender Transport an den assoziierten Akteur *Sammelstandort* erzeugt wird. Der *Abgangsprozess* dient dem Ausschleusen von Cores, die nicht für das Remanufacturing geeignet sind. Das BDD des Akteurs *Sammelstandort* ist analog aufgebaut und in Anhang A3.2 dargestellt.

Aufgrund der zentralen Stellung im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden auf die Modellierung des Remanufacturing-Prozesses nach der *Pull*-Steuerung eingegangen. Diese ist in Abbildung 5.6 als Ausschnitt des Remanufacturing-Prozesses dargestellt, das zugrunde liegende interne Blockdiagramm (IBD) wird in Anhang A3.3 erläutert.

Das Auslagern der demontierten Komponenten eines Cores erfolgt dabei nach dem *Pull*-Prinzip, welches durch die jeweils nachgelagerte Stelle ausgelöst wird. Angestoßen wird der Prozess durch einen Auftrag zur Remontage eines aufgearbeiteten Produkts, welcher wiederum aus dem Eingang einer Kundennachfrage $D_{rpro,t}$ resultiert (vgl. Kurilova-Palisaitiene

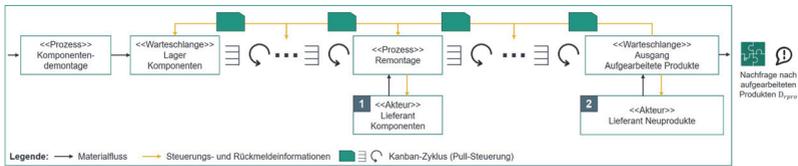


Abbildung 5.6: Modellierung des Remanufacturings nach der Pull-Steuerung (A_Eisen 2021).

& Sundin 2015). Eine durch die Entnahme entstandene Lücke in den Puffern wird durch die Auffüllung mit dem gleichen Artikel wieder geschlossen. Es resultieren somit mehrere, sich selbst steuernde Regelkreise. Externe oder interne Lieferanten $l \in L$ können dabei an zwei Stellen auf den Prozess einwirken: (1) Bei unzureichend vorhandenen Cores bzw. unzureichender Qualität der zu demontierenden Cores, können mittels Lieferanten neue Komponenten beschafft und für die Remontage genutzt werden. (2) Bei unzureichender Kapazität des Remanufacturing-Prozesses insgesamt bzw. bei Fehlmengen notwendiger Komponenten mit zu hoher Lieferzeit können Neuprodukte beschafft werden, welche als Substitute für aufgearbeitete Produkte verkauft werden und wie oben erwähnt als eine Art Strafkosten dienen. In diesen Fällen kommt es zu Fehlmengen, die mittels Fehlmengenkosten abgebildet sind. In Anlehnung an Zhang & Guan et al. (2019) wird dabei für jeden Komponenten-Typ ein separates Bestandsmanagement eingeführt. Das BDD des Akteurs *Lieferant* ist in Anhang A3.4 dargestellt.

Nach erfolgreicher Aufarbeitung der Cores erfolgt die Bedienung der Kundennachfrage mit Hilfe des Blocks *Distribution* (s. Anhang A3.5).

5.2 Modellierung des Informationsaustauschs in der Rückführungslogistik

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, ist neben dem Material- der Informationsfluss ein essenzieller Bestandteil der RL (Rogers & Tibben-Lembke 1998). Da das Remanufacturing von multi-dimensionalen Unsicherheiten geprägt ist, kann ein effizienter Informationsaustausch entscheidender Befähiger für eine bessere Entscheidungsgrundlage im Remanufacturing sein (Seitz & Peattie 2004; Fleischmann 2000). Der Untersuchung dieser Potentiale widmet sich das vorliegende Kapitel. Hierzu wird zunächst in Kapitel 5.2.1 ein Vorgehen zur Identifikation produktspezifischer Informationen im AA sowie eine Kategorisierung dieser vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 5.2.2 zunächst der kategorische Nutzen von produktspezifischen Informationen für verschiedene Planungs- und Steuerungsaufgaben sowie Rezeptormodelle abgeleitet. Letztere stellen dabei den konkreten Nutzen der identifizierten Informationen für spezifische Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL dar und werden am Beispiel der

MRP im Detail vorgestellt. Abschließend wird in Kapitel 5.2.3 die Überführung der gewonnenen Erkenntnisse in einen Informationsagenten als Beschreibungsmodell vorgenommen.

5.2.1 Identifikation produktspezifischer Informationen

Bislang wird in der Literatur meist "Qualität" als übergeordnetes Sortier- und Auswahlkriterium für Cores im Remanufacturing verwendet (vgl. Zikopoulos & Tagaras 2007; Zikopoulos & Tagaras 2008; Barquet & Rozenfeld et al. 2013), von der aus auf die Regenerationsraten der Cores geschlossen wird. Die konkrete Zusammensetzung des Kriteriums "Qualität" bleibt jedoch bislang unerforscht. Lediglich für den Sektor der Elektro- und Elektronikproduktion existieren Ansätze zur Identifikation produkt- und branchenspezifischer Informationen (Li & Chao et al. 2012). Eine ebenso detaillierte Analyse für den Automotive Aftermarket (AA) fehlt jedoch bislang (Kalverkamp & Raabe 2018; Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015). Das folgende Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit auf (vgl. A_Gallei 2021).

Zur Identifikation produktspezifischer Informationen in der RL des AA sowie deren Aufnahmeort und potentiellen Nutzen zur Verbesserung von Planungs- und Steuerungsaufgaben wurden daher neben einer systematischen Literaturanalyse (vgl. Kapitel 2.2 und Kapitel 3.2.2) elf semi-strukturierte Experteninterviews mit beteiligten Akteuren aus der RL durchgeführt, davon vier mit Vertretern von Remanufacturing-Unternehmen, drei mit Vertretern von Sammelstandorten und vier mit Vertretern von markengebundenen und unabhängigen Werkstätten. Diese qualitative Untersuchung ist notwendig und zielführend, da einerseits produktspezifische Informationen im AA bislang noch nicht hinreichend erforscht wurden und andererseits Expertenwissen notwendig ist (vgl. Lamnek 2008, S. 21 ff., Gläser & Laudel 2010; Meuser & Nagel 1989; Bogner & Littig et al. 2002). Die Interviews wurden entgegen der Material- bzw. Informationsflussrichtung durchgeführt und iterativ ausgewertet, um die Ergebnisse der jeweils vorhergehenden Stufe in den nächsten Interview-Stufen zu berücksichtigen. Der Fokus der Interviews lag je nach Stufe entweder auf der Identifikation produktspezifischer Informationen und deren Nutzen für Planungs- und Steuerungsaufgaben (Remanufacturing-Unternehmen), der Aufnahme- und Weitergabemöglichkeiten der entsprechenden Informationen sowie verbundener Aufwände (Werkstätten) oder beidem (Sammelstandorte). Die verwendeten Interviewleitfäden sowie weiterführende Informationen sind in Anhang A4.1-A4.6 dargestellt.

Aus den sieben Interviews mit den Stufen, die einen Nutzen aus den Informationen ziehen (Sammelstandorte und Remanufacturing-Unternehmen) wurde zunächst identifiziert, dass im Status Quo wenige bis keine produktspezifischen Informationen weitergegeben werden. Darauf aufbauend wurden elf produktspezifische Informationsarten identifiziert, die für die

Akteure von Interesse sind. Hierzu gehören, in absteigender Reihenfolge der Anzahl der Nennungen, die Produktnummer, der Kilometerstand des Cores, der bzw. die Fehlercode(s), das Alter des Cores, die allgemeine Qualität, der Produkttyp, die Herkunft, Anzahl und Art durchgeführter Inspektionen am Fahrzeug, die Menge, der Zeitpunkt der Ankunft sowie die korrekte Markierung (vgl. Abbildung 5.7).

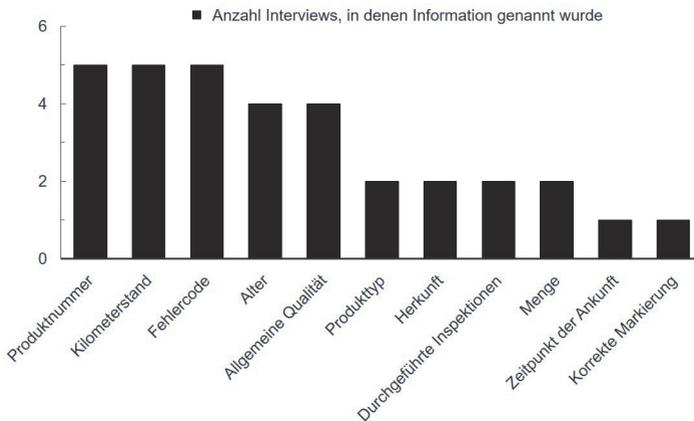


Abbildung 5.7: Detaillierte Interviewergebnisse (A_Gallei 2021).

Nach einstimmiger Meinung der interviewten Akteure wird die *Produktnummer* als wichtigste Information angesehen, da diese zur Identifikation der Cores und Stücklisten sowie dessen Eignung für das Remanufacturing genutzt werden kann. Der *Kilometerstand* wird als ebenso wichtige Information angesehen. Sein potentieller Nutzen lässt sich dabei einerseits aus der Exklusion bestimmter Cores mit einer zu großen Laufleistung und andererseits aus der Extraktion statistischer Nutzungsdaten bzgl. des Verhaltens über die Lebensdauer bestimmen. Die Vorteilhaftigkeit der korrespondierenden *Fehlercodes*, die üblicherweise bei der Inspektion eines Fahrzeugs in einer Werkstatt standardmäßig ausgelesen werden, wird in den meisten Interviews genannt. Dadurch lassen sich erneut Cores mit bestimmten Fehlercodes frühzeitig aus dem Prozess ausschleusen. Mit Hilfe des *Alters* des Cores lassen sich Inkompatibilitäten in der Produktgestalt mit neueren Varianten identifizieren. Dies führt bspw. dazu, dass die Beschaffung von Komponenten für ältere Cores zeitaufwändiger und teurer ist, wodurch aus ökonomischer Sicht eine Exklusion dieses Cores notwendig werden kann. Die *allgemeine Qualität* eines Cores lässt sich anhand des Korrosionsgrades, äußerer Beschädigungen, des Eindringens von Wasser oder einer partiellen Demontage des Cores (z. B. abgebrochene Stecker) bestimmen. Erneut kann jede dieser Teilinformationen zur Exklusion des

Cores für das Remanufacturing führen, bspw. aufgrund eines zu hohen Korrosionsgrades oder abgebrochener Bauteile. Gleichzeitig basiert diese Information jedoch auf subjektiven Einschätzungen und erfordert Expertenwissen. Abhängig vom gewählten Anreizsystem zur Rückgabe der Cores kann diese Information somit verzerrt werden (vgl. van Wassenhove & Zikopoulos 2010). Die Informationen hinsichtlich des Kilometerstands, der Fehlercodes sowie der allgemeinen Qualität werden im Folgenden auch als *qualitätsrelevante Merkmale* bezeichnet, da diese maßgeblich zur Beeinflussung der dynamischen Regenerationsrate beitragen (vgl. Kapitel 5.3). Der *Produkttyp* unterstützt maßgeblich Transportentscheidungen, da hierüber auf das Volumen bzw. Gewicht geschlossen werden kann. Die *Herkunft* des Cores lässt wiederum Rückschlüsse auf z. B. klimatische Bedingungen zu, in denen der Core im Einsatz war. So können bspw. Extremtemperaturen oder die Luftfeuchtigkeit erheblichen Einfluss auf die Qualität und damit auf die Aufarbeitbarkeit des Cores haben. Die *Anzahl durchgeführter Inspektionen* am Fahrzeug wird in den Interviews primär aus Gründen der Aufnahme und Auswertung statistischer Nutzungsdaten als vorteilhaft angesehen. Die *Menge* sowie der *Zeitpunkt der Ankunft* des Cores ermöglichen eine optimierte Produktions- und Kapazitätsplanung für die Remanufacturing-Unternehmen, sodass bspw. Mitarbeiterbedarfe frühzeitig bekannt sind und eingeplant werden können. Abschließend ist eine *korrekte Markierung* der Cores notwendig, um die aufgenommenen und digital geteilten Informationen mit der physischen Core-Entität zu verknüpfen. Darüber wiederum werden die Eingangsprozesse beschleunigt und es wird ermöglicht, je nach gewähltem Anreizsystem zur Rückgabe der Cores, diesen Anreiz schneller freizugeben (z. B. Auszahlung eines Pfandwerts).

Neben den identifizierten Informationsarten wurden in den darauf folgenden Interviews mit Werkstätten und Sammelstandorten charakteristische Merkmale dieser identifiziert sowie eine resultierende Klassifikation abgeleitet (vgl. Abbildung 5.8). Dabei wurden zunächst die identifizierten Informationsarten gespiegelt und relevante Informationsträger für die jeweiligen Informationen sowie ein daraus resultierender, passender Ort der Informationsaufnahme ermittelt. Dabei gilt, dass prinzipiell alle Informationen in den Werkstätten aufgenommen werden können bzw. teilweise sogar müssen, da die meisten hiervon durch die Trennung des Cores vom übergeordneten Produktsystem, d. h. dem Fahrzeug, in dem es verbaut war, verloren gehen. Bei Informationen hinsichtlich Menge und Zeitpunkt der Ankunft stiftet außerdem eine Aufnahme dieser am Remanufacturing-Standort weniger Nutzen, da dadurch die Vorlaufzeit zur effizienteren Planung und Steuerung verschwindet. Lediglich die Produktnummer (und daraus abgeleitet das Alter des Cores, sofern es sich um OER handelt) können auch in den späteren Stufen noch aufgenommen und verwendet werden. Außerdem handelt es sich bei der Aufnahme der allgemeinen Qualität der Cores (Korrosion, äußere Beschädigungen, usw.) um eine subjektive Einschätzung, weshalb hierfür Expertenwissen notwendig ist. Idealerweise wird diese Information somit am Sammelstandort aufgenommen,

da die Mitarbeitenden hier spezialisiert auf den Umgang und die Qualitätseinschätzung von Cores sind.

Merkmal	Ausprägung				
Informationsart	Produktnummer	Kilometerstand	Fehlercode(s)	Alter	...
Informationsträger	Produktlabel		Testprotokoll	Visuelle Inspektion	
Ort der Aufnahme	Werkstatt	Sammelstandort		Remanufacturing-Unternehmen	
Informationsaufzeichnung	Foto		Manuelle Eingabe		
Informationsweitergabe	E-Mail		Cloud		
Aufwand	Niedrig	Mittel		Hoch	
Kritische Information	Ja		Nein		

Abbildung 5.8: Charakteristische Merkmale der Informationen (A_Gallei 2021, A_Ittenbach 2020).

Die Aufzeichnung und Weitergabe der aufgenommenen Informationen kann je nach Digitalisierungsgrad der Werkstätten bzw. der etablierten Prozesse, der anfallenden Menge an Cores, Anforderungen hinsichtlich der Geschwindigkeit der Übertragung sowie weiterer Einflussfaktoren unterschiedlich gestaltet werden (vgl. Abbildung 5.8). Weiterhin wurden die Werkstätten hinsichtlich des Aufwands der Informationsaufzeichnung und -weitergabe befragt, wobei dieser je nach individuellen Bedingungen zwischen weniger als 5 Minuten und ca. 45 Minuten schwankt. Zuletzt können die aufgenommenen Informationen hinsichtlich ihrer Kritikalität unterschieden werden, d. h. ob eine Information, abhängig von der konkret aufgenommenen Ausprägung, zu einem vorzeitigen Ausschleusen des zugehörigen Cores führen kann.

5.2.2 Ableitung eines Rezeptormodells

Aus den Ergebnissen der Interviews lässt sich zunächst der kategorische Nutzen produkt-spezifischer Informationen für verschiedene Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL ableiten. Die in Tabelle 5.1 dargestellten Planungs- und Steuerungsaufgaben haben sich dabei direkt aus den durchgeführten Interviews ergeben und wurden den Ebenen der lang-, mittel- und kurzfristigen Planung zugeordnet (vgl. Kapitel 2.1.2). Diese stellt den kategorischen Nutzen entsprechend der Anzahl der Nennungen in den durchgeführten Interviews dar. Das

Tabelle 5.1: Kategorischer Nutzen von produktspezifischen Informationsarten für Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL (A_Gallei 2021).

Planungs- und Steuerungsaufgaben	Informationsarten	Produktnummer	Kilometerstand	Fehlercodes	Alter	Allgemeine Qualität	Produkttyp	Herkunft	Durchgeführte Inspektionen	Menge	Zeitpunkt der Ankunft	Korrekte Markierung
		Langfristig	Netzwerkkonfiguration für Sammelstandorte	••	•	•	•	•	•			••
	Logistik-Kapazitätsplanung					•	•			•		
	Produktentwicklung		•									
Mittelfristig	Produktionsprogrammplanung	•••								•	•	
	Mitarbeiter-Kapazitätsplanung									••	••	
	Materialbedarfsplanung	•	••	•	•	•		•		•		
	Durchlaufzeitschätzung	•	••	•••	•	••				•		
Kurzfristig	Routenoptimierung			••	•••	••••		••				
	(stochastisches) Scheduling		••	•••	•	•						
	Sortierung und Befundung	••		•••	••	•••		•				
	Anreizfreigabe											•

•: Anzahl Nennungen in Interviews

Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit auf (vgl. A_Gallei 2021).

Auf der strategischen bzw. langfristigen Ebene kann dabei zunächst die Netzwerkkonfiguration für Sammelstandorte insbesondere durch die Produktnummer, den Produkttypen (bzw. daraus abgeleiteten Informationen hinsichtlich Größe, Volumen und Gewicht der Cores) sowie die geographisch verteilten Mengen der zurückfließenden Cores verbessert werden. Aber auch Informationen zum Zustand der Cores, d. h. hinsichtlich Kilometerstand, Fehlercodes, Alter und der allgemeinen Qualität wurden als potentiell vorteilhaft für die Netzwerkkonfiguration genannt, um daraus langfristige Trends und die damit notwendige Auslegung von Sammelstandorten zu bestimmen. Die Kapazitätsplanung für die Logistik wurde seltener genannt und wird bspw. durch den Produkttypen (bzw. daraus abgeleitetem Volumen und Gewicht) sowie die Menge und die allgemeine Qualität beeinflusst. Neben diesen strategischen Aufgaben in der RL lassen sich durch die Aufnahme und Weitergabe produktspezifischer Informationen auch Regelkreise im Sinne des Produktentwicklungsprozesses schließen. Dieser Zusammenhang wurde allerdings nur in einem Interview genannt, wobei hier der Kilometerstand des Fahrzeugs bzw. die Laufleistung des ausgebauten Cores als relevant eingestuft wurden.

Auf Ebene der mittelfristigen Planung wurden die Planungsaufgaben der Produktionsprogrammplanung, der Mitarbeiter-Kapazitätsplanung, der MRP, sowie der Durchlaufzeit-Schätzung untersucht. Die Produktionsprogrammplanung, d. h. die Planung, welche Chargen wann in den Aufarbeitungsprozess eingeplant werden, lässt sich dabei vorrangig durch Informationen hinsichtlich der Produktnummer verbessern, da Cores vom gleichen Typ bzw. der

gleichen Variante in einer Charge kombiniert werden können. Informationen hinsichtlich der Menge und dem Zeitpunkt der Ankunft wurden hierfür seltener genannt. Die Mitarbeiter-Kapazitätsplanung lässt sich hingegen insbesondere durch die Menge und den Zeitpunkt der Ankunft der Cores optimieren. Die MRP für zu beschaffende Neukomponenten lässt sich durch verschiedene produktspezifische Informationen verbessern z. B. durch den Kilometerstand und den Fehlercode. Im folgenden Abschnitt wird im Rahmen der Ableitung eines Rezeptormodells im Detail darauf eingegangen. Die Schätzung der Durchlaufzeit ist insbesondere zur Einplanung von Kundenaufträgen und Sicherstellung der Liefertreue notwendig und daher ebenfalls von Informationen wie z. B. dem Kilometerstand und dem Fehlercode beeinflussbar.

Hinsichtlich des Nutzens produktspezifischer Informationen auf kurzfristige, operative Aufgaben lässt sich die Routenoptimierung durch das frühere Ausschleusen von unbrauchbaren Cores bspw. aufgrund des Fehlercodes, des Alters, der allgemeinen Qualität oder der Herkunft verbessern. Das im Remanufacturing i. d. R. stochastisch geprägte Scheduling sowie die Prozessschritte der Sortierung und Befundung lassen sich analog zur Schätzung der Durchlaufzeit durch qualitätsrelevante Merkmale, d. h. dem Kilometerstand, den Fehlercode(s) und der allgemeinen Qualität, optimieren. Die Anreizfreigabe (z. B. die Auszahlung eines Pfandwerts) wurde hingegen nur in einem Interview genannt und ist insbesondere von der korrekten Markierung des Cores bzw. seiner Verpackung abhängig.

Aufbauend auf dem identifizierten kategorischen Nutzen werden im nächsten Schritt Rezeptormodelle abgeleitet, welche die Effekte bzw. Auswirkungen der Informationen für Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL bzw. im Remanufacturing auf definierte Rezeptoren darstellt. Im Allgemeinen stellt ein Rezeptormodell einen Zusammenhang zwischen internen und externen Veränderungen auf produktionsrelevante Kenngrößen her (Cisek & Habicht et al. 2002; Möller 2008; Treber 2020). Dadurch kann die Komplexität realer Ursache-Wirkungsbeziehungen auf einige wenige, relevante Einflussvariablen reduziert werden (Möller 2008). Dieses Vorgehen ist aus der Biologie inspiriert, in der ein Rezeptor als eine Art "Sensor" verstanden werden kann, der nur auf bestimmte Stimuli reagiert (Pschyrembel 2014; Cisek & Habicht et al. 2002). Obwohl der Übertrag von Rezeptormodellen von der Biologie auf die Produktionstechnik ursprünglich zur Analyse der Wandlungsfähigkeit beigetragen hat (vgl. Cisek & Habicht et al. 2002; Möller 2008), können damit auch Wirkzusammenhänge in Bezug auf den Informationsaustausch dargestellt werden (vgl. Treber 2020). In diesem Kontext wird das Rezeptormodell auch im Folgenden entwickelt und verwendet.

Im produktionstechnischen Umfeld werden häufig die Kategorien Produkt, Quantität, Zeit, Kosten, Qualität und Technologie als Rezeptoren verwendet (Cisek & Habicht et al. 2002; Möller 2008). In Bezug auf die MRP, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch einen

erhöhten Informationsaustausch unterstützt werden soll, werden diese adaptiert (vgl. Abbildung 5.9): Der Rezeptor Produkt entspricht dabei dem notwendigen *Neukomponenten-Typ*, der für das Remanufacturing beschafft werden muss. Der Rezeptor Quantität entspricht der *Bestellmenge* und der Rezeptor Zeit dem *Bestellintervall*. Der Rezeptor Kosten ergibt sich bei der MRP aus dem Bestellintervall sowie der -menge und wird daher nicht gesondert betrachtet. Der Rezeptor Qualität ist einerseits bereits in der Bestellmenge berücksichtigt, andererseits wird dieser in der Anzahl *notwendiger Neuprodukte* berücksichtigt, die produziert bzw. vorgehalten werden müssen, wenn die Menge an rückläufigen Cores nicht ausreicht, um die Nachfrage zu bedienen. Der Rezeptor Technologie wird in der MRP für das Remanufacturing als *technologischer Fortschritt* eines Produkts betrachtet und berücksichtigt damit die Herausforderungen der Kompatibilität zwischen verschiedenen Produktvarianten und -generationen.

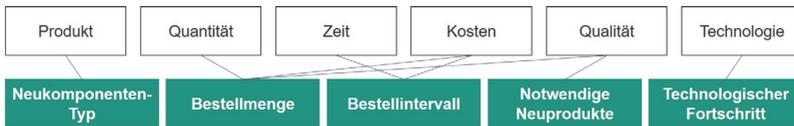


Abbildung 5.9: Übergang klassischer Rezeptoren auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Rezeptoren.

Tabelle 5.2 stellt das Rezeptormodell für die MRP im Remanufacturing dar, wobei Informationen, die hierfür in den Interviews nicht genannt wurden auch nicht dargestellt sind (vgl. Tabelle 5.1). Weitere aus den Interviews abgeleitete Rezeptormodelle für die Netzwerkconfiguration der Sammelstandorte in der RL sowie für die Routenplanung zur Einsammlung der Cores sind in Anhang A5.1 dargestellt.

Das Rezeptormodell kann dabei von links nach rechts bzw. oben nach unten gelesen werden. Die linke Spalte enthält die Informationen aus den Interviews. Diese wirken auf die spezifischen Bereiche und zu treffenden Entscheidungen in der MRP über die dargestellten Rezeptoren. So hat bspw. die Produktnummer einen Einfluss auf die zu beschaffenden Neukomponenten, da die Zusammensetzung des Produkts anhand von Stücklisten ermittelt werden kann. Die Menge der zu einem diskreten Zeitpunkt in der RL befindlich Cores wirkt sich bspw. auf das Bestellintervall aus, da hierüber Informationen über den Zeitpunkt und wahrscheinlich nutzbare Komponenten der Cores am Remanufacturing-Standort ermittelt werden können. Die *qualitätsrelevanten Merkmale* (z. B. Kilometerstand, Fehlercodes) wirken sich bspw. auf die Bestellmenge aus, da mit Hilfe der Aggregation der dynamischen instanzindividuellen Regenerationsraten (vgl. Kapitel 5.3.1) und dem Abgleich dieser mit der erwarteten Nachfrage die Bestellmenge bestimmt werden kann. Aufgrund starker Interdepen-

Tabelle 5.2: Rezeptormodell zur Darstellung des Nutzens von Informationen in der Materialbedarfsplanung (A_Gallei 2021).

Information über die ...	... hat einen Effekt auf die ...				
	Materialbedarfsplanung				
	... über den Rezeptor ...				
	Neu- komponen- ten- Typ	Bestell- intervall	Bestell- menge	Notwen- dige Neu- produkte	Techno- logischer Fortschritt
Produktnummer	x			x	x
Kilometerstand	x		x	x	
Fehlercodes	x		x	x	
Alter	x	x		x	x
Allgemeine Qualität	x		x	x	
Herkunft	x		x	x	
Menge		x	x	x	

denzen zwischen den drei Rezeptoren Neukomponenten-Typ, Bestellintervall und -menge, die in Summe von allen Informationen beeinflusst werden, wirken auch alle Informationen gleichermaßen auf den Rezeptor hinsichtlich der notwendigen Neuprodukte. Die Information bzgl. des Alters eines Cores lässt wiederum insbesondere Rückschlüsse auf deren technologischen Fortschritt und somit der Kompatibilität zwischen Produktvarianten und -generationen zu.

Das Rezeptormodell der MRP unterliegt dabei der Annahme, dass Informationen bei Werkstätten oder spätestens an Sammelstandorten aufgenommen und sofort mit den relevanten Akteuren in der RL geteilt werden. Aufgrund der aufgenommenen Informationen können zudem Cores frühzeitig aussortiert werden, wodurch in Summe weniger Cores am Remanufacturing-Standort ankommen, als im Fall ohne Informationsaustausch. Aufgrund der in Kapitel 2.1 vorgenommenen Fokussierung auf OER kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass über die Produktnummer bereits alle notwendigen Informationen zum Produkttypen sowie zu sog. reversen Material- und Stücklisten (RBoM) verfügbar sind.

5.2.3 Modellierung des Informationsagenten

In Anlehnung an Chunfa & Jingfeng et al. (2010) wird für die Modellierung der erlangten Erkenntnisse bzgl. des Informationsaustauschs ein Beschreibungsblock *Informationsagent* modelliert. Dieser dient als zentraler, übergreifender Agent, in dem alle relevanten Informationen gespeichert und abgerufen werden können. In Anlehnung an Kurilova-Palisaitiene &

Lindkvist et al. (2015) und Mossali & Diani et al. (2020) kann dieser Informationsagent als eine Datenplattform angesehen werden. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Eisen 2021, A_Nilles 2022). Das Konzept des Informationsagenten ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

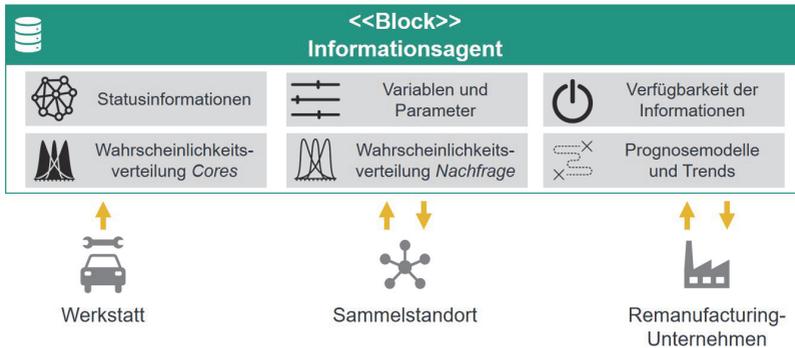


Abbildung 5.10: Modellierung des Informationsagenten (A_Eisen 2021, A_Nilles 2022).

Der Informationsagent stellt dabei jederzeit eine Momentaufnahme des aktuellen Informationsstandes in der RL dar und enthält hierzu alle *Statusinformationen* (z. B. Ort und aktueller Zustand eines Cores) der sich im System befindlichen Akteure und Entitäten sowie die Gesamtheit der vorhandenen *Variablen und Parameter* (z. B. Kosten, statische und dynamische Regenerationsrate). Für den Einfluss auf die MRP ist insbesondere die *Verfügbarkeit von Informationen* bei relevanten Akteuren, z. B. dem Remanufacturing-Standort, entscheidend. Diese Verfügbarkeit kann mit Hilfe des Informationsagenten gesteuert werden, um neben Szenarien eines erhöhten Informationsaustauschs auch den Status Quo, d. h. keinen Informationsaustausch entlang der RL, darstellen zu können. So ist es bspw. möglich, Werkstätten und Sammelstandorte teilweise oder vollständig von der Informationsaufnahme und -weitergabe auszuschließen.

Im Allgemeinen wird durch die Einführung des Informationsagenten eine adaptive MRP befähigt. Der Informationsagent liefert hierzu notwendige Informationen zur Prognose des erwarteten Bedarfs an Komponenten je Periode anhand der Regenerationsraten der Cores und darin enthaltener Komponenten. Dabei können beliebige *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* des Rückflusses an *Cores* bzw. der Regenerationsraten der Komponenten sowie der erwarteten *Nachfrage* nach aufgearbeiteten Produkten mit Hilfe des Informationsagenten abgebildet werden. Somit kann der Informationsagent auch genutzt werden, um *Prognosemodelle* (z. B.

Zeitreihenanalysen) sowie die *Erkennung von Trends* zu unterstützen (vgl. Clotey 2016; Toktay & van der Laan et al. 2004).

5.3 Modellierung der Materialbedarfsplanung

Als abschließendes Beschreibungsmodell widmet sich das folgende Kapitel der Modellierung der MRP. Hierzu wird zunächst in Kapitel 5.3.1 das Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten vorgestellt. Anschließend wird die Modellierung der Bestellpolitiken in Kapitel 5.3.2 erläutert. Abschließend erfolgt die Entwicklung eines Kennzahlensystems zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der MRP in Kapitel 5.3.3.

5.3.1 Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten

Wie in Kapitel 2.1.3 gezeigt, werden Materialbedarfe üblicherweise auf Grundlage von Absatzprognosen oder konkreten Lieferaufträgen durch Stücklistenauflösung, d. h. verbrauchs- oder programmorientiert, berechnet. Zwar existieren auch für die im Remanufacturing nachgefragten Produkte Stücklisten (vgl. Ferrer & Whybark 2001), jedoch gibt es entscheidende Unterschiede und somit Herausforderungen in der MRP für das Remanufacturing, die im Folgenden näher erläutert und in Abbildung 5.11 dargestellt werden. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Eisen 2021, A_Nilles 2022).

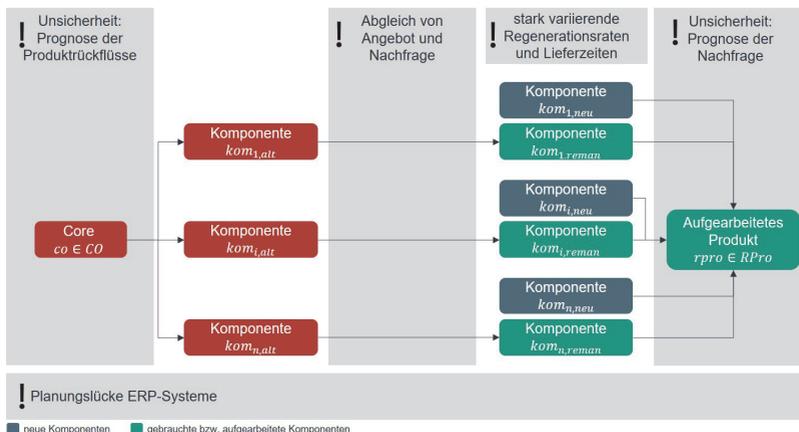


Abbildung 5.11: Formalisierung der Herausforderungen in der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing (A_Eisen 2021).

Zunächst ist von Bedeutung, dass Remanufacturing-Unternehmen nicht nur die *unsicherheitsbehafteten Prognosen der Nachfrage* nach aufgearbeiteten Produkten zur periodischen Feststellung des Primärbedarfs benötigen. Hinzu kommt hierbei die ebenfalls *unsicherheitsbehaftete Prognose des Rückflusses* von Cores. Für die MRP von Neukomponenten für das Remanufacturing $kom_{i,neu}$ verschiebt sich demnach der Schwerpunkt auf die Vorhersage der Differenz aus erwarteter Nachfrage des Sekundärmarktes D_{rpro} und erwartetem Rückfluss von Cores co (Goltso & Ponte et al. 2019).

Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, lassen sich die Unsicherheiten hinsichtlich Menge, Zeitpunkt und Qualität der Cores unterscheiden. Durch die Unsicherheiten hinsichtlich der Qualität wird die Bestimmung der *Regenerationsraten* der enthaltenen Komponenten $kom_{i,alt}$ und somit die Identifikation von Nettobedarfen erschwert (Goltso & Ponte et al. 2019; Zikopoulos 2017; Guide 2000). Neben der Qualität der Cores wirkt sich die Unsicherheit bzgl. der Menge und des Zeitpunkts von zurückfließenden Cores auf die Bestellmengenplanung und das Bestandsmanagement aus (Goltso & Ponte et al. 2019). In Kombination mit den *stark variierenden Lieferzeiten* der Komponenten haben diese einen erheblichen Einfluss auf die Planung der notwendigen (Sicherheits-) Bestände (Brabänder 2020). In einer Umfrage von Guide (2000), an der zu 33 % Vertreter aus der Automobilbranche beteiligt waren, wurden demnach Lieferzeiten zwischen 0,5 und 90 Wochen angegeben. Diese Beobachtung wird von Kurilova-Palisaitiene & Sundin (2015) bestätigt, die einen Anteil von 85 % der Durchlaufzeit dem Warten auf Ersatzkomponenten zuschreiben. Insbesondere in Hinblick auf die effiziente und effektive Bewältigung des *Abgleichs von Angebot von zurückfließenden Cores co mit der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten D_{rpro}* gilt es, mit Hilfe eines geeigneten Bestandsmanagements hohe Bestände zu vermeiden und gleichzeitig die angestrebte Liefertreue aufrechtzuerhalten (Guide 2000). Erst unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten lässt sich ein Nettobedarf an zu beschaffenden Neukomponenten $kom_{i,neu}$ berechnen. Somit lässt sich festhalten, dass sich für das Remanufacturing aufgrund dieser Unsicherheiten insbesondere die verbrauchsorientierte Bedarfsermittlung eignet (Lasch 2021, S. 156, vgl. Kapitel 2.1.3).

Abgesehen von den erläuterten Herausforderungen stellt das *Fehlen geeigneter ERP-Systeme* eine weitere Herausforderung dar. Bspw. fehlt die Möglichkeit, die Vorhersage von Regenerationsraten in reversen Stücklisten (RBoMs, engl. "Reverse Bill of Materials") einzugliedern. Die Zusammenführung von Informationen aus Aufarbeitungsprozessen mit dem Bedarf an neuen Komponenten ist derzeit ebenfalls nicht möglich (Oltra-Badenes & Gil-Gomez et al. 2019). Obwohl die vorliegende Arbeit keine ERP-Entwicklung zum Ziel hat, kann sie dennoch als Grundlage für deren Weiterentwicklung angesehen werden.

Wie in Kapitel 3.2.1 gezeigt, verwenden bestehende Ansätze zur MRP im Remanufacturing entweder statische Regenerationsraten der Komponenten $kom_{i,alt}$ auf Basis von Erfahrungs-

werten oder teilen diese in eine diskrete Anzahl an Qualitätsklassen ein, sofern frühzeitig Informationen existieren. Aufgrund der multidimensionalen Unsicherheiten im Remanufacturing ist die Varianz der Regenerationsraten jedoch sehr groß, sodass Ineffizienzen entstehen. Daher wird im Folgenden ein Vorgehen zur Bestimmung *dynamischer, instanzindividueller Regenerationsraten* vorgestellt, welches die reale Regenerationsrate auf Basis der produktspezifischen Informationen möglichst genau abschätzen soll, sodass die richtige Anzahl an neuen Komponenten zum richtigen Zeitpunkt beschafft werden können, wodurch eine höhere Liefertreue und niedrigere durchschnittliche Beschaffungskosten resultieren.

Die aufgenommenen, produktspezifischen Informationen werden hierzu zunächst in einem sog. *Informationsvektor* \vec{i} festgehalten, wobei zur Vereinfachung die Informationen zum Alter und zur Herkunft (vgl. Kapitel 5.2) in der sog. Fahrzeugidentifikationsnummer (VIN) zusammengefasst werden, da unter der Annahme des OER aus der VIN und der Produktnummer auf die weiteren Informationen geschlossen werden kann. Es gilt somit $\vec{i} = (\text{Kilometerstand, Fehlercode, Qualität, VIN, Produktnummer})$. Neben diesen produktspezifischen Informationen sind komponentenspezifische Eigenschaften notwendig, die maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidungen der MRP haben. Hierzu wird analog ein sog. *Komponentenvektor* \vec{k} für Typen von Komponenten wie folgt definiert: $\vec{k} = (\text{Regenerationsrate, Wertigkeit, Lieferzeit, Kosten, Mindestbestellmenge, Informationssensitivität})$. Die Kosten teilen sich wiederum in bestellfixe Kosten, Stückkosten sowie Lagerhaltungskosten auf, die für die MRP notwendig sind (vgl. Lasch 2021; Brabänder 2020). Abbildung 5.12 stellt den Inhalt und Zusammenhang zwischen Informations- und Komponentenvektor dar.

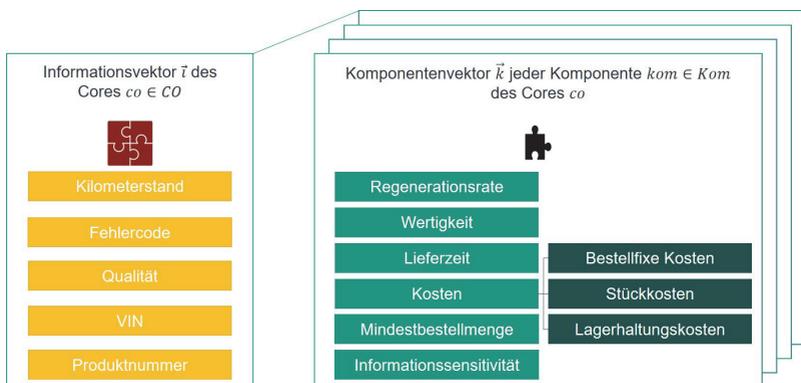


Abbildung 5.12: Informationsvektor \vec{i} des Cores $co \in CO$ und Komponentenvektor jeder entahltenen Komponente $kom \in Kom$ des Cores co (A_Nilles 2022).

Die *Regenerationsrate* geht zunächst von der statischen bzw. durchschnittlich angenommenen Regenerationsrate je Komponente aus, die als Ausgangspunkt zu deren Dynamisierung genutzt wird. Anhand von aufgenommenen, produktspezifischen Informationen zu einem Core verändert sich dann die *dynamische Regenerationsrate* der Komponenten entsprechend der jeweiligen Informationsausprägungen x_i mit $i \in \{km, F, Q\}$. Da die produktspezifischen Informationen bei unterschiedlichen Akteuren aufgenommen werden können, wird zudem die zeitliche Dimension der Informationsaufnahme und -verfügbarkeit berücksichtigt. Die Informationssensitivität je Komponente IS_{kom} stellt dar, wie stark bzw. schwach die Regenerationsrate auf die Aufnahme neuer Informationen reagiert. Die sonstigen Elemente des Komponentenvektors \vec{k} , d. h. die Wertigkeit, Lieferzeit, Kosten und Mindestbestellmenge, werden in Kapitel 5.3.2 für die Modellierung der Bestellpolitiken benötigt bzw. in der Auswertung betrachtet. Abbildung 5.13 stellt das Vorgehen zur Bestimmung der dynamischen, instanzindividuellen Regenerationsraten der Komponenten auf Basis des Informations- und Komponentenvektors beispielhaft dar.

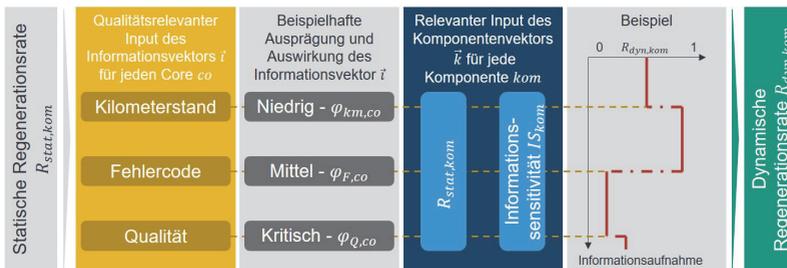


Abbildung 5.13: Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten (A_Nilles 2022).

Für die Bestimmung der *dynamischen Regenerationsrate* jeder Komponente $R_{dyn, kom}$ wird angenommen, dass lediglich die Merkmale Kilometerstand, Fehlercode(s) sowie die allgemeine Qualität relevant sind. Wie bereits beschrieben werden diese daher als *qualitätsrelevante Merkmale* bezeichnet. Die sonstigen Elemente des Informationsvektors \vec{i} werden benötigt, um die korrekten, zu beschaffenden Komponenten zu identifizieren (vgl. Kapitel 5.3.2). Sie besitzen jedoch keine Auswirkungen auf die dynamische Regenerationsrate der Komponenten.

Analytisch lässt sich der Zusammenhang zwischen statischer und dynamischer Regenerationsrate der Komponenten ($R_{stat, kom}, R_{dyn, kom} \in [0, 1]$) wie folgt beschreiben, wobei $\varphi_{i, co} \geq 0$ mit $i \in \{km, F, Q\}$ die Auswirkungen der unterschiedlichen Ausprägungen des Kilometerstands (x_{km}), des Fehlercodes (x_F) bzw. der Qualität (x_Q) des Cores co und $IS_{kom} \geq 0$ die Informationssensitivität der Komponente kom darstellen:

$$R_{dyn,kom} = \min\left\{1; \begin{cases} R_{stat,kom} \cdot \varphi_{i,co} \cdot (IS_{kom} + 1)\}, & \varphi_{i,co}, IS_{kom} < 1 \\ R_{stat,kom} \cdot \varphi_{i,co} \cdot (IS_{kom} - 1)\}, & \varphi_{i,co} < 1, IS_{kom} > 1 \\ R_{stat,kom} \cdot \varphi_{i,co} \cdot \frac{IS_{kom}+1}{2}\}, & \varphi_{i,co} > 1, IS_{kom} < 1 \\ R_{stat,kom} \cdot \varphi_{i,co} \cdot IS_{kom}\}, & \varphi_{i,co}, IS_{kom} > 1 \\ R_{stat,kom} \cdot \varphi_{i,co}\}, & sonst \end{cases} \right. \quad 5.1$$

Je nach Ausprägungskombination der Variablen ergeben sich dabei fünf Fälle zur Berechnung der dynamischen Regenerationsrate. Generell gilt, dass gegeben einer konstanten Informationssensitivität, d. h. $IS_{kom} = 1$, für $\varphi_{km,co}, \varphi_{F,co}, \varphi_{Q,co} > 1$ ein positiver Einfluss auf die dynamische Regenerationsrate bzw. für $\varphi_{km,co}, \varphi_{F,co}, \varphi_{Q,co} < 1$ ein negativer Einfluss auf die dynamische Regenerationsrate zu beobachten ist. Für $\varphi_{km,co}, \varphi_{F,co}, \varphi_{Q,co} = 1$ wird ein neutrales Verhalten angenommen. Für eine Informationssensitivität $IS_{kom} \neq 0$ werden je nach Wert von $\varphi_{i,co}$ die positiven bzw. negativen Auswirkungen auf die dynamische Regenerationsrate verstärkt oder abgeschwächt.

Liegt bspw. bei einer Komponente ein niedriger Kilometerstand vor, steigt die dynamische Regenerationsrate für diese Komponente unter Annahme einer neutralen Informationssensitivität an. Wird im nächsten Schritt jedoch ein kritischer Fehlercode diagnostiziert, so hat dies wiederum negative Folgen auf die dynamische Regenerationsrate, im Extremfall kann dabei sogar eine dynamische Regenerationsrate von 0 erreicht werden, wodurch der Core frühzeitig aus dem weiteren Prozess ausgeschleust werden kann. Liegt in dem Beispiel weiterhin eine mittlere Qualität vor, so hat dies eine neutrale Auswirkung auf die dynamische Regenerationsrate, diese verändert sich also nicht.

Die dynamische Regenerationsrate lässt sich für jede Komponente $kom_{i,alt}$ eines Cores co bestimmen und wird somit im Folgenden als $R_{dyn,kom}$ bezeichnet. Sofern ein Core nicht schon in der RL aufgrund der aufgenommenen Informationen ausgeschleust wurde, realisiert sich die tatsächliche Regenerationsrate der Komponenten erst am Remanufacturing-Standort im Rahmen der Demontage und Aufarbeitung anhand einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Das bedeutet, dass eine dynamische Regenerationsrate zwar dabei unterstützen kann, die tatsächliche Regenerationsrate anzunähern, allerdings weiterhin nicht kontrollierbare Unsicherheiten bestehen. Daher bedarf es adaptiver und stochastischer Bestellpolitiken, welche im folgenden Kapitel modelliert werden.

5.3.2 Modellierung von Bestellpolitiken

Wie in Kapitel 2.1.3 erläutert, ist das Ziel der MRP die zu beschaffenden Neukomponenten $kom_{i,neu}$ so zur Verfügung zu stellen, dass eine möglichst hohe Liefertreue bei gleichzeitig minimalen Beschaffungs- und Lagerhaltungskosten erreicht wird. Zur Bestimmung konkreter Bestellmengen und -zeitpunkte wird zwischen deterministischen und stochastischen Bestellpolitiken unterschieden (Lasch 2021). Erstere benötigen zu Beginn der Planungsperiode alle anfallenden Bedarfe, sodass eine praktische Umsetzung dieser in der RL als nicht sinnvoll erscheint. Daher werden in Kapitel 5.3.2.1 zunächst stochastische Bestellpolitiken modelliert. Die Modellierung einer deterministischen Bestellpolitik auf Basis des *Wagner-Whitin*-Modells dient im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Benchmark zur Bewertung der Güte der stochastischen Bestellpolitiken (vgl. Kapitel 5.3.2.2). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Nilles 2022, A_Dressler 2023).

Zusätzlich zu deterministischen und stochastischen Bestellpolitiken wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit unterschieden, ob sich die entsprechenden Bestellpolitiken in echtzeitfähigen oder nicht echtzeitfähigen Verfahren umsetzen lassen. Dieses Kriterium gibt an, ob die entsprechende Bestellpolitik in ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell unter Unsicherheit integriert werden kann, also ob zur Berechnung der notwendigen Parameter Kenntnisse hinsichtlich aller zukünftigen Bedarfe bestehen muss oder nicht. Die stochastischen Bestellpolitiken sind somit auf natürliche Weise echtzeitfähig, die deterministischen zunächst nicht. Hinsichtlich letzteren erfolgt im letzten Schritt daher die Ableitung eines echtzeitfähigen Vorgehens basierend auf der *Silver-Meal*-Heuristik (vgl. Kapitel 5.3.2.2).

5.3.2.1 Modellierung stochastischer Bestellpolitiken

Bei den stochastischen Bestellpolitiken werden i. d. R. die beiden Bestellpunktverfahren (s,q) und (s,S) sowie die Bestellrhythmusverfahren (t,q) und (t,S) unterschieden (vgl. Kapitel 2.1.3).

In den *Bestellpunktverfahren* wird die zu bestellende Anzahl $q_{kom,t}$ an Komponenten kom je Periode t mit Hilfe der folgenden Formel berechnet, wobei $c_{K,kom}$ die bestellfixen Kosten, $c_{h,kom}$ die Lagerhaltungskosten je Periode und $D_{kom,t}$ die Nachfrage je Komponente und je Periode darstellen (Lasch 2021):

$$q_{kom,t} = \sqrt{\frac{2 \cdot c_{K,kom} \cdot D_{kom,t}}{c_{h,kom}}} \quad 5.2$$

Durch den Komponentenvektor \vec{k} sind die bestellfixen Kosten $c_{K,kom}$ sowie die Lagerhaltungskosten $c_{h,kom}$ je Zeitperiode und je Komponente gegeben. Die Nachfrage $D_{kom,t}$ nach zu beschaffenden Komponenten je Zeitperiode ist der einzige Wert, der nicht intuitiv vorliegt und daher einer detaillierteren Berechnung bedarf.

Die Informationen hinsichtlich VIN und Produktnummer liefern als notwendige Voraussetzung Informationen zur Identifikation des Cores, sodass das Produkt inklusive der Stückliste und der statischen Regenerationsrate je Komponente bekannt ist. Mit der Aufnahme der Informationen über den Kilometerstand, Fehlercode(s) und der allgemeinen Qualität ändert sich diese zu einer individuellen und dynamischen Regenerationsrate. Der Wert der Nachfrage $D_{kom,t}$ ergibt sich letztlich aus der aggregierten Regenerationsrate aller bekannten, sich im Umlauf befindlichen Komponenten kom , d. h. durch die Summe der durch die Werkstätten, Sammelstandorte und Remanufacturing-Standorte geflossenen Cores je Produkttyp multipliziert mit deren individueller Regenerationsrate, welche durch die Informationsaufnahme vom statischen, durchschnittlichen Wert abweicht. Dieser Wert muss von der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten $D_{rpro_{kom,t}}$, welche die Komponente kom enthalten, subtrahiert werden, um den Ausgleich von Angebot und Nachfrage zu berücksichtigen. Diese Nachfrage ist mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert (vgl. Kapitel 5.2.3). Es ergibt sich somit:

$$D_{kom,t} = D_{rpro_{kom,t}} - R_{dyn,kom} \cdot \sum_{i \in WK \cup SaSt \cup ReSt} kom_{t,i} \quad \forall kom \in Kom, t \in T \quad 5.3$$

Für die Bestellpunktverfahren (s,q) und (s,S) muss zusätzlich der Meldebestand s_{kom} je Komponente berechnet werden, welcher sich wie folgt ergibt:

$$s_{kom} = \tau_{kom} \cdot D_{kom,t} \quad 5.4$$

Dabei ergibt sich τ_{kom} als Lieferzeit aus dem Komponentenvektor \vec{k} . Bei Auslösen einer Bestellung wird somit über $D_{kom,t}$ jenes s_{kom} errechnet, welches notwendig ist, um den Bedarf in der betrachteten Periode t zu befriedigen. Wird der Meldebestand unterschritten, so wird eine Bestellung in Höhe von $q_{kom,t}$ ausgelöst. Der nächste Meldebestand errechnet sich danach automatisch, indem auch in diesem Fall die Nachfrage $D_{kom,t}$ für den Zeitraum der letzten Bestellung bis zur neuen Bestellung als neue Nachfrage $D'_{kom,t}$ deklariert und nach jeder Bestellung zurückgesetzt wird. Die für das Remanufacturing typische Unsicherheit hinsichtlich

der Menge und Qualität der zurückfließenden Cores ist adäquat berücksichtigt, indem die von der dynamischen Regenerationsrate abhängige und somit unsicherheitsbehaftete Nachfrage nach Komponenten $D_{kom,t}$ verwendet wird.

Die (s,S)-Politik verwendet als S_{kom} den aus dem Komponentenvektor resultierenden Ziellagerbestand, der um einen Sicherheitsfaktor $a_{kom} > 1$ korrigiert werden kann. Die Bestellmenge wird somit aus der Differenz des Ziellagerbestands zu dem aktuellen Lagerbestand der Komponente bestimmt.

Für die *Bestellrhythmusverfahren* (t,q) und (t,S) wird der zeitliche Abstand zwischen zwei Bestellungen T'_{kom} mit Hilfe folgender Formel berechnet (Chhajed & Lowe 2008):

$$T'_{kom} = \frac{q_{kom,t}}{D_{kom,t}} \quad 5.5$$

Für die (t,q)-Politik wird die Bestellmenge $q_{kom,t}$ entsprechend Formel 5.2 verwendet, womit alle relevanten Informationen vorliegen, sodass eine Bestellung durchgeführt werden kann. Anschließend wird ein neuer Beschaffungsauftrag generiert, welcher die Nachfrage zwischen der letzten Bestellung bis zum Zeitpunkt der neuen Bestellung als $D'_{kom,t}$ deklariert. Nach jeder generierten Bestellung wird die Nachfrage zurückgesetzt, sodass diese für die neue Bestellperiode neu berechnet wird. Der Wert ist somit variabel zwischen den Bestellperioden und trägt damit zur Berücksichtigung der Unsicherheit hinsichtlich Menge, Zeitpunkt und Qualität der zurückfließenden Cores bei.

Für die (t,S)-Politik wird der komponentenspezifische Ziellagerbestand S_{kom} gewählt. Dieser kann um einen Sicherheitsfaktor $a_{kom} > 1$ korrigiert werden, wobei gilt: $a_{kom} \cdot S_{kom}$. Die Bestellmenge wird somit analog zur (s,S)-Politik aus der Differenz des Ziellagerbestands zu dem aktuellen Lagerbestand der Komponente bestimmt.

5.3.2.2 Modellierung deterministischer Bestellpolitiken

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist das Modell von Wagner & Whitin (1958) eines der bekanntesten *deterministischen Bestellmengenprobleme*, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Benchmark gegenüber den stochastischen Bestellpolitiken verwendet wird. Für die exakte Lösung des Modells kann das *Kürzeste-Wege-Problem* genutzt werden. Hierzu wird ein Graph $G = (V, E, e)$ erzeugt, der für jede Periode t einen Knoten sowie einen weiteren fiktiven Knoten $T + 1$ als Senke enthält (vgl. Abbildung 5.14). Die Gewichtungen der Kanten e entsprechen den Kosten bestehend aus bestellfixen und Lagerhaltungskosten. Die optimale Lösung des Problems wird mittels Bestimmung des kostenoptimalen Weges durch

den Graphen berechnet. Der Einsatz dieses Verfahrens als Benchmark wird im Rahmen der Ablaufplanung in Kapitel 5.4.3 im Detail erläutert.

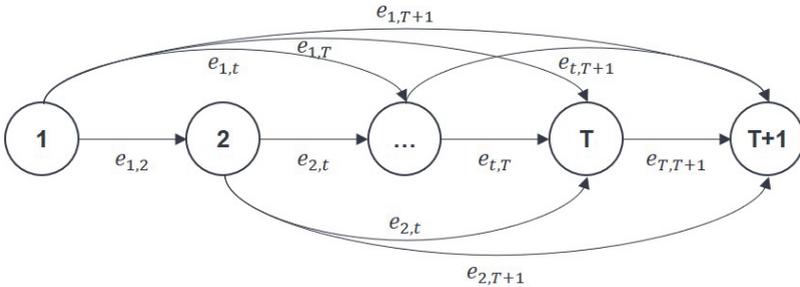


Abbildung 5.14: Modellierung des Kürzeste-Wege-Graphen zur Lösung des Wagner-Whitin-Modells, in Anlehnung an Domschke & Drexl et al. 2015.

Neben exakten Verfahren wie dem Kürzeste-Wege-Problem können zur Lösung des *Wagner-Whitin*-Modells auch heuristische Verfahren angewendet werden. Diese nutzen ein iteratives Vorgehen zur Bestimmung einer zulässigen Lösung, die jedoch nicht notwendigerweise optimal ist. Beginnend bei Periode $t = 1$ wird die Bestellmenge so lange um die Bedarfsmenge der Folgeperiode erhöht, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Eine der bekanntesten Heuristiken ist hierbei die *Silver-Meal*-Heuristik (SM), bei der die durchschnittlichen Kosten pro Komponente und Periode, bestehend aus den bestellfixen Kosten $c_{K,kom}$ und den Lagerhaltungskosten $c_{h,kom}$ das Abbruchkriterium darstellen (Domschke & Scholl et al. 1997; Fandel & Fistek et al. 2011):

$$\frac{\sum_t^{\tau+1} c_{K,kom} + c_{h,kom}}{\tau + 1} > \frac{\sum_t^{\tau} c_{K,kom} + c_{h,kom}}{\tau} \tag{5.6}$$

Wenn durch die Hinzunahme der Bedarfsmenge der Folgeperiode $\tau + 1$ die durchschnittlichen Kosten pro Komponente, d. h. $c_{K,kom} + c_{h,kom}$, der aktuellen Planungsperiode τ überschritten werden, so ist die obige Gleichung erfüllt und das Abbruchkriterium erreicht. Dadurch wird eine Bestellung ausgeführt und eine weitere Bestellung, beginnend mit dem Bedarf der Periode, die zum Abbruch führte, als neuer Ausgangspunkt verwendet (Domschke & Scholl et al. 1997; Fandel & Fistek et al. 2011). Das iterative Vorgehen der Heuristik ermöglicht es, dass nicht alle Bedarfe zu Beginn des Planungszeitraums bekannt sein müssen. Stattdessen können ausgehend von der aktuell betrachteten Periode t Annahmen bzw. Prognosen hinsichtlich

des Bedarfs zukünftiger Perioden getroffen werden, z. B. anhand der dynamischen Regenerationsraten $R_{dyn, kom}$. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird somit für die betrachtete Planungsperiode t der Bedarf an neuen Komponenten $D_{kom,t}$ analog zu den stochastischen Bestellpolitiken mit Hilfe der dynamischen Regenerationsraten $R_{dyn, kom}$ bestimmt (vgl. Kapitel 5.3.2.1). Im Anschluss wird das Abbruchkriterium überprüft, um die Entscheidung hinsichtlich der Bestellung zu treffen und somit eine echtzeitfähige Bestimmung der Bestellmenge und -zeitpunkte zu ermöglichen.

5.3.3 Entwicklung eines Kennzahlensystems

Als abschließenden Schritt im Rahmen der Beschreibungsmodelle erfolgt im Folgenden die Entwicklung eines Kennzahlensystems zur Aus- und Bewertung der Systemperformance, welches die Ergebnisse in prägnanten und verständlichen Leistungsindikatoren zusammenfasst. Dabei orientiert sich die vorliegende Arbeit am Konzept der Ökoeffizienzbewertung und entwickelt somit ökonomische und ökologische Kennzahlen (Schaltegger & Sturm 1989; Kara & Hauschild et al. 2022).

Die Entwicklung des Kennzahlensystems richtet sich an den Anforderungen für Leistungsindikatoren im Bereich der Nachhaltigkeit aus (Staniskis & Arbaciauskas 2009): Demnach müssen Kennzahlen erstens *vergleichbar* bzw. *messbar* sein, um Leistungsänderungen erkenntlich zu machen. Zweitens sollen Kennzahlen *aussagekräftig* sein, um die Effizienz der Entscheidungsfindung zu erhöhen. Drittens soll die *Integrität* der Kennzahlen gewährleistet werden, d. h. alle wesentlichen Aspekte der Nachhaltigkeit abgedeckt sein. Viertens ist die *Kontinuität* der Kennzahlen relevant, um Veränderungen verfolgen zu können. Fünftens sollen Kennzahlen *klar* und *spezifisch* sein, um Missverständnisse zu vermeiden und sechstens soll ein Kennzahlensystem *effizient* gestaltet werden, um funktional und ressourceneffizient die Entscheidungsfindung zu unterstützen (Staniskis & Arbaciauskas 2009). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleitete Abschlussarbeit auf (vgl. A_Förster 2023).

Die Ausgangsbasis bildet eine umfassende Recherche existierender Kennzahlen aus dem Bereich der Nachhaltigkeit bzw. der CE im Allgemeinen, sowie des Remanufacturings und der RL im Speziellen. Grundlage des Kennzahlensystems für die vorliegende Arbeit bildet die sog. *IPAT-Formel*, die sich auf die wichtigsten Faktoren für die vom Menschen verursachte Umweltbelastung fokussiert und wie folgt definiert ist (Ehrlich & Holdren 1971; Commoner 1972; Hauschild & Kara et al. 2020):

$$IM = P \cdot A \cdot TE$$

Dabei steht IM für den Umwelteinfluss (engl. “environmental impact“), P für die Bevölkerung (engl. “population“), A für den Lebensstandard (engl. “affluence“) und TE für den Technologiefaktor (engl. “technology“). TE wird auch als Umweltintensität der Technologie bezeichnet, ausgedrückt als Umweltbelastung pro geschaffenen Wert bzw. Funktionalität. Dieser Faktor kann somit auch als inverser Faktor der Ökoeffizienz betrachtet werden, welche wie folgt definiert ist (Hauschild 2015; Hauschild & Kara et al. 2020):

$$\text{Ökoeffizienz} = \frac{1}{TE} = \frac{\text{Geschaffener Wert bzw. Funktionalität}}{\text{Umweltbelastung}} \quad 5.8$$

Ökoeffizienz wird definiert durch die Bereitstellung von Waren und Dienstleistungen zu wettbewerbsfähigen Preisen, die die Bedürfnisse der Bevölkerung befriedigen, während gleichzeitig die ökologischen Auswirkungen und die Ressourcenintensität über den gesamten Lebenszyklus hinweg reduziert werden (Schmidheiny 1998; Kara & Hauschild et al. 2022). Dieses Konzept bildet somit die beiden Dimensionen der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit ab (vgl. Barbier 1987; Robert & Parris et al. 2005). Zahlreiche Studien haben bereits die Vorteilhaftigkeit des Remanufacturings in diesen beiden Dimensionen gezeigt (z. B. Parker & Riley et al. 2015; Barquet & Rozenfeld et al. 2013; Kara & Hauschild et al. 2022).

Um mögliche Verbesserungen einer Transparenzsteigerung in der RL zur Optimierung der MRP für das Remanufacturing darzustellen und zu vergleichen, stellt die Ökoeffizienz den maßgebenden Rahmen für das Kennzahlensystem der vorliegenden Arbeit dar. Da aufgrund des Fokus auf die Produktionssicht eine Bewertung der Marktsicht und damit des geschaffenen Werts außerhalb des Betrachtungsrahmens der vorliegenden Arbeit liegt, wird diese durch eine Bewertung der Kostenänderung substituiert. Dabei liegt der Fokus auf den operativen Gesamtkosten, deren Zusammensetzung in Kapitel 5.3.3.1 vorgestellt wird. Auf Seiten der Umweltbelastung werden ebenfalls insbesondere diejenigen Bereiche betrachtet, die durch einen höheren Informationsaustausch und Verbesserungen in der MRP beeinflusst werden. Dabei ist z. B. die Umweltbelastung der Cores durch die zurückgelegte Strecke in der RL relevant (vgl. Kapitel 5.3.3.2). Eine konkrete Berechnung eines Werts für die Ökoeffizienz nach Formel 5.8 erfolgt somit im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht. Stattdessen wird die zugrunde liegende Logik, d. h. das Spannungsverhältnis zwischen ökonomischen und ökologischen Zielgrößen, für das Zielsystem verwendet und zur Bewertung genutzt.

5.3.3.1 Ökonomische Kennzahlen

Die wirtschaftliche Machbarkeit des Remanufacturings ist einer der wichtigsten Faktoren in der industriellen Umsetzung (Sundin 2004). Aus ökonomischer Sicht sind die operativen Gesamtkosten für die vorliegende Arbeit relevant. Die operativen Gesamtkosten C_{ges} ergeben sich dabei wie folgt:

$$C_{ges} = c_{reman} + c_{trans} + c_{info} + c_{beschaffung} + c_{straf} \quad 5.9$$

Diese setzen sich aus den operativen Remanufacturing-Kosten c_{reman} , den operativen Transportkosten c_{trans} , den operativen Kosten des Informationsaustauschs c_{info} , den operativen Kosten der MRP, d. h. den Beschaffungskosten $c_{beschaffung}$, sowie den Strafkosten c_{straf} zusammen.

Die Remanufacturing-Kosten wiederum ergeben sich aus der Multiplikation der prozessspezifischen und zeitabhängigen Kosten c_{pr} mit der notwendigen Prozesszeit $t_{rpro,pr}$, summiert über alle für das Remanufacturing notwendigen Prozessschritte pr sowie über alle aufgearbeiteten Produkte $rpro$:

$$c_{reman} = \sum_{pr \in PR} \sum_{rpro \in RPro} c_{pr} \cdot t_{rpro,pr} \quad 5.10$$

Die Transportkosten ergeben sich aus der Summe aller transportierten Cores zwischen zwei Standorten $trans_{co,i,j}$ mit den Kosten für den Transport über die zugrundeliegende Strecke $c_{trans_{i,j}}$. Da neben den Transporten der Cores zwischen Werkstätten und Sammelstandorten, sowie zwischen Sammel- und Remanufacturing-Standorten auch die transportierten Komponenten zwischen Lieferanten und dem Remanufacturing-Standort berücksichtigt werden müssen, ergeben sich drei Summanden.

$$C_{trans} = \sum_{i \in WK, j \in SaSt, co \in CO} c_{trans_{i,j}} \cdot trans_{co,i,j} + \sum_{i \in SaSt, j \in ReSt, co \in CO} c_{trans_{i,j}} \cdot trans_{co,i,j} + \sum_{i \in L, j \in ReSt, kom \in Kom} c_{trans_{i,j}} \cdot trans_{kom,i,j} \quad 5.11$$

Für die Berechnung der Kosten der Informationsaufnahme und -weitergabe werden für alle Werkstätten, Sammel- und Remanufacturing-Standorte die Anzahl der Cores co , die diesen Standort durchlaufen haben und für die Informationen aufgenommen wurden $Anz_{co,i}$ mit den entsprechenden Kostensätzen c_{info_i} multipliziert:

$$c_{info} = \sum_{i \in WK \cup SaSt \cup ReSt, co \in CO} c_{info_i} \cdot Anz_{co,i} \quad 5.12$$

Die operativen Kosten der MRP, d. h. die Beschaffungskosten, ergeben sich aus den bestellfixen Kosten je Komponente $c_{K,kom}$ multipliziert mit der Anzahl an Bestellungen je Komponente $Anz_{bestell,kom}$, den Stückkosten je Komponente $c_{stück,kom}$ multipliziert mit der Anzahl an bestellten Stück je Komponente $Anz_{stück,kom}$, sowie den Lagerhaltungskosten je Periode und Komponente $c_{h,kom}$ multipliziert mit der Anzahl an Komponenten, die in jeder Periode gelagert werden $Anz_{lager,kom,t,t+1}$:

$$c_{beschaffung} = \sum_{kom \in Kom} c_{K,kom} \cdot Anz_{bestell,kom} + \sum_{kom \in Kom} c_{stück,kom} \cdot Anz_{stück,kom} + \sum_{kom \in Kom, t \in \{1, \dots, T-1\}} c_{h,kom} \cdot Anz_{lager,kom,t,t+1} \quad 5.13$$

Die Strafkosten c_{straf} ergeben sich aus der unbedienten Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten $D_{rpro,unbedient}$ und entsprechen somit gleichzeitig den Fehlmengenkosten für Neukomponenten, da diese nicht rechtzeitig zur Aufarbeitung eines Cores zur Verfügung standen:

$$c_{straf} = \sum_{rpro \in RPro} c_{straf,rpro} \cdot D_{rpro,unbedient} \quad 5.14$$

Insbesondere in Bezug auf die Verbesserung der MRP ist die Liefertreue LT eine weitere relevante, ökonomische Kennzahl. Diese ergibt sich aus der bedienten Nachfrage über alle Produkte hinweg geteilt durch die Gesamtnachfrage:

$$LT = \sum_{rpro \in RPro, t \in T} \frac{D_{rpro,bedient,t}}{D_{rpro,bedient,t} + D_{rpro,unbedient,t}} \quad 5.15$$

Weiterhin wird der Fehlmengenanteil f als inverses der Liefertreue bzw. anhand des aggregierten Anteils aller nicht verfügbaren Komponenten kom über den gesamten Planungszeitraum wie folgt definiert:

$$f = 1 - LT = \sum_{t=1}^T \sum_{kom \in Kom} f_{kom,t} \quad 5.16$$

Abschließend werden zeitabhängige Kennzahlen zur Bestimmung von durchschnittlichen Durchlauf- und Bestandszeiten definiert und erhoben. Hierzu gehören beispielsweise die Durchlaufzeiten je Core co in Werkstätten $t_{co,wk}$, an Sammelstandorten $t_{co,sast}$ und an Remanufacturing-Standorten bis zur Demontage $t_{co,rest}$, die anschließende Zeit einer Komponente kom bis zur Remontage am Remanufacturing-Standort $t_{kom,rest}$, sowie abschließend die Bestandszeit eines aufgearbeiteten Produkts bis zur Distribution $t_{rpro,rest}$. Durch Aufsummieren der einzelnen Kennzahlen lassen sich sowohl durchschnittliche Durchlaufzeiten einzelner Standorte als auch einzelner Typen von Komponenten und Cores bzw. aufgearbeiteten Produkten bestimmen, welche zur detaillierten Analyse verwendet werden.

5.3.3.2 Ökologische Kennzahlen

Aus ökologischer Sicht ist insbesondere der durchschnittliche CO₂-Ausstoß je Core relevant. Insbesondere der erhöhte Transportaufwand der RL im Gegensatz zur klassischen Logistik spielt dabei eine wichtige Rolle (Köhler 2011). Demzufolge wird die Umweltbelastung je Core U_{co} entsprechend der zurückgelegten Strecke d_{co} und dem durchschnittlichen CO₂-Verbrauch je Strecke v_{CO_2} definiert:

$$U_{co} = d_{co} \cdot v_{CO_2} \quad 5.17$$

Neben der Umweltbelastung im Sinne des CO₂-Ausstoßes des Rücktransports ist für die vorliegende Arbeit die Aufarbeitungsquote von Interesse, die den Anteil eingesparter Ressourcen durch das Remanufacturing bzw. durch eine effizientere MRP angibt. Die Aufarbeitungsquote

AQ ergibt sich dabei aus dem Verhältnis von aufgearbeiteten Komponenten in den aufgearbeiteten Produkten $Anz_{aufg,kom}$ zu der gesamten Anzahl an verarbeiteten Komponenten. Dieser Faktor wird mit der Liefertreue LT multipliziert, da unbediente Nachfrage entsprechend der Annahme aus Kapitel 5.1 mit Neuprodukten bedient wird.

$$AQ = \sum_{kom \in K_{om}} \frac{Anz_{aufg,kom}}{Anz_{aufg,kom} + Anz_{neu,kom}} \cdot LT \quad 5.18$$

5.4 Simulationsbasiertes Optimierungsmodell

Zur Analyse der Wirkzusammenhänge ist neben dem Kennzahlensystem eine Nachbildung des realen Systems in einem dynamischen und modular aufgebauten Modell notwendig. Hierzu werden die in den Kapiteln 5.1 und 5.2 erlangten Erkenntnisse zunächst in ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell überführt (Kapitel 5.4.1). Anschließend wird die Integration der in Kapitel 5.3 modellierten MRP für das Remanufacturing in dieses Modell erläutert (Kapitel 5.4.2). Abschließend erfolgt die Vorstellung der Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung (Kapitel 5.4.3) sowie die Entwicklung einer statistischen Versuchsplanung zur Auswertung des simulationsbasierten Optimierungsmodells (Kapitel 5.4.4).

5.4.1 Aufbau des Simulationsmodells für den Material- und Informationsfluss

Das simulationsbasierte Optimierungsmodell ist in der javabasierten AnyLogic 8.8.0 ©-Software implementiert und setzt sich aus fünf Prozess-, drei Interaktions-, sowie einem Optimierungsmodul zusammen, welche in Summe alle Aspekte der Beschreibungsmodelle enthalten (vgl. Abbildung 5.15). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Lindemann 2020, A_Nilles 2022, A_Dressler 2023). Die Prozessmodule stellen die für das Remanufacturing relevanten Wertschöpfungsprozesse mit ihren Eigenschaften dar. Die Interaktionsmodule verknüpfen die Prozessmodule mittels zuvor definierter Logik (Steuerungsmodul), Informationen (Informationsmodul) bzw. Auswertung des Kennzahlensystems (Bewertungsmodul). Das Optimierungsmodul enthält die MRP und wird in Kapitel 5.4.2 näher erläutert. Abschließend existiert ein externes Modul zur Datenverwaltung und -verarbeitung, welches notwendige Schnittstellen zum Einlesen von Parametern im Rahmen der statistischen Versuchsplanung bereitstellt sowie die Auswertung des Gesamtmodells ermöglicht.

Die *Prozessmodule* setzen sich dabei zunächst aus den in der automobilen RL vorhandenen Akteuren, d. h. den Werkstätten, den Sammelstandorten, sowie den Remanufacturing-Standorten zusammen. Diese sind aufgrund ihrer spezifischen Aufgaben und Prozesse in

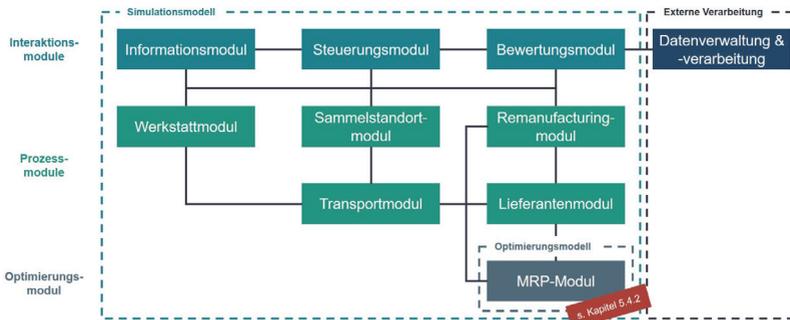


Abbildung 5.15: Aufbau und Module des simulationsbasierten Optimierungsmodells

separaten Modulen implementiert. Das *Werkstattmodul* ist dabei zunächst für die Generierung von Cores basierend auf Kundenaufträgen zuständig. Durch die Möglichkeit hinsichtlich der flexiblen Wahl einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Qualität und die Ankunftsprozesse der Cores sowie aufgrund der geographischen Verteilung der Werkstätten, werden die im Remanufacturing vorherrschenden, multidimensionalen Unsicherheiten abgebildet. Darüber hinaus können je nach Szenario des Informationsaustauschs in den Werkstätten mehr oder weniger Informationen bzgl. der Cores aufgenommen werden. Die Cores werden von den Werkstätten an ihren jeweils nächstgelegenen Sammelstandort transportiert, welche im *Sammelstandortmodul* implementiert sind. Analog zum Werkstattmodul durchlaufen Cores die Prozessschritte abhängig vom Szenario des Informationsaustauschs. Aufgrund der Annahme, dass Sammelstandorte über mehr Expertenwissen hinsichtlich der Qualität und Wiederverwendbarkeit von Cores verfügen, können Cores hier bspw. mit bestimmten Informationskombinationen ausgeschleust werden. Abschließend werden Remanufacturing-Standorte in Form von *Remanufacturingmodulen* implementiert, die die in Kapitel 5.1.2 vorgestellten Prozessschritte inkl. Übergang zwischen *Push-* und *Pull-*Steuerung realisieren. Zuletzt werden interne und externe Lieferanten mittels *Lieferantenmodul* abgebildet, die Neukomponenten bzw. -produkte zu definierten Kosten anbieten. Der Transport zwischen diesen Akteuren, d. h. die Generierung eines Sendungsauftrags, die Konsolidierung der Abholung von Cores bei mehreren Werkstätten und die Routenplanung übernimmt das *Transportmodul*. Die Schnittstelle zwischen dem Lieferanten- und dem Remanufacturingmodul bildet das *MRP-Modul*, welches in Kapitel 5.4.2 erläutert wird.

Die *Interaktionsmodule* verknüpfen die Prozessmodule logisch miteinander. Im Zentrum steht hierbei das *Steuerungsmodul*, welches die übergeordnete Logik des Simulationsmodells darstellt. Dieses generiert ortsunabhängige Kundenaufträge zur Nachfrage nach aufgearbeiteten

Produkten, welche vom Remanufacturingmodul bedient werden, sowie zur Rückgabe von EoL-Produkten, woraus im Werkstattmodul Cores generiert werden. Einen ebenfalls zentralen Baustein stellt das *Informationsmodul* dar, welches den Informationsagenten implementiert und somit den Zugang einzelner Akteure bzw. Module zu existierenden Informationen gezielt steuern kann. Somit kann bspw. das Remanufacturingmodul weniger oder mehr Zugriff auf Informationen haben, wodurch das MRP-Optimierungsmodul mit unterschiedlichen Informationsständen durchgeführt wird. Zuletzt stellt das *Bewertungsmodul* die Implementierung des Kennzahlensystems dar (vgl. Kapitel 5.3.3) und unterstützt somit die Entscheidungsfindung.

Zur *Datenverwaltung und -verarbeitung* besitzt das Simulationsmodell entsprechende Schnittstellen zur Kommunikation. Hierüber kann bspw. die Belegung initialer Parameter zu Beginn der Simulation sowie der Export der Ergebnisse zur späteren Analyse und Dokumentation erfolgen.

Zur Sicherstellung einer hinreichenden Genauigkeit bei der Implementierung des Simulationsmodells findet eine kontinuierliche und iterative Verifikation statt (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, VDI 3633-1). Dabei wird u. a. mit Hilfe des Debugging-Tools von AnyLogic © sowie anhand des strukturierten Durchgehens des implementierten Quellcodes sichergestellt, dass keine Programmierfehler vorliegen. Darüber hinaus wird die Modelllogik mithilfe von Tracing, Monitoring sowie Grenzwert- und Sensitivitätsanalysen überprüft und verifiziert. Die Validierung der Methodik erfolgt im Rahmen der exemplarischen Anwendung im AA (vgl. Kapitel 6).

5.4.2 Aufbau des Optimierungsmodells für die Materialbedarfsplanung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist die MRP in die Implementierung des simulationsbasierten Optimierungsmodells integriert und somit ebenfalls javabasiert. Der konzeptionelle Aufbau des MRP-Moduls ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

Das MRP-Modul implementiert somit sowohl die vorgestellten stochastischen (t,q)-, (s,q)-, (t,S)- und (s,S)-Politiken als auch Lösungsalgorithmen für die deterministischen Bestellpolitiken des *Wagner-Whitin-Modells* (WW) sowie der *Silver-Meal-Heuristik* (SM). Dem flexiblen und modularen Aufbau des simulationsbasierten Optimierungsmodells wird somit Rechnung getragen, indem die unterschiedlichen Bestellpolitiken beliebig verwendet werden können. Die Integration und der Ablauf der MRP in die simulationsbasierte Optimierung ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

Ausgangspunkt des Optimierungsmodells ist die statische Regenerationsrate $R_{stat, kom}$ sowie ein Abbild des aktuellen Systemzustands des Simulationsmodells zum Zeitpunkt T' ,

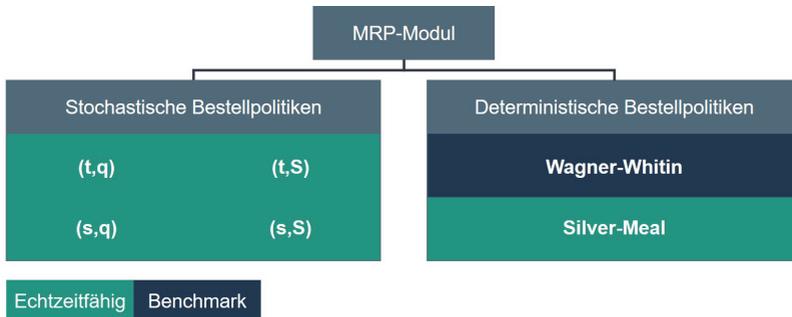


Abbildung 5.16: Aufbau des MRP-Moduls.

zu dem das Optimierungsmodell aufgerufen wird. Aus dieser statischen Regenerationsrate wird anhand der vom Simulationsmodell zur Verfügung gestellten Informationen die aggregierte, dynamische Regenerationsrate $R_{dyn,kom}$ je Komponente für alle im Umlauf befindlichen Cores bestimmt. Da der Informationsagent, wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben, auch gezielt den Zugang zu Informationen beschränken kann, wird die vom Optimierungsmodell berechnete Regenerationsrate auch als *bekannte Regenerationsrate* bezeichnet, die je nach Informationsaustausch der dynamischen oder der statischen Regenerationsrate entspricht. Die Realisierung der tatsächlichen Regenerationsrate $R_{real,kom} \in \{0, 1\}$ erfolgt am Remanufacturing-Standort im Rahmen der Aufarbeitungsschritte, sofern der Core nicht zuvor schon aufgrund der aufgenommenen und geteilten Informationen ausgeschleust wurde. Die tatsächliche Regenerationsrate $R_{real,kom}$ realisiert sich entsprechend Formel 5.19, wobei γ_{kom} einer gleichverteilten Zufallsvariable im Intervall zwischen 0 und 1 entspricht, d. h. $\gamma_{kom} \sim U([0, 1])$.

$$R_{real,kom} = \begin{cases} 1, & \gamma_{kom} \leq R_{dyn,kom} \\ 0, & \gamma_{kom} > R_{dyn,kom} \end{cases} \quad 5.19$$

Anhand der dynamischen Regenerationsrate je Komponente kann ein Remanufacturing-Unternehmen im nächsten Schritt die Nachfrage nach Komponenten bestimmen. Je nach gewählter Bestellpolitik errechnet das Optimierungsmodell anschließend die Werte der jeweiligen Politik entsprechend der Formeln aus Kapitel 5.3.2. Abweichungen von der berechneten Bestellmenge sind möglich, wenn bspw. die Mindestbestellmenge $q_{min,kom}$ einer Kompen-

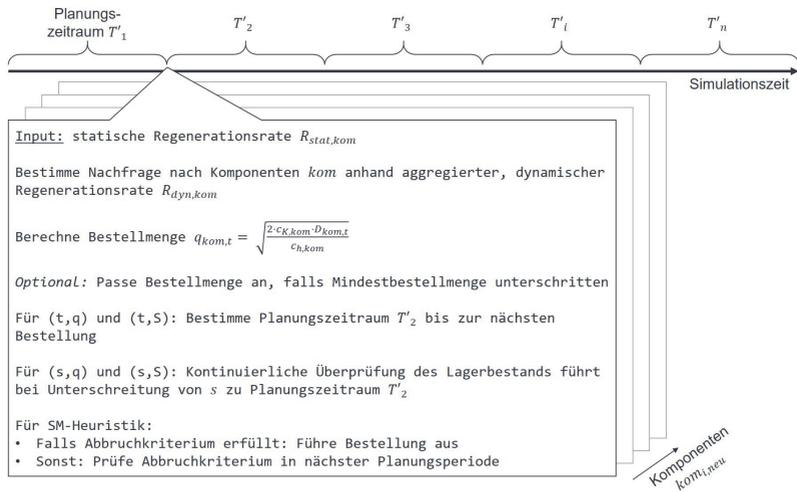


Abbildung 5.17: Integration und Ablauf der Materialbedarfsplanung für Neukomponenten im Remanufacturing (A_Nilles 2022).

te unterschritten wird. In diesem Fall wird die Bestellmenge auf die Mindestbestellmenge aufgerundet.

Als Ergebnis eines Beschaffungsauftrags wird in den (t,q) - und (t,S) -Politiken, neben der Bestellmenge $q_{kom,t}$, der Zeitraum festgelegt, welcher den Abstand zwischen zwei Bestellungen festlegt. Bei den (s,q) - und (s,S) -Politiken erfolgt eine kontinuierliche Überprüfung des Lagerbestands. Nach Unterschreiten des Meldebestands s_{kom} wird die Bestellung entsprechend der zuvor berechneten Menge initialisiert. Bei der SM-Heuristik wird der Bedarf für die jeweils nächste Planungsperiode bestimmt und dieser vereinfachend für alle weiteren Perioden angenommen. Anschließend wird überprüft, ob das Abbruchkriterium für die aktuelle Periode erfüllt ist und ggfs. eine Bestellung ausgelöst. Dieses Vorgehen wird bei jeder Bestellpolitik iterativ wiederholt, bis das Ende des Planungszeitraums erreicht wird. Nach Ablauf der komponentenspezifischen Lieferzeiten stehen die jeweils bestellten Komponenten zur Verfügung und können für die Aufarbeitung genutzt werden.

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wird im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung eine globale Bestellpolitik ausgewählt, die als übergeordnete Logik für alle Komponenten gilt, wobei die berechneten Parameter wie beschrieben komponentenspezifisch sind. Mittels der Untersuchung verschiedener Szenarien können anschließend Aussagen über die

Güte sowie Vergleiche zwischen der Performance unterschiedlicher Bestellpolitiken getroffen werden.

Die exakte Lösung des *Wagner-Whitin*-Modells (z. B. mit Hilfe des Kürzeste-Wege-Problems) erfordert, wie in Kapitel 5.3.2.2 erläutert, Kenntnisse über jegliche Bedarfe im gesamten Planungszeitraum im Voraus. Eine direkte Integration in das Optimierungsmodell, welches in den Ablauf des Simulationsmodells integriert ist, ist somit nicht möglich. Nach vollständiger Kopplung und Durchlauf von Simulation und Optimierung kann das Modell jedoch genutzt werden, um als Benchmark eine exakte Lösung zu bestimmen. Dieses Vorgehen wird im nächsten Kapitel 5.4.3 beschrieben.

5.4.3 Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung

Nachdem der konzeptuelle Aufbau des simulationsbasierten Optimierungsmodells sowie die Integration der MRP vorgestellt wurden, wird zuletzt eine Ablaufplanung für die simulationsbasierte Optimierung entwickelt, welche unter Einbeziehung der vorherigen Elemente die Identifikation von Wirkzusammenhängen ermöglicht. Gleichzeitig bildet sie die Grundlage für die abschließende Ableitung von Handlungsempfehlungen (vgl. Kapitel 5.5).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dient die Simulation als Hauptmethode zur Evaluation des Systemverhaltens unter gegebenen Konfigurationen (z. B. Anzahl und Verteilung der Standorte unterschiedlicher Akteure) und Szenarien (z. B. Stückzahlscenario, Bestellpolitik, Informationsaustausch), während die Optimierung als Submethode die Einstellung der MRP vornimmt, um somit verschiedene Systemzustände zu erzeugen. Es handelt sich somit um eine hierarchische Verknüpfung (vgl. Kapitel 2.3.2). Gleichzeitig handelt es sich aufgrund der Unsicherheiten um ein stochastisches Entscheidungsproblem, bei dem jedoch der Lösungsraum durch die diskreten Konfigurationen und Szenarien ebenfalls diskret gegeben ist. Die Ablaufplanung zur Identifikation von Wirkzusammenhängen besteht aus drei Schritten, welche im Folgenden im Detail erläutert werden (vgl. Abbildung 5.18, vgl. Mayer 2011).

In Schritt (1) erfolgt zunächst die Initialisierung der simulationsbasierten Optimierung anhand einer gegebenen Konfiguration der RL, welche zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse konstant gehalten wird. Die (echtzeitfähigen) Bestellpolitiken sowie weitere Einflussgrößen werden jedoch im Rahmen der untersuchten Szenarien gezielt variiert (vgl. Kapitel 5.4.4). Nach dem Durchlauf der simulationsbasierten Optimierung im ersten Schritt unter gegebener Konfiguration bzw. gegebenem Szenario liegt somit das Ergebnis der Echtzeitberechnung der gewählten Bestellpolitik sowie die realisierte Nachfrage des unter den gegebenen Einflussgrößen definierten Szenarios vor. Mittels Variation von Bestellpolitik und Einflussgrößen kann dieser erste Schritt beliebig iterativ wiederholt werden, um das Systemverhalten unter verschiedenen Szenarien zu analysieren.

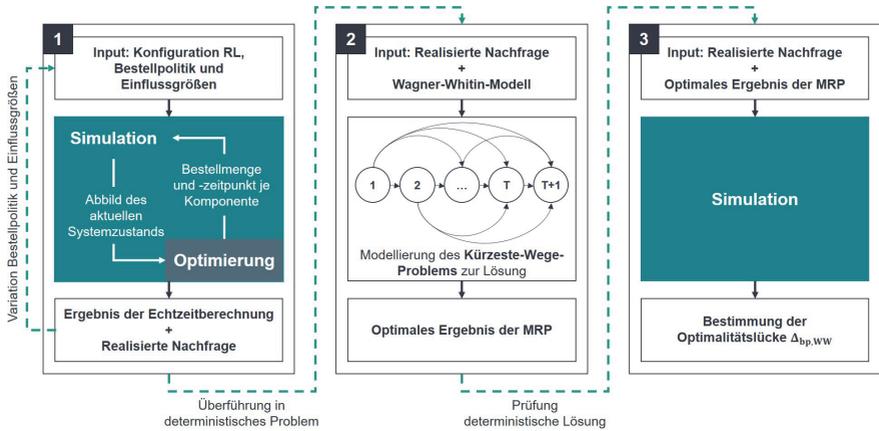


Abbildung 5.18: Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung (A_Dressler 2023).

In Schritt (2) erfolgt die Überführung des stochastischen Entscheidungsproblems in ein deterministisches Problem für jedes untersuchte Szenario bzw. jede Iteration aus Schritt (1). Hierzu wird die realisierte Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten D_{rpro} sowie die aus der tatsächlichen Regenerationsrate $R_{real, kom}$ resultierende Nachfrage nach neuen Komponenten D_{kom} aus dem ersten Schritt der Ablaufplanung genutzt, um mit Hilfe des *Wagner-Whitin*-Modells eine exakte Lösung der MRP unter Annahme der Kenntnis über alle realisierten Nachfragen zu berechnen. Dabei wird auf das in Kapitel 5.3.2.2 vorgestellte *Kürzeste-Wege-Problem* zur Lösung des Modells zurückgegriffen. Als Ergebnis hieraus liegt somit das theoretisch optimale Ergebnis der MRP vor.

Um letztlich die Leistung der stochastischen Bestellpolitiken im Vergleich zu der vom *Wagner-Whitin*-Modell bestimmten Lösung beurteilen zu können erfolgt in Schritt (3) der Ablaufplanung ein erneuter Durchlauf des Simulationsmodells, jedoch ohne die MRP-Komponente. Stattdessen wird das exakte Ergebnis des *Wagner-Whitin*-Modells als Input verwendet und beurteilt, zu welchen Ergebnissen diese Lösung im Simulationsmodell führt. Abschließend wird unter Vergleich der Lösungen eine sog. Optimalitätslücke (engl.: “gap“, Nickel & Stein et al. 2014) als $\Delta_{bp, WW}$ für jede Bestellpolitik $bp \in BP = \{(t, q), (t, S), (s, q), (s, S), SM\}$ und das *Wagner-Whitin*-Modell (WW) bestimmt. Somit kann für jede der in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Kennzahlen sowie jedes untersuchte Szenario eine Benchmark-Analyse und anschließende *rangbasierte Selektion* durchgeführt werden, indem die ermittelten Lösungen aufsteigend sortiert in eine Rangfolge gebracht werden (vgl. Mayer 2011).

5.4.4 Statistische Versuchsplanung

Aufgrund der hohen Anzahl an Einflussgrößen und damit einhergehenden Parameterkombinationen ist eine vollfaktorielle Untersuchung weder möglich noch sinnvoll. Um Aufwand und Komplexität bei der Versuchsdurchführung zu reduzieren und gleichzeitig eine hohe Aussagekraft beizubehalten, widmet sich das folgende Kapitel der Entwicklung einer statistischen Versuchsplanung. Hierzu werden zunächst Einflussgrößen festgelegt, Szenarien (d. h. konkrete Parameterkombinationen) abgeleitet und anschließend eine Auswahl eines geeigneten Versuchsdesigns getroffen (vgl. Kapitel 2.3.3).

5.4.4.1 Einflussgrößen: Steuer- und Störfaktoren

Einflussgrößen lassen sich in Steuer- und Störfaktoren unterscheiden. Steuerfaktoren sind Faktoren, die innerhalb der einzelnen Läufe der simulationsbasierten Optimierung gezielt variiert werden, um deren Einfluss auf die Zielgrößen zu beobachten (Kleppmann 2020). *Störfaktoren* können zwar ebenfalls einen Einfluss auf die Zielgrößen haben, sind allerdings in der Realität aufgrund ihres stochastischen Verhaltens i. d. R. nicht beeinflussbar und werden somit aus Gründen der Komplexitätsreduktion im Rahmen der vorliegenden Arbeit konstant gehalten (Kleppmann 2020).

Eine Übersicht der zu untersuchenden Steuerfaktoren ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Zu den im Fokus stehenden Steuerfaktoren gehören zunächst verschiedene Szenarien des Informationsvektors \vec{i} der Cores. So können die Ausprägungen hinsichtlich der VIN, der Produktnummer, dem Kilometerstand, dem Fehlercode sowie der Qualität entweder zu Beginn jedes Laufs zufällig und unabhängig voneinander zugeteilt werden, um das reale Durchschnittsverhalten zu untersuchen, oder konstant gehalten werden, um den Einfluss bestimmter *qualitätsrelevanter Informationen* auf die MRP zu untersuchen. Innerhalb der Untersuchung des Durchschnittsverhaltens, d. h. eines *variierenden Informationsvektors*, können darüber hinaus unterschiedliche *Stückzahlenszenarien* szs untersucht werden, welche das Verhältnis aus zurückfließenden Cores und der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten vorgeben.

Der *Grad des Informationsaustauschs* ia , der mittels Informationsagent gesteuert werden kann, stellt einen weiteren Steuerfaktor dar, welcher gezielt variiert wird. Zusätzlich kann hinsichtlich der *Anbindung der Werkstätten* wka an den Informationsaustausch eine weitere Spezifizierung stattfinden, d. h. welcher Anteil der abgebildeten Werkstätten nicht nur EoL-Produkte, sondern auch zugehörige produktspezifische Informationen weiterleitet.

Abgeleitet aus dem Grad des Informationsaustauschs stellt die gewählte *Bestellpolitik* bp einen weiteren Steuerfaktor dar. Neben den vorgestellten stochastischen Bestellpunkt- und

Bestellrhythmusverfahren steht hierbei die SM-Heuristik während des Durchlaufs einer simulationsbasierten Optimierung zur Wahl. Je nach untersuchtem Szenario kann im Anschluss außerdem das *Wagner-Within*-Modell als Benchmark zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 5.4.3).

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ausprägungen der qualitätsrelevanten Informationen, d. h. des Kilometerstands $\varphi_{km,co}$, des Fehlercodes $\varphi_{F,co}$ und der Qualität $\varphi_{Q,co}$, auf die dynamische Regenerationsrate der Komponenten stellt weitere Steuerfaktoren dar. Hinzu kommen gezielte Variationen der Bestandteile des Komponentenvektors, d. h. des Ziellagerbestands S_{kom} , des Meldebestands s_{kom} , der Informationssensitivität IS_{kom} , der Mindestbestellmenge $q_{min,kom}$, der Lieferzeit τ_{kom} sowie der angenommenen statischen Regenerationsrate $R_{stat,kom}$. Abschließend stellt die maximal erlaubte Wartezeit für einen Kundenauftrag nach aufgearbeiteten Produkten $w_{D_{rpro}}$ einen weiteren Steuerfaktor dar.

Für die vorliegenden Arbeit ergeben sich in Summe 15 Steuerfaktoren, deren konkrete Ausprägungen anhand einzelner Szenarien im Folgenden beispielhaft erläutert werden.

Tabelle 5.3: Übersicht der Steuerfaktoren (A_Förster 2023).

Steuerfaktor
Ausprägungen des Informationsvektors \vec{i}
Stückzahlenszenario szs
Informationsaustausch ia
Werkstattanbindung wka
Bestellpolitik bp
Einfluss Kilometerstand auf RR $\varphi_{km,co}$
Einfluss Fehlercode auf RR $\varphi_{F,co}$
Einfluss Qualität auf RR $\varphi_{Q,co}$
Ziellagerbestand S_{kom}
Meldebestand s_{kom}
Informationssensitivität IS_{kom}
Mindestbestellmenge $q_{min,kom}$
Lieferzeit τ_{kom}
Statische Regenerationsrate $R_{stat,kom}$
Wartezeit des Kunden $w_{D_{rpro}}$

5.4.4.2 Planung der Szenarien

Zur Untersuchung der Wirkzusammenhänge eines erhöhten Informationsaustauschs in der RL auf die MRP und der Ableitung von Handlungsempfehlungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit drei Kategorien von Läufen im Detail untersucht:

1. Läufe mit *variierendem Informationsvektor* \vec{i} (vl) zur Untersuchung des Durchschnittsverhaltens
2. *Benchmark-Läufe* (BL) zur Bewertung der Güte der Bestellpolitiken mit Hilfe des *Wagner-Whitin*-Verfahrens
3. Läufe mit *konstantem Informationsvektor* \vec{i} (kl) zur Untersuchung des Einflusses einzelner Informationen

In der ersten Kategorie wird ein *variierender Informationsvektor* \vec{i} (vl) angenommen. Das bedeutet, dass die Ausprägungen des Informationsvektors zufällig zur Laufzeit der simulationsbasierten Optimierung innerhalb vorgegebener Grenzen generiert werden und somit je Komponente und je Lauf unterschiedlich ausfallen. Durch den variierenden Informationsvektor \vec{i} wird das Durchschnittsverhalten eines realen Systems untersucht, indem lediglich Wahrscheinlichkeitsverteilungen WV_i mit $i \in \{km, F, Q\}$ hinsichtlich der Ausprägungen der *qualitätsrelevanten Informationen* x_i mit $i \in \{km, F, Q\}$ verwendet werden. Somit besitzt jede Komponente eine individuelle Auswirkung auf die Regenerationsrate in Abhängigkeit der entsprechenden Informationsausprägungen $\varphi_i(x_i)$ und kommt zu einer individuellen dynamischen Regenerationsrate, wodurch Wirkzusammenhänge zwischen dem Informationsaustausch und der MRP identifiziert werden. Sowohl die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Informationsausprägungen WV_i als auch die Auswirkungen auf die Regenerationsrate $\varphi_i(x_i)$ können dabei auf historischen Daten, Erfahrungswerten oder Expertenschätzungen basieren. Der Komponentenvektor \vec{k} hingegen wird für jeden modellierten Komponententyp konstant gehalten. Dadurch können geeignete Bestellpolitiken je nach individuellen Eigenschaften der Komponenten und darüber hinaus in Abhängigkeit des Stückzahlenszenarios *szs*, des Informationsaustauschs *ia* oder der Werkstattanbindung *wka* abgeleitet werden. Durch unterschiedliche Kombinationen von Komponentenvektoren \vec{k} sowie hinsichtlich des Orts der Informationsaufnahme bzw. der Informationsverfügbarkeit können unterschiedliche Szenarien untersucht werden. Das Verhalten der untersuchten Bestellpolitik in Bezug auf die in Kapitel 5.3.3 eingeführten Kennzahlen erlaubt es, einzelne Effekte des Informationsaustauschs detailliert zu untersuchen und Wirkzusammenhänge zu identifizieren. Tabelle 5.4 zeigt beispielhafte Ausprägungen der Steuerfaktoren für die Szenarien mit einem variierenden Informationsvektor.

Tabelle 5.4: Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien mit variierendem Informationsvektor \vec{i} (vl).

Szenario vl	Informations-austausch i_a	Werkstatt-anbindung wka [%]	Bestellpolitik bp	...	Informations-vektor \vec{i}
1	kein	0	(t,q)	...	...
2	teilweise	0	(t,q)	...	...
3	vollständig	10	(t,q)	...	...
4	vollständig	20	(t,q)	...	...
5	vollständig	...	(t,q)	...	...
6	vollständig	100	(t,q)	...	...
7	kein	0	(s,q)	...	...
8	...	...	(s,q)	...	...
9	vollständig	100	(s,q)	...	...
...

Zufällige und unabhängige Ziehung der Ausprägungen für jede Komponente kom		
Information	Ausprägung	φ_i
Kilometer-stand	$x_{km} \sim WV_{km}$	$\varphi_{km}(x_{km})$
Fehlercode	$x_f \sim WV_f$	$\varphi_f(x_f)$
Qualität	$x_q \sim WV_q$	$\varphi_q(x_q)$

Im zweiten Szenario erfolgt der vollständige und iterative Durchlauf der simulationsbasierten Optimierung entsprechend der in Kapitel 5.4.3 vorgestellten Ablaufplanung. Diese *Benchmark-Läufe* (BL) untersuchen dabei das Durchschnittsverhalten eines realen Systems (vgl. vl-Szenarien). Dabei wird jedoch anhand der realisierten Nachfrage nach Neukomponenten im simulationsbasierten Optimierungsmodell ein exaktes Verfahren zur Lösung des *Wagner-Whitin*-Modells genutzt, um die theoretisch optimale Lösung zu ermitteln. Diese ermittelte Lösung wird in einem erneuten Durchlauf des Simulationsmodells umgesetzt, um die notwendigen Kennzahlen zum Vergleich zu ermitteln. Diese theoretisch optimale Lösung gilt somit als Benchmark zur Ermittlung der Güte der implementierten Bestellpolitiken, die im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung und lediglich unter Nutzung der zum Planungszeitpunkt jeweils verfügbaren Informationen eine Lösung für die Bestellmenge und -zeitpunkte ermitteln. Somit wird eine Rangfolge der implementierten Bestellpolitiken anhand ihrer Optimalitätslücke $\Delta_{bp,WW}$ erstellt, wodurch die Bewertung der Güte dieser möglich ist (vgl. Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien der Benchmark-Läufe (BL).

Szenario BL	Informations-austausch	Werkstatt-anbindung [%]	Bestellpolitik	...	Benchmark
1	vollständig	100	(t,q)	...	Wagner-Whitin
2	vollständig	100	(s,q)	...	
3	vollständig	100	(t,S)	...	
4	vollständig	100	(s,S)	...	
5	vollständig	100	Silver-Meal	...	
...

Vergleich mit vl-Läufen unter gleicher Konfiguration $\Delta_{bp,WW}$
Erstellung einer Rangfolge der echtzeitfähigen Bestellpolitiken

Im dritten Szenario, dem sog. *konstanten Informationsvektor* \vec{i} (kl), werden sowohl die Informationsvektoren \vec{i} als auch die Komponentenvektoren \vec{k} für eine definierte Anzahl an Typen von Cores bzw. Komponenten als Eingangswerte vorgegeben und somit zwischen den simulationsbasierten Optimierungsläufen nicht variiert. Jede modellierte Komponente vom gleichen Typ hat somit die exakt gleichen Informationen und Eigenschaften sowohl innerhalb eines Laufs als auch zwischen den Läufen. Hierüber wird adressiert, welche der Informationen bzw. Informationskonstellationen besonders nützlich für die MRP ist bzw. sind. Hierzu müssen zunächst aus der Menge aller möglichen Informations- und Eigenschaftskombinationen interessante Kombinationen identifiziert werden, welche aufgrund ihrer Wechselwirkung untersucht werden (vgl. Tabelle 5.6). Somit kann die Priorisierung von besonders nützlichen Informationen erfolgen. In den kl-Läufen werden lediglich der Grad des Informationsaustauschs ia , der Grad der Werkstatthanbindung wka , sowie die Bestellpolitik bp variiert.

Tabelle 5.6: Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien mit konstantem Informationsvektor \vec{i} (kl).

Szenario kl	Informations- austausch	Bestellpolitik	Qualitätsrelevante Merkmale des Informationsvektor \vec{i}			Komponentenvektor \vec{k}		
			Kilometer- stand	Qualität	Fehlercode	Wertigkeit	Mindestbestell- menge	...
1	kein	(s,q)	hoch	hoch	A	hoch	niedrig	...
2	teilweise	(s,q)	hoch	niedrig	A	niedrig	hoch	...
3	vollständig	(s,q)	hoch	hoch	B	niedrig	niedrig	...
4	kein	(t,q)	...	...	...	...	...	...
5	teilweise	(t,q)	...	...	...	...	...	...
...

5.4.4.3 Auswahl des Versuchsdesigns

Da ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgrund der hohen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten weder effizient, noch zielführend ist, wird im Folgenden ein passendes Versuchsdesign entwickelt. Dieses soll trotz einer reduzierter Anzahl notwendiger Versuche und somit eines reduzierten Aufwands weiterhin eine hohe Aussagekraft erhalten.

Aufgrund der großen Anzahl und breiten Ausprägungen der Steuerfaktoren erscheint ein raumfüllendes Versuchsdesign als sinnvoll. Im Allgemeinen ist dieses für komplexe Simulationsexperimente geeignet, da es einen großen Teil des Versuchsraums abdeckt und mehrere Faktorstufen berücksichtigt (Siebertz & van Bebber et al. 2017). Somit wird sichergestellt, dass möglichst flächendeckend verschiedene Kombinationen durchlaufen werden und möglichst alle Effekte erkannt werden, ohne jeden Wert einzeln kombinieren zu müssen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dabei auf das *Latin-Hypercube-Design* zurückgegriffen, das durch eine kontrollierte Stichprobenziehung zwar zufällige Konstellationen auswählt, diese allerdings in festgelegten Bereichen liegen (Siebertz & van Bebber et al. 2017).

Die festgelegten Bereiche im Rahmen des *Latin-Hypercube-Designs* entsprechen dabei den fünf untersuchten Bestellpolitiken, die im Fokus der Untersuchungen stehen. Innerhalb dieser Bestellpolitiken erfolgt eine gleichverteilte Stichprobenziehung, z. B. hinsichtlich des Grads der Werkstatthanbindung. Da bei dem *Latin-Hypercube-Design* die Stichprobenziehung zufällig erfolgt, werden die resultierenden Versuchspläne manuell hinsichtlich besonderer Extremszenarien, z. B. maximale oder minimale Ausprägungen der Steuerfaktoren, erweitert. Somit entsteht insgesamt ein hybrider Versuchsplan bestehend aus einem individuellem und einem raumfüllenden Versuchsdesign. Zur Gewährleistung der statistischen Repräsentativität der Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung wird jeder Versuchspunkt mehrfach wiederholt. Diese sog. Replikationen *rep* unterstützen bei dem Herausfiltern von Zufallseffekten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Replikationen je Versuchspunkt auf $rep = 10$ festgelegt (Law 2017).

5.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, ergibt sich der kostenadäquate Wert von Informationen entsprechend des gestifteten Nutzens beim jeweiligen Verwender der Informationen. Durch die in Kapitel 5.4 identifizierten Wirkzusammenhänge eines erhöhten Informationsaustauschs auf die MRP mittels simulationsbasierter Optimierung sowie des entwickelten Kennzahlensystems und Versuchsplans kann der Wert von Informationen in Bezug auf die MRP ermittelt werden. Im Rahmen des Entscheidungsmodells wird im Folgenden ein zweistufiges Vorgehen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Auswahl einer passenden Bestellpolitik vorgestellt. Dieses besteht in Schritt (1) aus der Durchführung einer Nutzwertanalyse und in Schritt (2) aus der aufbauenden PROMETHEE-Methode, aus der wiederum Insensitivitätsintervalle abgeleitet werden (vgl. Abbildung 5.19). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten auf (vgl. A_Nilles 2022, A_Förster 2023).

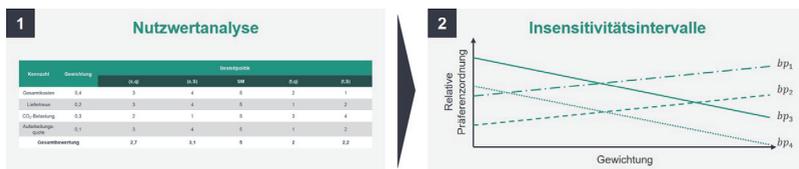


Abbildung 5.19: Framework zur Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Um Handlungsempfehlungen hinsichtlich der zu *verwendenden Bestellpolitik* abzuleiten, wird zunächst ein Vergleich der stochastischen mit den deterministischen Bestellpolitiken vorgenommen (vgl. Benchmark-Läufe in Kapitel 5.4.4). Dabei wird die entsprechend der

rangbasierten Selektion ermittelte Rangfolge der stochastischen Bestellpolitiken entsprechend ihrer Optimalitätslücken $\Delta_{bp,WW}$ verwendet. Sind diese Optimalitätslücken hinreichend klein, kann angenommen werden, dass die stochastischen Bestellpolitiken für die MRP im Remanufacturing grundsätzlich geeignet sind (Domschke & Drexl et al. 2015).

Anschließend wird in Schritt (1) eine *Nutzwertanalyse* durchgeführt. Eine Nutzwertanalyse ist eine qualitative Analyseverfahren, welche eingesetzt werden kann, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen (VDI 5200-4). Hierzu müssen zu Beginn relevante Zielgrößen identifiziert werden, anhand derer ein Vergleich der verschiedenen Bestellpolitiken erfolgen kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit zählen zu diesen Zielgrößen die entwickelten operativen Kennzahlen, d. h. die Gesamtkosten, die Liefertreue, die CO₂-Belastung und die Aufarbeitungsquote. Diese Zielgrößen werden vom Anwender bzw. Entscheider gemäß individueller Präferenzen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit bewertet, z. B. indem 100 Prozentpunkte auf die verschiedenen Ziele verteilt werden (VDI 5200-4). Diese Gewichtung wird mit w_z bezeichnet, wobei z die Zielgröße darstellt. Anschließend wird jede Bestellpolitik hinsichtlich ihrer Erfüllung bzgl. der Zielgrößen gewichtet, was als $n_{bp,z}$ bezeichnet wird, wobei n die Kriterienerfüllung für Bestellpolitik bp hinsichtlich der Zielgröße z darstellt (VDI 5200-4). Die Bestimmung des Nutzwerts N je Bestellpolitik $bp \in BP$ ergibt sich somit entsprechend folgender Formel (VDI 5200-4):

$$N_{bp} = \sum_{z=1}^Z w_z \cdot n_{bp,z} \quad 5.20$$

Mittels Vergleich der Nutzwerte aller alternativen Bestellpolitiken je untersuchtem Szenario (z. B. hinsichtlich Stückzahlenszenario *szs*, Informationsaustausch *ia* oder Werkstatteinbindung *wka*) kann eine Rangfolge dieser für das jeweils untersuchte Szenario bestimmt werden. Sowohl durch die Auswahl verschiedener Zielgrößen, als auch durch deren individuelle Gewichtung können unterschiedliche Präferenzen bei verschiedenen Entscheidern berücksichtigt werden.

In Schritt (2) wird das *PROMETHEE-Verfahren* (engl.: "Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation") als multikriterielle Entscheidungsunterstützung verwendet (Geldermann & Lerche 2014; Papathanasiou & Ploskas 2018; Brans & Smet 2016). Dieses stellt ein Outranking-Verfahren dar und ermöglicht es, schwache Präferenzen und Unvergleichbarkeiten auszudrücken sowie Insensitivitätsintervalle abzuleiten (Geldermann & Lerche 2014). Im Allgemeinen werden die PROMETHEE-Verfahren I bis VI unterschieden,

wobei im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich die Verfahren I und II zur Anwendung kommen. Für weiterführende Literatur sei auf Geldermann & Lerche (2014) verwiesen. Ähnlich zur Nutzwertanalyse erfolgt zunächst die Ermittlung der Präferenzen der unterschiedlichen Entscheidungsalternativen, d. h. der Bestellpolitiken bp . Die Präferenzen können jedoch anhand einer anwenderspezifischen Präferenzfunktion, die über den Präferenzwert p , den Indifferenzwert q , sowie den (optionalen) Wendepunkt σ eindeutig definiert ist, komplexere Präferenzen abbilden (Geldermann & Lerche 2014). Dabei lassen sich im allgemeinen sechs Präferenzfunktionen unterscheiden: Gewöhnliches Kriterium, Quasi-Kriterium, Kriterium mit linearer Präferenz, Stufen-Kriterium, Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzbereich, sowie Gauß'sches Kriterium (Geldermann & Lerche 2014). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dabei auf das gewöhnliche Kriterium zurückgegriffen, welches eine strikte Präferenz einer Alternative gegenüber einer anderen aufweist, sobald die Ausprägung dieser nur geringfügig größer und das entsprechende Kriterium zu maximieren ist (Geldermann & Lerche 2014). Diese Präferenzen sind bereits aus der Nutzwertanalyse aus Schritt (1) bekannt. In Erweiterung dazu werden beim PROMETHEE-Verfahren im nächsten Schritt die subjektiven Kriteriengewichtungen eines Kriteriums im Vergleich zu sämtlichen weiteren Kriterien ermittelt (Geldermann & Lerche 2014). Anschließend werden die sog. Outranking-Relationen für jeden Paarvergleich ermittelt, indem die Präferenzwerte aus den Differenzen der Kriterienausprägungen der betrachteten Alternativen bestimmt werden (Geldermann & Lerche 2014). Die Outranking-Relation ergibt sich letztlich über die Summe der erzielten Präferenzwerte, wobei diese mit der jeweiligen Kriteriengewichtung multipliziert werden (Geldermann & Lerche 2014):

$$\pi(bp_i, bp_j) = \sum_{k=1}^K w_z \cdot n_k(bp_i, bp_j) \quad 5.21$$

$\pi(bp_i, bp_j)$ bezeichnet dabei die Outranking-Relation der Bestellpolitik bp_i zu Bestellpolitik bp_j , d. h. inwieweit Bestellpolitik bp_i gegenüber bp_j präferiert wird, wobei w_z die Gewichtung der Zielgröße z darstellt. Die Ermittlung erfolgt dabei über sämtliche Kriterien k . Im nächsten Schritt werden die Aus- und Eingangsflüsse der verschiedenen Bestellpolitik bp_i anhand folgender Formeln bestimmt, die zeigen, ob Unvergleichbarkeiten vorliegen und, falls nicht, inwieweit eine alternative Bestellpolitik bp_i im Vergleich zu den anderen Bestellpolitiken Vor- bzw. Nachteile aufweist (PROMETHEE I):

$$\text{Ausgangsfluss: } \Phi_i^+ = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n \pi(bp_i, bp_j) \quad 5.22$$

$$\text{Eingangsfluss: } \Phi_i^- = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n \pi(bp_j, bp_i) \quad 5.23$$

$$\text{Nettofluss: } \Phi_i^{net} = \Phi_i^+ - \Phi_i^- \quad 5.24$$

Eine Unvergleichbarkeit der Ergebnisse liegt bei einem parallelen Verlauf der Flussgrößen (Ein- und Ausgangsfluss) vor. Ist dies nicht der Fall, kann eine Rangordnung ermittelt und die resultierenden Nettoflüsse als Differenz aus den Aus- und Eingangsflüssen verwendet werden (PROMETHEE II, Geldermann & Lerche 2014). Abschließend erfolgt eine Sensitivitätsanalyse, bei der die Gewichtung der Zielgrößen w_z variiert werden, sodass resultierende Insensitivitätsintervalle abgeleitet und dargestellt werden können. Diese geben an, in welchem Rahmen die Gewichtung einer Zielgröße ausgehend von dem ursprünglich gewählten Wert verändert werden kann, ohne dass sich die ursprünglich ermittelte Rangfolge ändert.

Insgesamt erfolgt somit ein "Trade-off" zwischen den entsprechend der Präferenzfunktion geeigneten Bestellpolitiken und ihrer Kriterienerfüllung in den untersuchten Szenarien sowie eine Bewertung dieser hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber Präferenzänderungen der Zielgrößen. Darüber hinaus kann bei einer Veränderung der äußeren Umstände, z. B. hinsichtlich des Stückzahlenszenarios szs oder der Werkstattanbindung wka , eine Veränderung der geeigneten Bestellpolitik gegeben der anwendungsspezifischen Präferenzen erfolgen.

6 Erprobung des Lösungsansatzes

Die exemplarische Validierung der in Kapitel 5 vorgestellten Methode zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) für die Optimierung der Materialbedarfsplanung (MRP) von Neukomponenten im Remanufacturing erfolgt anhand eines beispielhaften Anwendungsfalls aus dem Automotive Aftermarket (AA). Die Ergebnisse der Validierung wurden im Rahmen des von der EU geförderten *Horizon 2020*-Projekts DigiPrime (Fördernummer 873111) erarbeitet. Der AA eignet sich dabei insbesondere, da dieser ca. zwei Drittel des weltweiten Umsatzvolumens im Remanufacturing ausmacht und eine effizient gestaltete RL einen positiven Effekt auf Remanufacturing-Entscheidungen hat (Steinhilper & Weiland 2015, S. 771, Subramoniam & Huisingsh et al. 2009, S. 1167). Gleichzeitig herrscht im Remanufacturing von automobilen Komponenten ein hoher Wettbewerbs- und somit Preisdruck (Breitschwerdt & Cornet et al. 2017, S. 22, Sundin & Dunbäck 2013, S. 6). Zudem werden die mit der MRP verbundenen Entscheidungen zu ca. 75 % subjektiv und manuell getroffen, ohne leistungsfähige Entscheidungsunterstützungssysteme heranzuziehen, was ein hohes Optimierungspotential vermuten lässt (Subramoniam & Huisingsh et al. 2009, S. 1167).

Aufgrund der hohen Komplexität im AA sowie einer begrenzten Datenverfügbarkeit, erfolgt im Rahmen der Beschreibungsmodelle zunächst eine detaillierte Vorstellung des Anwendungsfalls sowie eine Abstraktion bzw. Fokussierung auf ausgewählte Aspekte (vgl. Kapitel 6.1-6.3). Aufbauend darauf werden in Kapitel 6.4 die Ergebnisse des Analysemodells und somit der simulationsbasierten Optimierung der Wirkzusammenhänge zwischen einem erhöhten Informationsaustausch in der RL und der MRP vorgestellt. Abschließend stellt Kapitel 6.5 die Ableitung von Handlungsempfehlungen vor.

6.1 Modellierung des Materialflusses

Die der exemplarischen Validierung zugrundeliegende RL bildet die Aufarbeitung von mechanischen und elektronischen Produkten unterschiedlicher Hersteller und Varianten aus der automobilen Anwendung in der EU ab. Die RL besteht dabei aus den in einer automobilen RL relevanten Stufen bzw. Stakeholdern (vgl. Kalverkamp & Raabe 2018) und fokussiert sich auf ausgewählte und abstrahierte Aspekte. Analog zu Kapitel 5.1 steht dabei zunächst die Rückführung von Cores aus unabhängigen oder markengebundenen Werkstätten im Fokus. Aufgrund der Tatsache, dass alleine in Deutschland im Jahr 2021 36.570 Kfz-Werkstätten existierten¹ und diese Zahl auf Europa hochgerechnet das Maß an handhabbarer Komplexität in der Modellierung weit übersteigt, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit folgendes Abstraktion gewählt: Die EU unterteilt die geographischen Gebiete ihrer Mitgliedstaaten in sog.

¹<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168124/umfrage/anzahl-der-betriebe-im-kfz-handwerk-in-deutschland/> [14.03.2023].

NUTS-Regionen, die ein hierarchisches System zur Untergliederung der Wirtschaftsräume der EU darstellen (Eurostat 2023). Diese Klassifikation wird in vier Hierarchieebenen (NUTS 0 bis NUTS 3) unterteilt, wobei eine höhere Zahl eine feinere Untergliederung darstellt. Dabei entsprechen NUTS 0-Regionen den Grenzen der Nationalstaaten der EU. In Abstimmung mit beteiligten Experten aus dem AA haben sich dabei NUTS 2-Regionen als vielversprechendste Abstraktionsebene herausgestellt. Diese enthalten i. d. R. zwischen 800.000 und 3 Mio. Einwohnern, womit sich in Summe 242 NUTS 2-Regionen für das EU-Gebiet ergeben (ohne Großbritannien, Schweiz, Norwegen). Aufgrund ihrer geographischen Lage werden zwölf Regionen (u. a. Malta, Zypern, kanarische Inseln, Französisch-Guayana) hiervon nicht weiter berücksichtigt, wodurch sich 230 relevante NUTS 2-Regionen ergeben. Aufgrund der näherungsweise gleichverteilten Einwohneranzahl in den NUTS 2-Regionen können auch die Stückzahlen anfallender Cores geographisch gleichverteilt angenommen werden (vgl. Kapitel 6.3). In der betrachteten RL werden die geographischen Zentren dieser Regionen stellvertretend als Werkstätten $wk \in WK$ modelliert. Tabelle 6.1 stellt diese beispielhaft dar, Anhang A6.1-A6.2 zeigt die vollständigen Daten hierzu. In diesem Schritt erfolgt außerdem die Überführung der geographischen Koordinaten (Breiten- bzw. Längengrad) in ein zugrunde gelegtes Koordinatensystem. Entsprechend Kapitel 5.1 führt jede modellierte Werkstatt die gleichen Prozessschritte durch, die je nach Szenario des Informationsaustauschs erweitert werden können. Unter der Annahme hinreichend großer Lagerflächen wird in regelmäßigen Abständen ein Transport $trans \in Trans$ ausgelöst, der die angefallenen Cores von den Werkstätten abholt.

Tabelle 6.1: Beispielhafte Modellierung der Werkstätten anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen.

Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	Breitengrad	Längengrad	x-Koordinate	y-Koordinate
wk_1	DE30	Deutschland	52.5164	13.3777	584	449
wk_2	FR10	Frankreich	48.8584	2.2945	334	535
wk_3	ES30	Spanien	40.4189	-3.6919	191	726
wk_4	IT14	Italien	41.8931	12.4828	571	693
...

Nachdem die Cores an den Werkstätten eingesammelt wurden, werden sie zu Sammelstandorten transportiert. Zur Modellierung der Sammelstandorte wird auf das existierende Netzwerk eines im Forschungsprojekt beteiligten Industriepartners zurückgegriffen. Das aus weltweit insgesamt 21 Sammelstandorten bestehende Netzwerk wird dabei auf Europa beschränkt, woraus sich 18 relevante Sammelstandorte $sast \in SaSt$ ergeben, die in der betrachteten RL mithilfe ihrer Koordinaten modelliert werden (vgl. Anhang A6.3). Konform zu Kapitel 5.1 werden dabei die durchzuführenden Prozessschritte an den Sammelstand-

orten abstrahiert und homogen modelliert, d. h. jeder Sammelstandort führt die gleichen Prozessschritte durch. Je nach Szenario des Informationsaustauschs können auch hier die durchzuführenden Prozessschritte um die Qualitätsbeurteilung, und damit die Informationsaufnahme und -weitergabe, erweitert werden. Analog zu den modellierten Werkstätten wird auch an den Sammelstandorten eine hinreichend große Lagerfläche angenommen. Aufgrund der Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf OER-Unternehmen stellt der Prozessschritt der *Sortierung* sicher, dass die betrachteten Produkte entsprechend ihres Originalherstellers zugeordnet und entsprechend weiter transportiert werden.

Zur Darstellung einer möglichst realitätsnahen Komplexität werden abschließend die Remanufacturing-Standorte von drei OERs modelliert, wobei ebenfalls auf die existierenden Standorte der beteiligten Industriepartner zurückgegriffen wird (vgl. Anhang A6.3). Die an den Remanufacturing-Standorten $rest \in ReSt$ modellierten Prozessschritte sind dabei entsprechend Kapitel 5.1 abstrahiert und auf die relevanten Prozessschritte fokussiert. Darüber hinaus findet an dieser Stelle die Entkopplung zwischen *Push*- und *Pull*-Strategie statt, indem demontierte Komponenten eingelagert und nur bei Bedarf der Aufarbeitung bzw. den nachfolgenden Prozessschritten zugeführt werden. Die Dimensionierung der Puffer zwischen den Prozessschritten im Rahmen der *Pull*-Strategie wurde in Expertenworkshops validiert.

Abschließend erfolgt im Rahmen der Modellierung des Materialflusses die Einbeziehung interner und externer Lieferanten. Hierzu wird im vorliegenden Anwendungsfall vereinfachend angenommen, dass nur ein Lieferant $l \in L$ existiert, der jederzeit alle nachgefragten Komponenten bzw. Produkte zu den gleichen Konditionen an alle OERs anbietet (vgl. Anhang A6.3). Die resultierenden Lieferzeiten werden ebenso wie ggfs. anfallende Mindestbestellmengen je Komponente berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.3).

6.2 Modellierung des Informationsaustauschs

Neben der Modellierung des Materialflusses ist im vorliegenden Anwendungsfall insbesondere der Informationsaustausch sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Informationsarten und -ausprägungen relevant. Wie in Kapitel 5.2 identifiziert, sind insbesondere die *qualitätsrelevanten Informationen* hinsichtlich Kilometerstand, Fehlercode(s) sowie der allgemeinen Qualität für die Bestimmung der dynamischen, komponentenspezifischen Regenerationsrate $R_{dym, kom}$ relevant. Die spezifischen Ausprägungen dieser Informationsarten werden in verschiedene Klassen eingeteilt, wobei im vorliegenden Anwendungsfall der Kilometerstand und die allgemeine Qualität in drei Klassen (Hoch, Mittel, Niedrig) und die aufgenommenen Fehlercodes in fünf Klassen (A, B, C, D, E) eingeteilt werden. Die Grenzen der verschiedenen Klassen, z. B. ab welchem Kilometerstand ein Core in die Klasse "Hoch" eingeteilt wird, sind dabei anwendungsspezifisch unterschiedlich und für die Erprobung nicht relevant. Zur

vollständigen Modellierung des Informationsaustausch sind sowohl die *Auswirkungen* der unterschiedlichen Informationsarten und -ausprägungen $\varphi_{i,co}$ mit $i \in km, Q, F$ als auch die Auftrittswahrscheinlichkeiten bzw. *Häufigkeiten* der unterschiedlichen Informationsausprägungen relevant. Aufgrund der Neuheit der entwickelten Methode liegen jedoch hierzu keine ausreichenden Realdaten vor. Daher wurden einerseits für die *Auswirkungen* fünf Optionen in Expertenworkshops ermittelt, in denen der Einfluss auf die dynamische Regenerationsrate $\varphi_{i,co}$ geschätzt wurde (vgl. Tabelle 6.2). Gemäß Tabelle 5.3 stellen diese fünf Optionen die Ausprägungen der entsprechenden Steuerfaktoren $\varphi_{km,co}$, $\varphi_{Q,co}$ und $\varphi_{F,co}$ mit zugehörigen Auftrittswahrscheinlichkeiten dar. Entsprechend Formel 5.1 wird somit mit Hilfe von $\varphi_{i,co}$ die instanzindividuelle dynamische Regenerationsrate, in Abhängigkeit der aufgenommenen Information des Cores co und der Informationssensitivität der Komponente IS_{kom} , bestimmt. Zur Ermittlung der prozentualen *Häufigkeiten* unterschiedlicher Informationsausprägungen je Option wurde in Anlehnung an Zikopoulos (2017) eine Beta-Binomialverteilung angenommen. Durch die Veränderung der zwei Parameter der Beta-Binomialverteilung, α und β , können dabei unterschiedliche, links- oder rechtsschiefe diskrete Verteilungsfunktionen generiert werden, wobei z. B. für $\alpha = \beta = 1$ eine Gleichverteilung entsteht. Die resultierenden Häufigkeiten wurden analog zu den Auswirkungen in Expertenworkshops validiert. Anhang A7.1 stellt eine Kurvenschar der Beta-Binomialverteilung zur Übersicht sowie die konkret verwendeten Parameter und resultierende Auftrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Informationsausprägungen in den unterschiedlichen Optionen dar.

Tabelle 6.2: Auswirkungen und Häufigkeitsverteilung verschiedener Informationsarten und -ausprägungen auf die dynamische Regenerationsrate der Komponenten $R_{dym,kom}$ für verschiedene Optionen.

Eigenschaft	Ausprägung	Option 1		Option 2		Option 3		Option 4		Option 5	
		φ_i	Häufigkeit [%]	$\varphi_i$	Häufigkeit [%]	$\varphi_i$	Häufigkeit [%]	$\varphi_i$	Häufigkeit [%]	$\varphi_i$	Häufigkeit [%]
Kilometerstand	Hoch	0,5	40	0,75	40	0,5	40	1	40	0,25	40
	Mittel	0,75	35	1	35	1	35	1,25	35	0,5	35
	Niedrig	1	25	1,25	25	1,5	25	1,5	25	0,75	25
Qualität	Hoch	1,5	25	1,75	25	2	30	2	33,3	2	25
	Mittel	1	50	1	50	1	40	1	33,3	1	50
	Niedrig	0,25	25	0,75	25	0,5	30	0,5	33,3	0,5	25
Fehlercode	A	0	5	0	5	0	27,5	0	10	0	5
	B	0,1	10	0,25	10	0,25	15	0,25	15	0,5	10
	C	0,25	20	0,5	20	0,5	15	0,5	20	0,75	20
	D	0,5	25	0,75	25	0,75	15	0,75	25	0,9	25
	E	1	40	1	40	1	27,5	1	30	1	40

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, können die Informationen an unterschiedlichen Standorten bzw. Stufen in der RL aufgenommen werden. Dabei werden im Anwendungsfall neben den für die Berechnung der dynamischen Regenerationsrate relevanten Informationen hinsicht-

lich Kilometerstand und Fehlercode(s) zusätzlich noch die VIN und Produktnummer in den Werkstätten aufgenommen, während die allgemeine Qualitätseinschätzung an den Sammelstandorten vorgenommen wird. Ob die modellierten Werkstätten und Sammelstandorte die Informationen jedoch auch tatsächlich aufnehmen und an den Informationsagenten zur Verarbeitung weitergeben, hängt vom untersuchten InformationsaustauschszENARIO ab. Dabei wird im Rahmen der Erprobung zwischen den folgenden drei Szenarien unterschieden:

1. **Kein Informationsaustausch:** Es werden weder in den Werkstätten, noch an den Sammelstandorten Informationen aufgenommen bzw. weitergegeben. Die Qualitätsbeurteilung der Cores findet erst am Remanufacturing-Standort statt, wobei relevante Informationen zur Beurteilung (z. B. Kilometerstand) zu diesem Zeitpunkt nicht mehr aufgenommen werden können. Es erfolgt keine Anpassung der Regenerationsrate, da Informationen hierzu nicht vorhanden sind.
2. **Teilweiser Informationsaustausch:** In den Werkstätten werden keine Informationen erhoben. Die Sammelstandorte nehmen jedoch Informationen hinsichtlich der allgemeinen Qualität der Cores auf und stellen diese über den Informationsagenten dem Remanufacturing-Standort bzw. der MRP zur Verfügung. Der Prozessschritt der Eingangsdiagnose am Remanufacturing-Standort kann somit übersprungen werden, da die Cores bereits identifiziert und bekannt sind. Die dynamische Regenerationsrate kann angepasst werden, sobald die Qualität der Cores an den Sammelstandorten aufgenommen wurde.
3. **Vollständiger Informationsaustausch:** Sowohl an den Werkstätten, als auch an den Sammelstandorten werden alle Informationen aufgenommen, sodass der gesamte Informationsvektor \vec{i} je Core bekannt ist. Die Informationen werden sofort nach ihrer Aufnahme an den Informationsagenten weitergeleitet, sodass die dynamische Regenerationsrate angepasst werden kann. Darüber hinaus können anwendungsspezifische Regeln zum frühzeitigen Ausschleusen von Cores definiert werden (z. B. Cores mit dem Fehlercode A oder bei Überschreiten eines Schwellwerts bzgl. Kilometerstand). Jedoch ist ein vollständiger und sofortiger Anschluss aller Werkstätten in Europa an ein gemeinsames Informationssystem aufgrund deren Menge und weiterer Herausforderungen (z. B. unterschiedliche Voraussetzungen) sehr komplex und somit in der Realität schwierig umsetzbar (vgl. Kapitel 6.1). Daher gibt es im Szenario des vollständigen Informationsaustauschs weiterhin die Möglichkeit, den Grad der Werkstättenbindung $q_{wk} \in [0, 1]$ einzustellen, der den Anteil der Werkstätten angibt, die Informationen zu Cores aufnehmen und weitergeben. Neben einer realitätsnäheren Betrachtung kann somit zudem analysiert werden, ob es Schwellwerte gibt, ab denen z. B. eine weitere

Anbindung von Werkstätten nicht mehr sinnvoll erscheint. In der vorliegenden Erprobung wurde die Werkstattanbindung in Schritten von 10 % variiert.

6.3 Modellierung der Materialbedarfsplanung

Im letzten Schritt der Beschreibungsmodelle wird die Modellierung der MRP im vorliegenden Anwendungsfall beschrieben. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die MRP von notwendigen Neukomponenten für das Remanufacturing. Hierzu ist insbesondere die Einbeziehung der zugrundeliegenden Produktstruktur sowie eine entsprechende Modellierung notwendig (vgl. Kapitel 3.1). Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, ist der untersuchte Anwendungsfall im AA angesiedelt und untersucht die Rückführung und Aufarbeitung mechatronischer und elektronischer Produkte aus der automobilen Anwendung aus Sicht von OER-Unternehmen. Auf Basis vorliegender Materiallisten und Erfahrungswerte hinsichtlich der Regenerationsrate einzelner Komponenten erfolgt somit die Modellierung der Produktstruktur. Tabelle 6.3 zeigt einen beispielhaften und anonymisierten Ausschnitt dieser Modellierung. Neben der statischen Regenerationsrate ist dabei insbesondere die Anzahl verbauter bzw. benötigter Komponenten je Produkt für die MRP relevant. Dabei liegt der Fokus der Produktmodellierung auf Komponenten, für die einerseits der Aufwand einer dedizierten MRP gerechtfertigt werden kann (z. B. keine C-Teile) und die andererseits eine statische Regenerationsrate in dem Intervall $(0, 1)$ besitzen.

Tabelle 6.3: Beispielhafte Modellierung der Produktstruktur im Anwendungsfall.

Produkt ID	Komponente ID	Komponente Name	Anzahl	Statische Regenerationsrate
1	1.1	Gehäuse	1	0,96
	1.2	Magnetschalter	2	0,88

2	2.1	Antrieb	1	0,12
	2.2	Getriebedeckel	1	0,92

...

Neben der Produktstruktur ist das Verhältnis zwischen dem Core-Rückfluss und der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten entscheidend für die MRP. Bei einem höheren Core-Rückfluss stehen z. B. tendenziell mehr Komponenten zur Verfügung, die wiederverwendet werden können, während bei einer höheren Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten tendenziell mehr Neukomponenten bestellt werden müssen. In der vorgestellten Methode werden insbesondere das zeitlich verteilte Auftreten von Cores sowie die räumlich verteilten

Akteure berücksichtigt. Östlin (2008) identifiziert in seiner Arbeit den potentiellen Absatz im Remanufacturing in Abhängigkeit der Lebenszyklusphasen des ursprünglichen Neuprodukts. In Anlehnung daran werden im vorliegenden Anwendungsfall drei Stückzahlenszenarien untersucht, die die drei Phasen widerspiegeln, in denen das Verhältnis des Core-Rückflusses und der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten variiert. In der ersten Phase, dem *Nachfrageüberschuss* ist somit der Core-Rückfluss deutlich geringer als die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten, da sich das betrachtete Neuprodukt im Primärmarkt noch in der Wachstums- bzw. Reifephase befindet. Basierend auf historischen Daten von bereits im Remanufacturing-Portfolio etablierten Produkten werden in dieser Phase 15.000-20.000 Cores und 55.000-60.000 Nachfragen nach aufgearbeiteten Produkten pro Jahr für alle betrachteten Remanufacturing-Standorte generiert. In der zweiten Phase sind Core-Rückfluss, d. h. das Angebot an Cores, und die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten ausgeglichen, es existiert somit ein *Nachfrage-Angebot-Matching*. Analog werden basierend auf historischen Daten jeweils 25.000-30.000 Cores und Nachfragen nach aufgearbeiteten Produkten pro Jahr generiert. Zuletzt untersucht die dritte Phase eine zurückgehende Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten bei gleichzeitig steigendem Core-Rückfluss, d. h. einen *Core-Überschuss*. In dieser Phase ist das Verhältnis von Cores zur Nachfrage umgekehrt zur ersten Phase, es werden somit ca. 55.000-60.000 Cores und 15.000-20.000 Nachfragen nach aufgearbeiteten Produkten pro Jahr generiert. Durch die ganzheitliche Betrachtung dieser drei Szenarien wird sichergestellt, dass die in der Praxis auftretenden Unsicherheiten bzgl. des Core-Rückflusses und der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten adäquat berücksichtigt werden. Abbildung 6.1 zeigt die untersuchten Stückzahlenszenarien. Anhang A8.1 stellt die resultierenden Histogramme für die drei Stückzahlenszenarien sowie die verwendeten Parameter der Exponentialverteilung λ_{CO} der Cores bzw. $\lambda_{D_{rpro}}$ der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten im Detail dar.

Neben der erläuterten zeitlichen Verteilung von Angebots- und Nachfragemengen ist die räumliche Verteilung dieser relevant. Durch die in Kapitel 6.1 erläuterte Modellierung des Materialflusses mit Hilfe der NUTS 2-Regionen, welche eine annähernd gleichverteilte Bevölkerungsanzahl haben, können somit auch die anfallenden Core-Rückflüsse über die NUTS 2-Regionen gleichverteilt werden. Damit ergibt sich für jeden Core die seiner Region zugehörige Entfernung zum nächstgelegenen Sammelstandort, wodurch sich individuelle Transportzeiten ergeben und diesbezügliche Unsicherheiten berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten wird lediglich die zeitliche Verteilung modelliert, wohingegen die räumliche Verteilung vernachlässigt wird.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird hinsichtlich der MRP je untersuchtem Szenario eine einheitliche Bestellpolitik für alle modellierten Produkte bzw. deren Komponenten

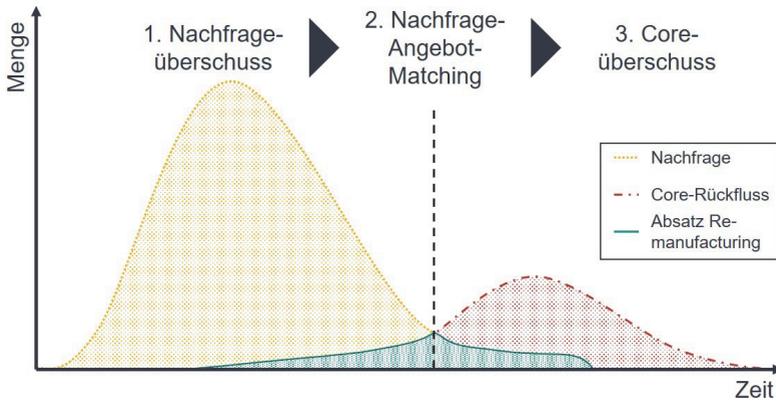


Abbildung 6.1: Untersuchte Stückzahlenszenarien hinsichtlich Core-Rückfluss und Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten, in Anlehnung an Östlin 2008.

verwendet (vgl. Kapitel 5.3.2). Die spezifischen Parameter der entsprechend gewählten Bestellpolitik werden jedoch komponentenspezifisch erst zur Laufzeit bestimmt und dynamisch an die vorhandenen Informationen angepasst. Aufgrund der Fokussierung der Produktmodellierung auf relevante Komponenten soll somit der Übertrag des entwickelten Konzepts in die Anwendung möglichst einfach gestaltet werden.

Zusammenfassend stellt Tabelle 6.4 die untersuchten Steuerfaktoren sowie in Ergänzung zu Tabelle 5.3 zusätzlich die jeweiligen Ausprägungen dar. Hinsichtlich der Ausprägungen des Informationsvektors \vec{i} liegt der Schwerpunkt der Experimente dabei auf einem variierenden Informationsvektor (vl, vgl. Kapitel 6.4 und Anhang A9.1). Weiterhin werden neben den bereits vorgestellten Ausprägungen hinsichtlich der Stückzahlenszenarien szs , des Informationsaustauschs ia , der Werkstattanbindung wka , und der Bestellpolitik bp zusätzlich der Einfluss der *qualitätsrelevanten* Informationen Kilometerstand, Fehlercode und Qualität auf die Regenerationsrate der Komponenten $\varphi_{i,co}$ variiert (vgl. Tabelle 6.2). Um den Einfluss verschiedener komponentenspezifischer Eigenschaften hinsichtlich des Komponentenvektors \vec{k} auf die MRP zu untersuchen, werden außerdem der Ziellagerbestand S_{kom} und Meldebestand s_{kom} , sowie die Informationssensitivität IS_{kom} variiert. Zusätzlich ist einerseits die Halbierung der Mindestbestellmenge $q_{min,kom}$ durch die Ersetzung des externen Lieferanten mit internen Lieferanten und andererseits die Verdopplung der Mindestbestellmenge durch den Wechsel auf einen neuen, externen Lieferanten Untersuchungsgegenstand. Hinsichtlich der Lieferzeit τ_{kom} hingegen wurde eine Verdopplung bzw. Vervielfachung der ursprünglich identifizierten Lieferzeit je Komponente als Konsequenz aus Lieferverzögerungen oder der Abkündigung

von zu alten Komponenten als zu untersuchendes Szenario identifiziert. Abschließend wird die ursprüngliche statische Regenerationsrate $R_{stat,kom}$ und die Wartezeit des Kunden $w_{D_{rpro}}$ bzw. das Lieferzeitversprechen des fokalen Remanufacturing-Unternehmens in den angegebenen Ausprägungen variiert. Wenn diese Wartezeit durch einen Kunden überschritten wird, ohne dass die Nachfrage durch ein aufgearbeitetes Produkt bedient wurde, wird stattdessen ein Neuprodukt mit höheren Kosten zugeteilt sowie entsprechende Strafkosten berechnet. Dabei wird neben der Option einer 7-tägigen Wartezeit außerdem eine Verkürzung auf vier sowie eine Verlängerung auf 14 Tage untersucht.

Tabelle 6.4: Ausprägungen der Steuerfaktoren (A_Förster 2023).

Steuerfaktor	Ausprägungen
Ausprägungen des Informationsvektors \vec{t}	variierend, konstant, Benchmark
Stückzahlenszenario szs	Coreüberschuss, Nachfrage-Angebot-Matching, Nachfrageüberschuss
Informationsaustausch ia	kein, teilweise, vollständig
Werkstättenbindung wka	10, 20, ..., 100
Bestellpolitik bp	(s,q), (t,q), (s,S), (t,S), Silver-Meal, Wagner-Whitin
Einfluss Kilometerstand auf RR $\varphi_{km,co}$	s. Tabelle 6.2
Einfluss Fehlercode auf RR $\varphi_{F,co}$	s. Tabelle 6.2
Einfluss Qualität auf RR $\varphi_{Q,co}$	s. Tabelle 6.2
Ziellagerbestand s_{kom}	$\frac{s_{kom}}{2}$, s_{kom} , $2 \cdot s_{kom}$
Meldebestand s_{kom}	$\frac{s_{kom}}{2}$, s_{kom} , $2 \cdot s_{kom}$
Informationssensitivität IS_{kom}	$0,8 \cdot IS_{kom}$, IS_{kom} , $1,2 \cdot IS_{kom}$
Mindestbestellmenge $q_{min,kom}$	$\frac{q_{min,kom}}{2}$, $q_{min,kom}$, $2 \cdot q_{min,kom}$
Lieferzeit τ_{kom}	τ_{kom} , $2 \cdot \tau_{kom}$, $4 \cdot \tau_{kom}$
Statische Regenerationsrate $R_{stat,kom}$	$0,8 \cdot R_{stat,kom}$, $R_{stat,kom}$, $1,2 \cdot R_{stat,kom}$
Wartezeit des Kunden $w_{D_{rpro}}$	4 Tage, 7 Tage, 14 Tage

6.4 Simulationsbasierte Optimierung im Anwendungsfall

Analog zu Kapitel 5 wird die für die exemplarische Erprobung herangezogene RL im Rahmen der Analysemodelle zunächst in das in AnyLogic 8.8.0 © implementierte simulationsbasierte Optimierungsmodell überführt. Zur Sicherstellung der korrekten und hinreichend genauen Abbildung des simulationsbasierten Optimierungsmodells findet vor der Analyse der Wirkzusammenhänge zunächst eine Validierung statt. Dabei werden sowohl die gewählten Inputdaten (vgl. Kapitel 6.1-6.3) sowie die implementierten Module auf ihre Plausibilität und Richtigkeit hin überprüft. Neben einer Validierung in verschiedenen Workshops mit Industriepartnern findet darüber hinaus eine Überprüfung anhand von Literatur statt (vgl. A_Nilles 2022, A_Förster 2023). Darüber hinaus werden die aus dem Modell resultierenden Verhält-

nisse zwischen den Kosten von aufgearbeiteten und Neuprodukten sowie zwischen den Kostenbestandteilen (z. B. MRP-, Transport-, Prozesskosten) abgeglichen (vgl. Ferguson & Guide et al. 2009; Zikopoulos 2017).

Nachdem das simulationsbasierte Optimierungsmodell sowie die darin abgebildeten Prozesse als valide angenommen werden können, erfolgt die Versuchsdurchführung entsprechend der Ausführungen aus Kapitel 5.4.4. Wie erwähnt, wird hierzu eine Kombination aus raumfüllendem und individuellem Versuchsdesign gewählt. Dabei bilden 810 aus dem *Latin-Hypercube-Design* generierte Läufe die Grundlage, die jeweils zehn Mal repliziert werden (Law 2017). Die jeweilige Verteilung der Versuche auf die Ausprägungen des Informationsvektors \vec{i} , die Stückzahlenszenarien szs , den Informationsaustausch ia , die Werkstattanbindung wka , die Bestellpolitik bp , sowie die weiteren Steuerfaktoren ist in Anhang A9.1 zusammengefasst. Der Untersuchungszeitraum wurde auf 250 Tage gesetzt, um einen der taktisch-operativen MRP angemessenen Rahmen zu untersuchen. Die Einschwingphase von 50 Tagen wurde für die Auswertung jeweils abgeschnitten.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung werden die Ergebnisse gemäß des entwickelten Kennzahlensystems (vgl. Kapitel 5.3.3) ausgewertet. Analog zu Kapitel 5.4.4 erfolgt auch die Vorstellung der Ergebnisse im Folgenden entsprechend der eingeführten Ausprägungen des Informationsvektors. Der Fokus liegt dabei auf den Ergebnissen des variierenden Informationsvektors \vec{i} (vl, s. Kapitel 6.4.1). Kapitel 6.4.2 präsentiert anschließend die Ergebnisse der Benchmark-Läufe und Kapitel 6.4.3 die des konstanten Informationsvektors \vec{i} (kl).

6.4.1 Variierender Informationsvektor

Im Szenario vl werden die produktspezifischen Informationen der Cores, die durch den Informationsvektor \vec{i} definiert sind, zufällig zur Laufzeit der simulationsbasierten Optimierung innerhalb vorgegebener Grenzen generiert, wodurch das Durchschnittsverhalten eines realen Systems untersucht wird. Um zunächst einen deskriptiven Überblick über die Ergebnisse für die fünf Bestellpolitiken bp in den drei Stückzahlenszenarien szs zu gewinnen, stellt Tabelle 6.5 die prozentuale Verbesserung der vier Kennzahlen Gesamtkosten C_{ges} , Liefertreue LT , CO₂-Belastung U_{co} sowie Aufarbeitungsquote AQ eines vollständigen Informationsaustauschs ia mit 100 % Werkstattanbindung wka im Vergleich zu keinem Informationsaustausch mit 0 % Werkstattanbindung dar. Zu beachten ist dabei, dass ein negatives Vorzeichen bei den Kennzahlen der Gesamtkosten sowie der CO₂-Belastung einen positiven Effekt darstellen, da hierfür eine Minimierung angestrebt wird, während es sich bei den Kennzahlen der Liefertreue und der Aufarbeitungsquote umgekehrt verhält, da eine Maximierung dieser Kennzahlen erstrebenswert ist. Wie in der Tabelle ersichtlich wird, können durch jede Bestellpolitik in fast jeder Kennzahl und jedem Stückzahlenszenario Verbesserungen durch einen vollständigen

Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung erreicht werden. Mit durchschnittlichen Kosteneinsparungen von 13,10 % und einer Reduktion der CO₂-Belastung von 40,72 %, sowie einer durchschnittlichen Steigerung der Liefertreue um 3,60 % und der Aufarbeitungsquote um 4,35 % über alle Stückzahlenszenarien *szs* und Bestellpolitiken *bp* hinweg, ergibt sich dabei eindeutig, dass die zu Beginn der vorliegenden Arbeit aufgestellte Hypothese hinsichtlich der Existenz von Wirkzusammenhängen zwischen einem erhöhten Informationsaustausch in der RL und der MRP für das Remanufacturing angenommen werden kann.

Tabelle 6.5: Prozentuale Verbesserung der untersuchten Kennzahlen eines vollständigen Informationsaustauschs mit 100 % Werkstattanbindung im Vergleich zu keinem Informationsaustausch mit 0 % Werkstattanbindung.

Δ (kein – 0%, vollst. – 100 %)	(s,q)	(s,S)	SM	(t,q)	(t,S)	Durchschnitt [%]
Nachfrageüberschuss [%]						
C_{ges}	-4,84	-6,55	-22,51	-14,28	-1,98	-10,03
LT	0,38	2,09	20,87	10,09	-1,55	6,38
U_{co}	-34,96	-34,21	-37,07	-35,60	-34,35	-35,24
AQ	0,56	2,87	18,01	9,90	-1,04	6,06
Nachfrage-Angebot-Matching [%]						
C_{ges}	-8,47	-9,49	-17,02	-10,92	-8,79	-10,93
LT	1,43	1,69	7,87	2,81	1,02	2,97
U_{co}	-33,73	-34,15	-34,03	-33,83	-34,28	-34,00
AQ	2,42	2,66	8,14	4,36	1,74	3,87
Coreüberschuss [%]						
C_{ges}	-18,31	-16,24	-24,85	-15,03	-17,23	-15,78
LT	1,75	0	4,50	-0,18	1,37	1,47
U_{co}	-52,85	-52,36	-53,47	-52,75	-53,23	-52,93
AQ	3,58	1,49	6,21	1,56	2,82	3,13
Durchschnitt [%]						
C_{ges}	-10,54	-10,75	-21,46	-13,41	-9,33	-13,10
LT	1,19	1,23	11,08	4,24	0,28	3,60
U_{co}	-40,51	-40,24	-41,52	-40,73	-40,62	-40,72
AQ	2,19	2,34	10,79	5,27	1,17	4,35

Da die dargestellten prozentualen Verbesserungen noch keine Aussage über die absolute Leistung der verschiedenen Bestellpolitiken *bp* in den untersuchten Stückzahlenszenarien *szs* zulässt, werden die dargestellten Kennzahlen im Folgenden im Detail untersucht. Entsprechend des entwickelten Kennzahlensystems (vgl. Kapitel 5.3.3) erfolgt zunächst die Auswertung der Gesamtkosten C_{ges} . Abbildung 6.2 zeigt für das Stückzahlenszenario Nachfrage-Angebot-Matching die Veränderung der durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt bei keinem Informationsaustausch mit 0 % Werkstattanbindung im Vergleich zum vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung aufgeteilt nach den einzelnen Kostenbestandteilen. Wie zuvor dargestellt, können die durchschnittlichen operativen Gesamtkosten in diesem Stückzahlenszenario um 10,93 % reduziert werden. Die größten Ersparnisse ergeben sich dabei durch die Reduktion der Transport- (34,00 %) und Strafkosten (11,80 %), da

einerseits unnötige Transporte vermieden werden und andererseits die Liefertreue aufgrund des Informationsaustauschs besser eingehalten und somit Strafkosten reduziert werden können. Auffällig ist hierbei insbesondere die SM-Politik, die bei den Strafkosten Ersparnisse von 30 % ermöglicht. Auch die Kosten für das Remanufacturing selbst sinken leicht um 1,06 %. Demgegenüber stehen zwar erhöhte Kosten für die Beschaffung (0,37 %) sowie für den Informationsaustausch (146,02 %). Da aber insbesondere letztere absolut gesehen keinen großen Einfluss haben, ist die Steigerung dieser Kostenbestandteile auf die Gesamtkosten betrachtet unerheblich. Absolut betrachtet führt die SM-Politik bei einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstatthanbindung mit durchschnittlich 74,44 Euro je Produkt zu den geringsten Kosten, erreicht allerdings im entgegengesetzten Fall, d. h. ohne Informationsaustausch, mit 89,71 Euro auch die höchsten Kosten.

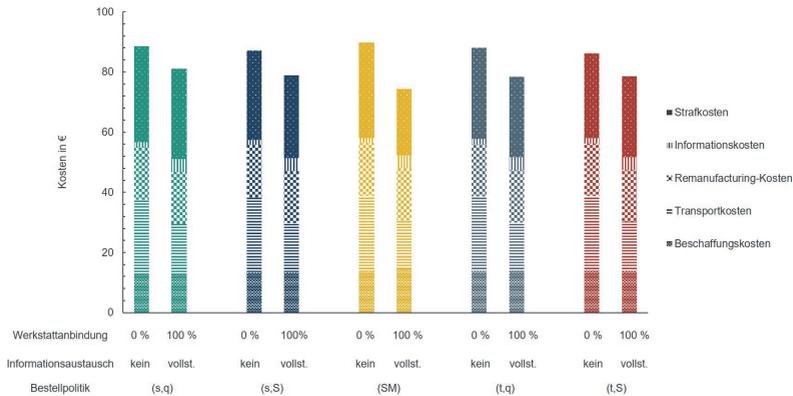


Abbildung 6.2: Veränderung der durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt im Vergleich von keinem zum vollständigen Informationsaustausch für das Stückzahlscenario Nachfrage-Angebot-Matching.

Bislang erfolgte lediglich die Untersuchung des Stückzahlscenario Nachfrage-Angebot-Matching. Die Reduktion der Gesamtkosten ist jedoch für alle Bestellpolitiken bp und in jedem Stückzahlscenario szs zu erkennen (vgl. Abbildung 6.3). Die dargestellten Heatmaps zeigen die durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt, wobei rote Bereiche mit hohen und grüne Bereiche mit geringen Kosten assoziiert sind. Zu beachten ist, dass jede Heatmap ihre eigene Skala hat, da die absoluten Gesamtkosten je Produkt in den Stückzahlscenario in unterschiedlichen Größenordnungen liegen und nur durch eine individuelle Skala eine Vergleichbarkeit der Bestellpolitiken bp innerhalb der Stückzahlscenario möglich ist. Dies gilt ebenso für die im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellten Heatmaps.

Bei genauerer Betrachtung führen alle Bestellpolitiken bp in allen Stückzahlenszenarien szs bei einem höheren Informationsaustausch zu geringeren Gesamtkosten C_{ges} im Vergleich zu keinem Informationsaustausch. Das Einsparpotential ist bei der SM-Politik mit 21,46 % am höchsten, während es bei der (t,S)-Politik mit 9,33 % am geringsten ist. Im Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.3, links) können die (t,S)- und (s,S)-Bestellpolitiken, die bei jeder Bestellung den Lagerbestand auf den Ziellagerbestand S auffüllen, bereits bei keinem Informationsaustausch bzw. einer niedrigen Werkstattanbindung geringe Gesamtkosten von 157,98 bzw. 162,97 Euro vorweisen. Dieser Trend setzt sich mit steigendem Informationsaustausch fort, sodass die (t,S)- bzw. (s,S)-Politiken bei 100 % Werkstattanbindung durchschnittliche Gesamtkosten je Produkt von 154,86 bzw. 152,29 Euro erreicht. Die (s,q)-Politik zeigt dagegen erst bei einem vollständigen Informationsaustausch mit einer hohen Werkstattanbindung ab ca. 70 % relevante Kostenreduktionen und erreicht in diesem Bereich ebenfalls Werte von 155,42 bis 158,54 Euro. Die SM- und (t,q)-Politiken führen im Stückzahlenszenario Nachfrageüberschuss auch bei einem vollständigen Informationsaustausch nicht zu relevanten Einsparungen und erreichen auch dort noch 199,39 bzw. 183,15 Euro. Der teilweise oder nicht vorhandene Informationsaustausch führt im Nachfrageüberschuss nicht notwendigerweise zu schlechteren Ergebnissen als ein vorhandener Informationsaustausch mit geringer Werkstattanbindung. Aus ökonomischer Sicht kann somit gesagt werden, dass ein vollständiger Informationsaustausch nur lohnenswert ist, wenn die Werkstattanbindung auch ausreichend hoch ist.

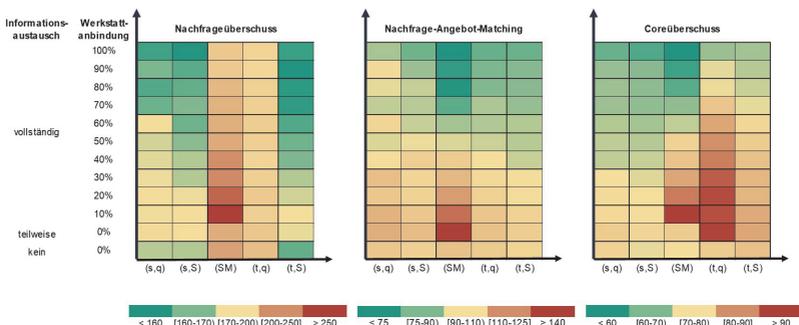


Abbildung 6.3: Veränderung der durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt im Detail.

Für das Stückzahlenszenario des Nachfrage-Angebot-Matchings (vgl. Abbildung 6.3, Mitte) ergibt sich ein leicht anderes Bild. Durchschnittlich über die unterschiedlichen Grade des Informationsaustauschs betrachtet führt auch hier die (t,S)-Politik mit 82,84 Euro zu den geringsten Kosten. Auffällig ist jedoch, insbesondere im Gegensatz zum vorherigen Stückzahlenszenario, dass die SM-Heuristik bei einer hohen Werkstattanbindung zu erheblichen

Kosteneinsparungen führt und somit bei einer Werkstattanbindung von 100 % zu den geringsten durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt von 74,44 Euro führt. Die prozentualen Einsparungen von 17,02 % sind hierbei also am größten. Die (s,q)- und (t,q)-Bestellpolitiken, die durch die Bestellmenge q charakterisiert sind, führen zwar mit steigendem Informationsaustausch ebenfalls zu Kosteneinsparungen, können aus ökonomischer Sicht aber mit den anderen Bestellpolitiken nicht konkurrieren.

Für das Stückzahlenszenario des Coreüberschusses (vgl. Abbildung 6.3, rechts) sinkt das absolute Kostenniveau deutlich im Vergleich zu den anderen beiden Stückzahlenszenarien, was durch die o. g. unterschiedlichen Skalen abgebildet wird. Dies lässt sich durch die höhere Verfügbarkeit von Cores und damit einhergehenden reduzierten Strafkosten im Allgemeinen erklären. Erneut fällt auf, dass die SM-Heuristik erst bei hohen Werkstattanbindungen gute Ergebnisse liefert und mit 100 % Werkstattanbindung zu den geringsten Kosten von 52,94 Euro führt, wohingegen die (t,q)- und (t,S)-Politiken auch mit steigendem Informationsaustausch schlechter abschneiden und durchschnittliche Gesamtkosten von mehr als 63 Euro je Produkt erreichen. Die (s,q)- und (s,S)-Politiken hingegen führen, analog zur SM-Heuristik, mit steigendem Informationsaustausch zu geringeren Gesamtkosten von 60,16 bzw. 58,25 Euro. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass im Coreüberschuss, d. h. in einem Szenario des Überangebots von Cores, Bestellrhythmusverfahren aus ökonomischer Sicht nicht geeignet sind, da selbst nach Ablauf des Überwachungsintervall t noch ausreichend Komponenten vorhanden sind, um die Nachfrage zu bedienen.

Wie zuvor erläutert, haben die Transport-, Straf- und Beschaffungskosten den größten Einfluss auf die Kostenreduktion. Daher werden diese im Folgenden näher analysiert (vgl. Abbildung 6.4). Für die Transportkosten c_{trans} ergibt sich dabei über alle drei Stückzahlenszenarien hinweg ein klares Bild (vgl. Abbildung 6.4, oben): Je höher der Informationsaustausch ia bzw. die Werkstattanbindung wka , desto geringer fallen die Transportkosten aus, unabhängig von der untersuchten Bestellpolitik. Dies lässt sich damit begründen, dass ein höherer Informationsaustausch dafür sorgt, dass Transporte von Cores, die ohnehin nicht mehr für das Remanufacturing geeignet sind, vermieden werden. Die Reduktion der Transportkosten beträgt dabei im Durchschnitt 40,72 % mit einer Standardabweichung von 0,005. Der Kostenverlauf ist dabei nahezu linear mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,995. Im Nachfrageüberschuss betragen die durchschnittlichen Transportkosten über alle Bestellpolitiken hinweg 20,59 Euro, im Nachfrage-Angebot-Matching sinken diese nur leicht auf 20,85 Euro, während im Coreüberschuss eine Reduktion auf 18,58 Euro möglich ist.

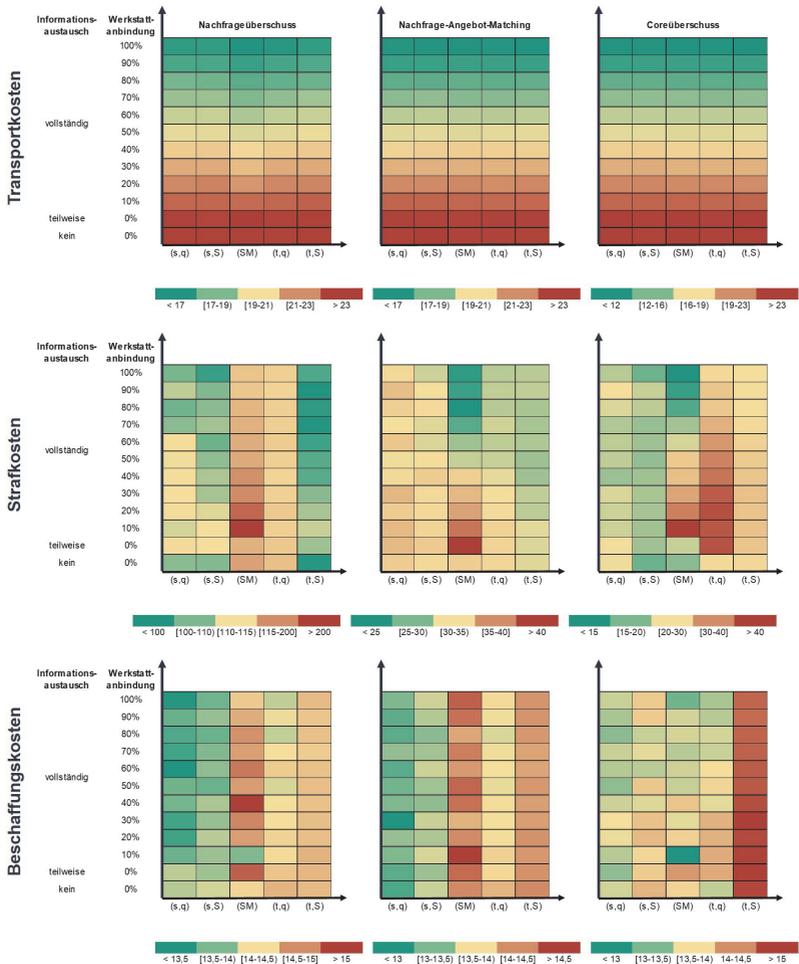


Abbildung 6.4: Veränderung der Transport-, Straf- und Beschaffungskosten je Produkt im Vergleich.

Die Strafkosten c_{straf} werden im simulationsbasierten Optimierungsmodell für unbediente Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten berechnet. In diesem Fall werden die durchschnittlichen Kosten eines äquivalenten Neuprodukts als Strafkosten angenommen. Aufgrund dieser Berechnung sind die Strafkosten auch einer der Haupttreiber der Gesamtkosten und werden daher näher untersucht (vgl. Abbildung 6.4, Mitte). Im Szenario des Nachfrageüberschusses

fällt insbesondere die (t,S)-Politik mit durchschnittlichen Strafkosten von 102,89 Euro über alle Grade des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung hinweg positiv sowie die SM-Heuristik mit 207,79 Euro negativ auf. Bei der (s,q)- und der (s,S)-Politik hingegen führt erneut ein vollständiger Informationsaustausch mit hohen Graden der Werkstattanbindung zu besseren Ergebnissen. Da im Stückzahlenszenario Nachfrageüberschuss weniger Cores als Nachfrage existieren, wird deutlich, dass ein erhöhter Informationsaustausch wichtig ist, um die Strafkosten zu reduzieren. Im Nachfrage-Angebot-Matching fallen die durchschnittlichen Strafkosten je Produkt mit 29,74 Euro generell geringer aus, was sich auch an der separaten Skalierung zeigt. Analog zum Verlauf der Gesamtkosten ist ersichtlich, dass die SM-Heuristik für hohe Grade der Werkstattanbindung sehr gute Ergebnisse erzielt und somit bei einer Werkstattanbindung von 100 % Strafkosten von 22,16 Euro erreicht, während die (s,q)-Politik für den gleichen Fall 29,96 Euro erreicht. Über alle Grade des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung hinweg ist erneut die (t,S)-Politik mit durchschnittlichen Strafkosten von 27,00 Euro am besten. Im Szenario Coreüberschuss führt die (s,S)-Politik mit durchschnittlich 18,38 Euro zu den geringsten Kosten. Erneut ist bei der SM-Heuristik eine deutliche Reduktion der Strafkosten um 28,02 % von keinem Informationsaustausch im Vergleich zum vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung möglich. Insgesamt lassen sich somit hohe Einsparpotentiale in den Strafkosten durch einen erhöhten Informationsaustausch identifizieren.

Die Beschaffungskosten $c_{\text{beschaffung}}$ setzen sich aus den bestellfixen Kosten je Bestellung sowie den Stück- und Lagerhaltungskosten der jeweiligen Komponenten zusammen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden diese auf Produktlevel aggregiert und dargestellt (vgl. Abbildung 6.4, unten). Im Stückzahlenszenario Nachfrageüberschuss betragen die durchschnittlichen Beschaffungskosten je Produkt 14,27 Euro, wobei die (s,q)-Politik mit durchschnittlich 13,53 Euro die besten und die SM-Heuristik mit durchschnittlich 15,24 Euro die schlechtesten Ergebnisse liefert. Im Stückzahlenszenario Nachfrage-Angebot-Matching ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die (s,S)-Politik tendenziell besser und die (t,S)-Politik tendenziell schlechter abschneiden als im Nachfrageüberschuss. Dieser Trend setzt sich für das Stückzahlenszenario Coreüberschuss fort, in dem erneut die (s,q)-Politik am besten abschneidet, wohingegen sich die Performance der (t,S)-Politik weiter verschlechtert. Auffällig ist weiterhin, dass über alle drei Stückzahlenszenarien hinweg die Reduktion der Beschaffungskosten mit einem vollständigen Informationsaustausch und 100 % Werkstattanbindung im Vergleich zu keinem Informationsaustausch mit durchschnittlich 1,47 % vergleichsweise gering ausfällt. Dies lässt darauf schließen, dass durch einen erhöhten Informationsaustausch zwar nicht notwendigerweise seltener oder weniger Neukomponenten bestellt werden, sondern die getätigten Bestellungen sowohl hinsichtlich des Zeitpunkts als auch der Menge besser an die konkrete Nachfrage angepasst werden können. Hinsichtlich der Optimierung der Beschaffungskosten

ist außerdem zu erwähnen, dass die Bestellpunktverfahren (s,q)- und (s,S)-Politik bessere Ergebnisse liefern als die Bestellrhythmusverfahren (t,q)- und (t,S)-Politik und sich diese Beobachtung mit steigender Verfügbarkeit an Cores bzw. Komponenten im Stückzahlenszenario Coreüberschuss noch verstärkt, insbesondere in Bezug auf die (t,S)-Politik.

Neben der Analyse der Gesamtkosten und deren Bestandteilen liegt ein weiterer Fokus der entwickelten Methode auf der Identifikation von komponentenspezifischen Eigenschaften, die einen besonderen Einfluss auf die MRP haben. Zur beispielhaften Analyse wird zunächst der Einfluss der Mindestbestellmenge $q_{min, kom}$ der Komponenten auf die Beschaffungskosten $C_{beschaffung}$ herangezogen (vgl. Abbildung 6.5). Für die Mindestbestellmenge werden drei Ausprägungen untersucht: Im ersten Fall wird die mit Industriepartnern definierte Mindestbestellmenge halbiert ($\frac{q_{min, kom}}{2}$), im zweiten Fall wird die ursprüngliche Menge verwendet ($q_{min, kom}$) und im dritten Fall wird diese verdoppelt ($2 \cdot q_{min, kom}$). Dabei gilt es zu beachten, dass die Mindestbestellmenge nur dann relevant ist, wenn die von der jeweiligen Bestellpolitik berechnete Bestellmenge geringer als die Mindestbestellmenge ist. In diesem Fall wird die Mindestbestellmenge bestellt, sodass diese sich vor allem auf die bestellfixen Kosten, die Stückkosten sowie die Lagerhaltungskosten auswirkt. Wie in Abbildung 6.5 zu erkennen ist, sind die Auswirkungen der Mindestbestellmenge schwankend. Im Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.5, links) werden die Beschaffungskosten der (t,S)-Bestellpolitik am stärksten von der Variation der Mindestbestellmenge beeinflusst, wohingegen die (t,q)-Politik am robustesten gegenüber Veränderungen ist. Weiterhin fällt auf, dass für die (s,S)- und SM-Politiken die ursprünglich gewählte Mindestbestellmenge q_{min} bereits zu einer guten Lösung führt und eine Variation dieser zu schlechteren Ergebnissen führt, unabhängig davon, in welche Richtung. Im Nachfrage-Angebot-Matching (vgl. Abbildung 6.5, Mitte) hingegen können für die meisten Bestellpolitiken die Beschaffungskosten mit einer höheren Mindestbestellmenge reduziert werden. Dies lässt sich damit erklären, dass durch die gleichen Verläufe von Angebot und Nachfrage die bestellten Neukomponenten ohnehin gebraucht werden und bei einer größeren Bestellmenge die bestellfixen Kosten reduziert werden, während gleichzeitig die Mehrkosten für die Lagerhaltung diesen Effekt nicht reduzieren. Im Fall des Coreüberschusses (vgl. Abbildung 6.5, rechts) hingegen führt in den meisten Fällen eine möglichst geringe oder die ursprüngliche Mindestbestellmenge zu den geringsten Kosten. Zusammenfassend hat die Mindestbestellmenge zwar einen Einfluss auf die Beschaffungskosten, allerdings ist dieser stark von dem betrachteten Stückzahlenszenario sowie der verwendeten Bestellpolitik abhängig, sodass keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann.

Zusätzlich zur Variation der Mindestbestellmenge werden im Folgenden beispielhaft die Auswirkungen der Variation der komponentenspezifischen Lieferzeit τ_{kom} auf die Liefertreue LT analysiert (vgl. Abbildung 6.6). Die Lieferzeit gibt an, wie lange eine Komponente vom

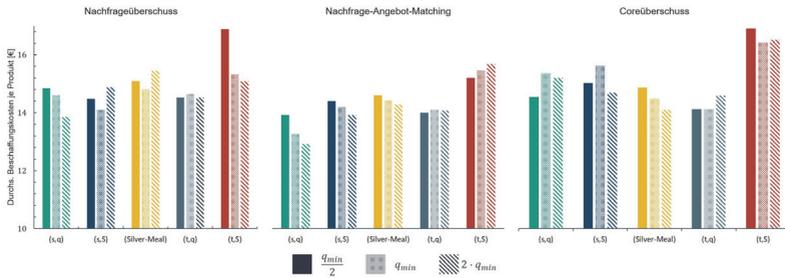


Abbildung 6.5: Auswirkungen der Variation der Mindestbestellmenge auf die Beschaffungskosten.

Moment der Bestellung bis zu ihrer Ankunft im Lager am Remanufacturing-Standort benötigt. Analog zur Mindestbestellmenge werden drei verschiedene Ausprägungen verwendet, wobei im ersten Fall die ursprüngliche Lieferzeit τ_{kom} verwendet wird und diese im zweiten bzw. dritten Fall verdoppelt ($2 \cdot \tau_{kom}$) bzw. vervierfacht ($4 \cdot \tau_{kom}$) wird. Dabei lässt sich für den Einfluss der Lieferzeit τ_{kom} auf die Liefertreue LT trotz einiger Ausnahmen ein Trend erkennen: Je kürzer die Lieferzeit ist, desto höher ist die erreichbare Liefertreue. Dieser Trend ist intuitiv nachvollziehbar, da lange Lieferzeiten der Komponenten häufiger Fehlmengen verursachen, sodass die Liefertreue sinkt. Dies gilt sowohl für alle drei Stückzahlsszenarien, als auch für alle untersuchten Bestellpolitiken. Konkret sinkt im Stückzahlsszenario Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.6, links) die Liefertreue um 6,77 % durch eine Verdopplung der Lieferzeit und um 8,08 % durch eine Vervierfachung dieser. Für das Nachfrage-Angebot-Matching (vgl. Abbildung 6.6, Mitte) beträgt diese Reduktion 7,20 % bzw. 9,56 % und im Coreüberschuss (vgl. Abbildung 6.6, rechts) 4,33 % bzw. 9,21 %. Die SM-Heuristik fällt bei dieser Analyse auf, da diese für den Nachfrageüberschuss sowie das Nachfrage-Angebot-Matching eine höhere Liefertreue bei einer Vervierfachung der Lieferzeit erreicht. Dieses Ergebnis bedarf jedoch auch entsprechend höherer Beschaffungskosten, wie bereits erläutert (vgl. Abbildung 6.4). Zusammenfassend sollte somit eine möglichst geringe Lieferzeit angestrebt werden, um die Performance des Remanufacturings zu verbessern. Anhang A10.1-A10.5 zeigt die Auswirkungen der Variationen weiterer Steuerfaktoren bzw. komponentenspezifischer Eigenschaften auf ausgewählte Kennzahlen.

Zur weiteren Analyse der Liefertreue LT wird die Entwicklung dieser in Abhängigkeit des Grads des Informationsaustauschs im Folgenden näher betrachtet. Die Liefertreue ergibt sich aus dem Verhältnis der bedienten Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten zur Gesamtnachfrage, d. h. inklusive derjenigen Nachfrage, die mit Hilfe eines Neuprodukts bedient wurde. Abbildung 6.7 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Liefertreue für die SM-Heuristik in Ab-

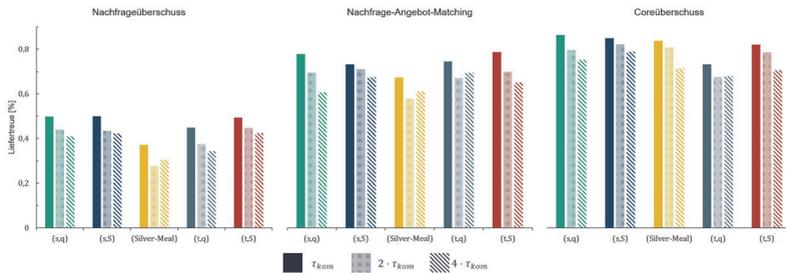


Abbildung 6.6: Auswirkungen der Variation der Lieferzeit auf die Liefertreue.

hängigkeit unterschiedlicher Informationsaustauschenszenarien und über alle drei untersuchten Stückzahlenszenarien. Wie zu erkennen ist, erreicht die SM-Heuristik dabei im Nachfrageüberschuss eine durchschnittliche Liefertreue von 33,04 %, im Nachfrage-Angebot-Matching 76,01 % und im Coreüberschuss 79,82 %. Damit ist die Liefertreue im Coreüberschuss und Nachfrage-Angebot-Matching jeweils signifikant höher als im Nachfrageüberschuss¹. Darüber hinaus können weitere interessante Effekte beobachtet werden. Zunächst lässt sich feststellen, dass sowohl im Nachfrage- als auch im Coreüberschuss ein nicht oder nur teilweise vorhandener Informationsaustausch, d. h. es sind lediglich die Sammelstandorte an den Informationsaustausch angebunden, zu besseren Ergebnissen führt als ein vollständiger Informationsaustausch mit geringer Werkstatthanbindung. Erst ab einer Werkstatthanbindung von 40 % bis 70 % übersteigt die Liefertreue der SM-Heuristik den Wert ohne Informationsaustausch wieder. Im Nachfrage-Angebot-Matching ist ein teilweiser Informationsaustausch hingegen mit negativen Auswirkungen auf die Liefertreue verbunden, wohingegen mit steigender Werkstatthanbindung ein annähernd linearer Verlauf angenommen werden kann (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,90$). Aus Sicht der Liefertreue lohnt sich somit die Verwendung der SM-Heuristik insbesondere bei einer hohen Werkstatthanbindung und liefert dabei insbesondere für die Stückzahlenszenarien Nachfrage-Angebot-Matching sowie Coreüberschuss sehr gute Ergebnisse.

Analog zu den Gesamtkosten lassen sich auch die Erkenntnisse bzgl. der Liefertreue auf die weiteren Bestellpolitiken übertragen. Abbildung 6.8 stellt die detaillierten Ergebnisse der durchschnittlichen Liefertreue je Produkt für alle untersuchten Bestellpolitiken bp und

¹Die statistische Signifikanz zum Signifikanzniveau von 5 % wurde mithilfe eines einseitigen t-Tests für unabhängige Stichproben bei Varianzhomogenität nachgewiesen. Die Varianz der Liefertreue liegt bei 0,003, 0,003 und 0,006 für die drei Stückzahlenszenarien Nachfrageüberschuss, Nachfrage-Angebot-Matching und Coreüberschuss, wodurch eine Varianzhomogenität angenommen werden kann. Die ermittelten t-Werte ($P(T \leq t)$) liegen bei $2,07 \cdot 10^{-15}$ und $2,29 \cdot 10^{-14}$, wodurch auf signifikante Unterschiede zwischen den Liefertreuen geschlossen werden kann.

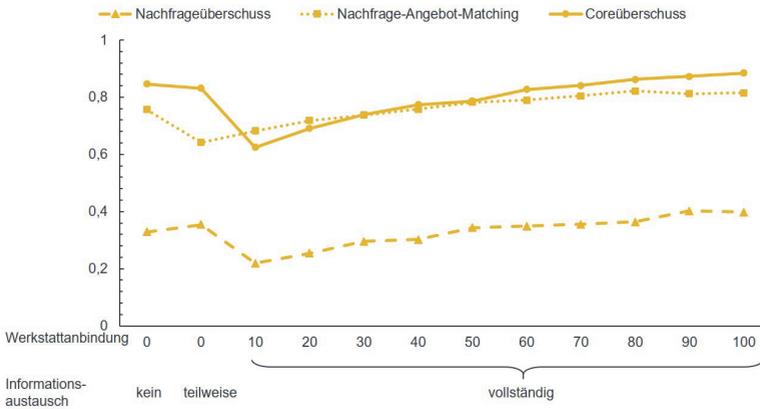


Abbildung 6.7: Entwicklung der Liefertreue für die SM-Heuristik über alle drei Stückzahlsszenarien.

Stückzahlsszenarien *szs* dar. Dabei ist zunächst zu erkennen, dass das allgemeine Niveau der Liefertreue je nach Stückzahlsszenario schwankt: Während im Nachfrageüberschuss die Liefertreue über alle Bestellpolitiken und Informationsaustauschszenarien noch bei 43,79 % liegt, liegt diese im Nachfrage-Angebot-Matching bereits bei 76,85 % und im Coreüberschuss sogar bei 79,68 %.

Für das Stückzahlsszenario Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.8, links) fällt auf, dass für eine vollständige Werkstattanbindung deutlich höhere Werte für die Liefertreue erreicht werden können: Am besten schneiden hierbei die (s,S)- und (t,S)-Politiken ab, die mit einem Werkstattanbindungsgrad von 100 % eine Liefertreue von 49,28 % bzw. 48,89 % erzielen. Bei niedrigeren Graden der Werkstattanbindung führt die SM-Heuristik wie bereits gesehen zu den schlechtesten Ergebnissen und somit nur zu einer durchschnittlichen Liefertreue von 33,04 %. Insgesamt lässt sich für den Nachfrageüberschuss festhalten, dass erhebliche Verbesserungspotentiale hinsichtlich der Liefertreue durch einen erhöhten Informationsaustausch existieren: Die durchschnittliche Steigerung aller Bestellpolitiken von keinem Informationsaustausch im Vergleich zu einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung liegt bei 6,38 %.

Wie bereits erwähnt, liegt die Liefertreue im Nachfrage-Angebot-Matching (vgl. Abbildung 6.8, Mitte) mit durchschnittlich 76,85 % deutlich höher als im Nachfrageüberschuss. Auch die Schwankungen der Liefertreue fallen geringer aus, die minimale Liefertreue beträgt 64,21 % während die maximale Liefertreue bei 82,19 % liegt. Auch im Nachfrage-Angebot-Matching

lässt sich durch einen vollständigen Informationsaustausch mit einer Werkstattanbindung von 100 % eine höhere Liefertreue von durchschnittlich 78,66 % erreichen, wobei die durchschnittliche Steigerung im Vergleich zu keinem Informationsaustausch 2,97 % beträgt. Im Durchschnitt schneiden die untersuchten Bestellpolitiken sehr ähnlich ab, allerdings mit starken Unterschieden hinsichtlich des Grads der Werkstattanbindung: Während beispielsweise die (t,S)- und (t,q)-Politiken bereits bei einer Werkstattanbindung von 20 % eine Liefertreue von 78,41 % bzw. 76,85 % erreichen, fällt insbesondere die SM-Heuristik in diesem Bereich mit mehr als 10 % weniger Liefertreue negativ auf. Umgekehrt liefert die SM-Heuristik bei einer Werkstattanbindung von 100 % die besten Ergebnisse mit einer Liefertreue von 81,58 %. Auffällig ist außerdem, dass sich die (s,q)- und (s,S)-Politiken hinsichtlich der Liefertreue mit einem steigenden Grad des Informationsaustauschs im Nachfrage-Angebot-Matching nur geringfügig verbessern und lediglich eine Steigerung von 1,43 % bzw. 1,69 % erreichen. Insgesamt lässt sich aus dem Nachfrage-Angebot-Matching schließen, dass durch geeignete Wahl der Bestellpolitik bereits für geringere Grade der Werkstattanbindung eine hohe Liefertreue erzielt werden kann, während mit steigendem Informationsaustausch ein Wechsel der Bestellpolitik notwendig ist, um die besten Ergebnisse zu erhalten.

Für den Fall des Coreüberschusses (vgl. Abbildung 6.8, rechts) liegt die durchschnittliche Liefertreue mit 79,68 % erneut auf einem höheren Niveau gegenüber dem Nachfrage-Angebot-Matching. Wie zuvor gesehen, erreicht die SM-Heuristik erneut erst ab hohen Graden der Werkstattanbindung gute Werte und erreicht bei 100 % Werkstattanbindung mit 88,43 % Liefertreue die besten Werte aller untersuchten Bestellpolitiken. Hervorzuheben in diesem Szenario sind die Bestellpunktverfahren der (s,q)- und (s,S)-Bestellpolitik, die auch bei keinem bzw. teilweisem Informationsaustausch eine durchschnittliche Liefertreue von ca. 83 % erreichen. Die (t,q)-Politik hingegen schneidet mit einer durchschnittlichen Liefertreue von 71,90 % über alle Grade des Informationsaustauschs hinweg am schlechtesten ab.

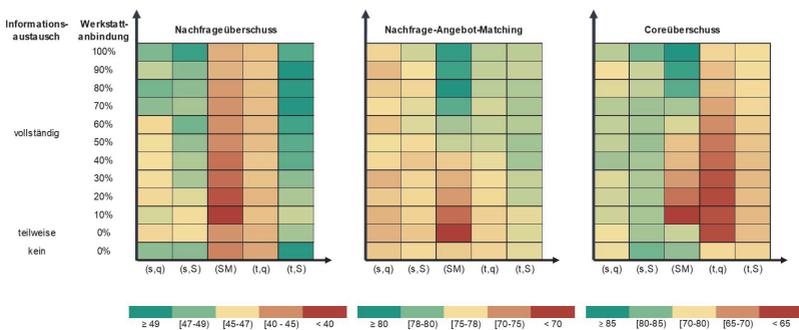


Abbildung 6.8: Veränderung der durchschnittlichen Liefertreue je Produkt im Detail.

Neben den ökonomischen Kennzahlen wie Kosten und Liefertreue liegt ein weiterer Fokus des entwickelten Kennzahlensystems auf der ökologischen Bewertung (vgl. Kapitel 5.3.3.2). Daher wird im Folgenden zunächst die CO_2 -Belastung je Core U_{co} genauer untersucht, die sich durch die zurückgelegte Strecke je Core multipliziert mit dem durchschnittlichen CO_2 -Verbrauch je Kilometer¹ ergibt. Abbildung 6.9 zeigt beispielhaft die CO_2 -Belastung je Core im Stückzahlenszenario Coreüberschuss unter Verwendung der (t,q)-Bestellpolitik für alle untersuchten Grade des Informationsaustauschs und der Werkstattanbindung. Die Analyse zeigt deutlich eine sinkende CO_2 -Belastung mit steigendem Grad der Werkstattanbindung. Ist der Informationsaustausch hingegen nicht oder nur teilweise vorhanden, d. h. nur die Sammelstandorte nehmen Informationen auf und geben diese weiter, so erreicht die CO_2 -Belastung ihre maximalen Werte von 197,45 kg CO_2 pro Core. Die niedrigsten Werte von 93,29 kg CO_2 werden hingegen bei 100 % Werkstattanbindung erreicht. Insgesamt sind somit Reduktionen von 52,75 % in den CO_2 -Emissionen möglich. Der Verlauf ist dabei analog zu den Transportkosten annähernd linear mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,995$.

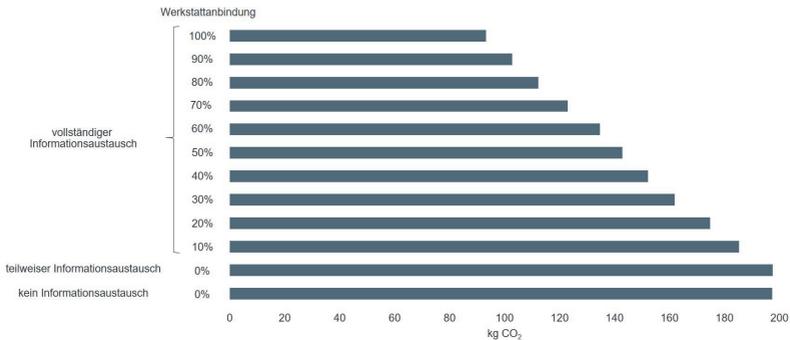


Abbildung 6.9: Durchschnittliche CO_2 -Belastung je Core U_{co} im Coreüberschuss unter Verwendung der (t,q)-Bestellpolitik.

Eine detaillierte Analyse der CO_2 -Belastung bestätigt diese Beobachtungen. Abbildung 6.10 stellt diese entsprechend der untersuchten Stückzahlenszenarien und Bestellpolitiken dar. Im Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.10, links) beträgt die durchschnittliche CO_2 -Belastung je Core 164,71 kg CO_2 . Es ist zu erkennen, dass sich eine hohe Werkstattanbindung ab 70 % sehr positiv auf die CO_2 -Belastung auswirkt. Im Vergleich zu den niedrigeren Informationsaustauschszszenarien sinkt die durchschnittliche CO_2 -Belastung dabei von 178,06 kg CO_2 auf 138,00 kg CO_2 , was einer Reduktion von 22,50 % entspricht. Die untersuchten Bestellpoli-

¹Auf Basis eines durchschnittlichen Verbrauchs von $8,0 \frac{l}{100km}$ Diesel eines mittelgroßen Transporters ergibt sich ein resultierender CO_2 -Ausstoß von $0,2 \frac{kgCO_2}{km}$, in Anlehnung an: <https://www.mercedes-benz.at/vans/de/sprinter/panel-van/technical-data>, zuletzt aufgerufen am 20.03.2023.

ken unterscheiden sich hingegen nur geringfügig und schwanken im Durchschnitt zwischen 162,57 kg CO₂ bei der SM-Heuristik und 165,71 kg CO₂ pro Produkt bei der (t,S)-Politik. Im Durchschnitt sind durch einen erhöhten Informationsaustausch CO₂-Einsparungen von bis zu 35,24 % möglich. Im Nachfrage-Angebot-Matching (vgl. Abbildung 6.10, Mitte) ist die durchschnittliche CO₂-Belastung mit 166,80 kg CO₂ je Core geringfügig höher als im Nachfrageüberschuss. In Bezug auf Einsparpotentiale kann auch hier festgehalten werden, dass ein höherer Informationsaustausch eine Reduktion der CO₂-Belastung von bis zu 34,00 % zur Folge hat. Die untersuchten Bestellpolitiken haben erneut einen sehr homogenen Verlauf und schwanken im Durchschnitt nur um 0,37 kg CO₂ je Core. Im Coreüberschuss (vgl. Abbildung 6.10, rechts) sinkt die durchschnittliche CO₂-Belastung auf 148,68 kg CO₂ pro Core, wobei auch hier keine relevanten Unterschiede zwischen den untersuchten Bestellpolitiken zu erkennen sind. Die prozentuale Verbesserung der CO₂-Belastung im Vergleich zwischen keinem Informationsaustausch und einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung beträgt in diesem Fall 52,93 %.

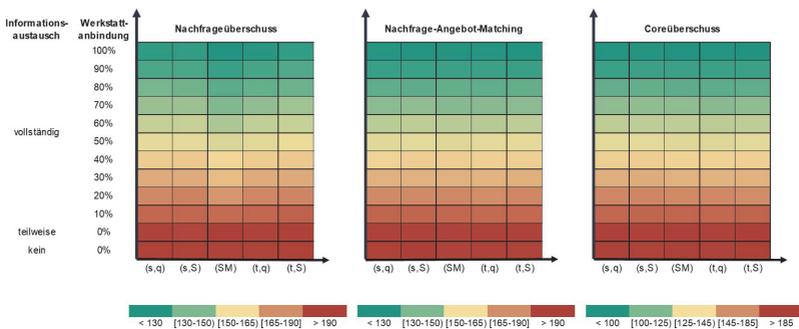


Abbildung 6.10: Veränderung der durchschnittlichen CO₂-Belastung je Produkt im Detail.

Neben der CO₂-Belastung wird im Folgenden als weitere ökologische Kennzahl die Aufarbeitungsquote AQ betrachtet. Diese gibt den Anteil eingesparter Ressourcen durch das Remanufacturing bzw. durch eine effizientere MRP an. Abbildung 6.11 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt der Kennzahl für das Stückzahl Szenario Nachfrage-Angebot-Matching und vergleicht dabei die (s,q)- und SM-Politiken für verschiedene Grade des Informationsaustauschs. Für die (s,q)-Politik fällt auf, dass sich die Aufarbeitungsquote über alle Grade des Informationsaustauschs und der Werkstattanbindung relativ konstant verhält mit einer maximalen Steigerung von 2,42 % und einer Standardabweichung von 0,005. Die SM-Heuristik hingegen weißt für einen teilweisen Informationsaustausch und geringe Grade der Werkstattanbindung bis 20 % eine deutlich geringere Aufarbeitungsquote von durchschnittlich 24,55 % auf. Bei hohen Werkstattanbindungsgraden von über 70 % hingegen steigt die

Aufarbeitungsquote auf durchschnittlich 29,57 %. Ein höherer Informationsaustausch führt somit bei der SM-Heuristik auch hinsichtlich der Aufarbeitungsquote zu Verbesserungen: Im Vergleich zwischen keinem und einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung sind Steigerungen von 8,14 % möglich. Im Durchschnitt aller untersuchten Grade des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung unterscheidet sich die Aufarbeitungsquote zwischen der (s,q)- und der SM-Politik nur noch geringfügig mit 27,31 % bzw. 27,49 %.

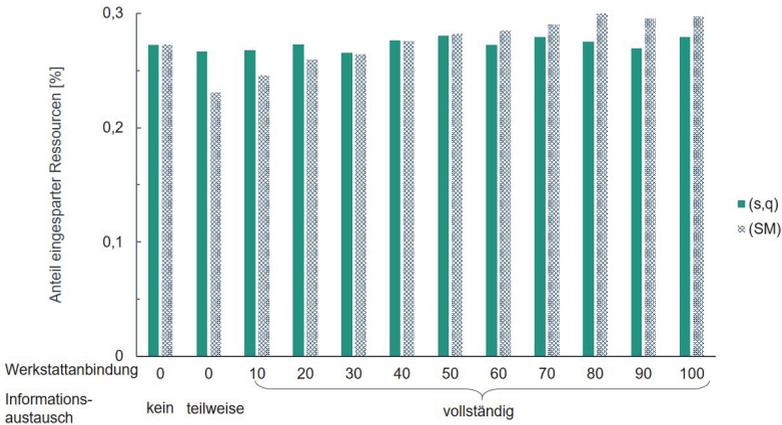


Abbildung 6.11: Verlauf der Aufarbeitungsquote im Nachfrage-Angebot-Matching für die (s,q)- und SM-Bestellpolitiken.

Abbildung 6.12 stellt die Veränderung der Aufarbeitungsquote im Detail dar. Für das Szenario Nachfrageüberschuss (vgl. Abbildung 6.12, links) wird dabei eine durchschnittliche Aufarbeitungsquote von 15,40 % erreicht, wobei die (t,S)-Politik mit 17,16 % am besten bzw. die SM-Heuristik mit 11,60 % durchschnittlicher Aufarbeitungsquote am schlechtesten abschneiden. In der Tendenz ist erkenntlich, dass eine hohe Werkstattanbindung zu einer verbesserten ökologischen Performance führt. Bei einer vollständigen Werkstattanbindung von 100 % erreicht bspw. die (s,S)-Politik eine Aufarbeitungsquote von 17,45 %. Die (s,q)-Politik führt ebenfalls ab einer Werkstattanbindung von 70 % zu einer Aufarbeitungsquote von über 17 %. Die SM-Heuristik fällt im Nachfrageüberschuss negativ auf, da diese auch für hohe Grade der Werkstattanbindung immer noch vergleichsweise schlechte Ergebnisse liefert.

Im Nachfrage-Angebot-Matching (vgl. Abbildung 6.12, Mitte) steigt die durchschnittliche Aufarbeitungsquote auf 27,81 % an. Dies spiegelt auch die Ergebnisse der ökologischen Bewertung wider, da in diesem Stückzahlenszenario geringere Gesamt- bzw. Strafkosten und

eine höhere Liefertreue erreicht werden. Die (s,q)- und SM-Politiken schneiden mit 27,31 % bzw. 27,49 % am schlechtesten ab, wobei der Unterschied zu den anderen Bestellpolitiken im Durchschnitt nicht mehr so groß ist wie im Nachfrageüberschuss. Allerdings weist die (s,q)-Politik über die verschiedenen Grade der Werkstattanbindung nur eine geringfügige Steigerung auf, wobei die SM-Heuristik bei einer Werkstattanbindung von mehr als 80 % eine Aufarbeitungsquote von ca. 30 % und damit die besten Werte in diesem Stückzahlsszenario erreicht. Im Durchschnitt über alle Grade des Informationsaustauschs und der Werkstattanbindung erreicht die (t,S)-Bestellpolitik mit einer Aufarbeitungsquote von 28,34 % die besten Werte im Nachfrage-Angebot-Matching. Insgesamt sind die Ergebnisse der Ressourceneffizienz in diesem Stückzahlsszenario vergleichsweise stabil und weisen eine durchschnittliche Standardabweichung von gerade einmal 0,007 auf.

Im Coreüberschuss (vgl. Abbildung 6.12, rechts) ergibt sich eine durchschnittliche Aufarbeitungsquote von 28,75 %. Im Durchschnitt schneidet dabei die (s,S)-Politik mit 30,40 % am besten und die (t,q)-Politik am schlechtesten ab. Erneut erreicht die SM-Heuristik insbesondere für hohe Grade der Werkstattanbindung sehr gute Werte und liefert mit einer Aufarbeitungsquote von 32,27 % die besten Werte für das Stückzahlsszenario Coreüberschuss. Die Standardabweichung über alle Bestellpolitiken und Grade des Informationsaustauschs liegt mit 0,01 erneut bei einem geringen Wert. Der Unterschied zwischen keinem und einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung liegt mit einer durchschnittlichen Steigerung der Aufarbeitungsquote um 3,13 % vergleichsweise niedrig. Der Aufwand eines erhöhten Informationsaustauschs lohnt sich in Bezug auf die Aufarbeitungsquote im Szenario des Coreüberschusses somit nur bedingt.

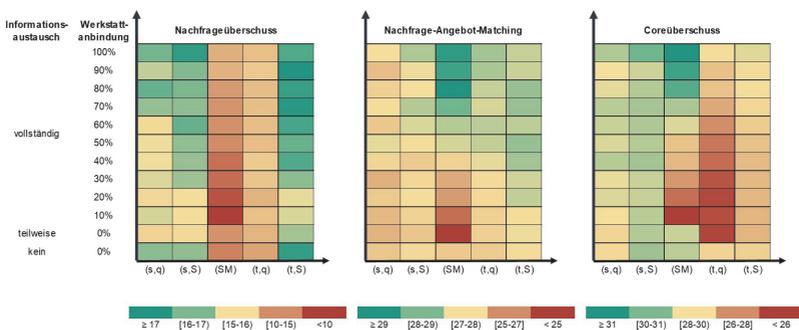


Abbildung 6.12: Veränderung der Aufarbeitungsquote im Detail.

Aus der Analyse der ökonomischen und ökologischen Kennzahlen für den variierenden Informationsvektor \vec{i} , d. h. der Nachbildung des Durchschnittsverhaltens eines realen Systems,

lässt sich zusammenfassend folgendes Fazit ziehen: Prinzipiell sind viele Muster hinsichtlich der analysierten Kennzahlen und Bestellpolitiken in allen Stückzahlenszenarien erkennbar. So lässt bspw. ein vollständiger Informationsaustausch mit einer hohen Werkstattanbindung für alle untersuchten Bestellpolitiken auf bessere Werte hinsichtlich der durchschnittlichen Gesamtkosten, der Liefertreue, der CO₂-Belastung und der Aufarbeitungsquote schließen. Die absolute Größenordnung schwankt dabei jedoch enorm. Wie sich vermuten lässt, wird im Coreüberschuss die beste Performance bzgl. Gesamtkosten und Liefertreue bei allen untersuchten Bestellpolitiken erreicht, da in diesem Stückzahlenszenario das Verhältnis zurückfließender Cores gegenüber der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten zugunsten des Remanufacturings ausgelegt ist. So wird bspw. im Coreüberschuss eine um 35,89 Prozentpunkte bessere Liefertreue sowie um 60,72 % reduzierte Gesamtkosten gegenüber dem Nachfrageüberschuss erreicht. Auch hinsichtlich der ökologischen Performance sind im Coreüberschuss erhebliche Einsparpotentiale in der durchschnittlichen CO₂-Belastung sowie Steigerungen der Aufarbeitungsquote gegenüber dem Nachfrageüberschuss möglich. Zu beachten ist dabei, dass die ökologische Performance zwar als Bewertungs- und Vergleichskriterium herangezogen wird, jedoch nicht als Entscheidungsgröße in die Berechnungen der Bestellmenge oder -zeitpunkte der untersuchten Bestellpolitiken eingeht.

Bei einem vollständigen Informationsaustausch mit hohen Werkstattanbindungen von über 80 % sind zudem häufig nur geringfügige Unterschiede zwischen den meisten der untersuchten Bestellpolitiken in den jeweiligen Stückzahlenszenarien und Kennzahlen zu erkennen. Bei geringeren Informationsaustauschszenarien sind hingegen größere Unterschiede zu erkennen. Während beispielsweise im Nachfrageüberschuss die (s,S)- und (t,S)-Politiken bereits bei geringen Graden der Werkstattanbindung zwischen 10 % und 40 % zu guten Ergebnissen hinsichtlich Gesamtkosten und Liefertreue führen, schneidet die SM-Heuristik in diesen Bereichen schlechter ab und wird erst bei einer hohen Werkstattanbindung konkurrenzfähig. Im Nachfrage-Angebot-Matching führt insbesondere die (t,S)-Politik bereits bei einer niedrigen Werkstattanbindung zu guten Ergebnissen. Auch hier schneidet die SM-Heuristik für eine niedrige Werkstattanbindung am schlechtesten, aber für eine hohe Werkstattanbindung am besten ab. Im Coreüberschuss liegt das Niveau der untersuchten Kennzahlen generell höher, dennoch lässt sich auch hier die (s,S)-Politik für eine geringe Werkstattanbindung als vorteilhaft identifizieren.

Komponentenspezifische Eigenschaften wie die Mindestbestellmenge oder die Lieferzeit haben in dem untersuchten Anwendungsfall ebenfalls Auswirkungen: Beispielhaft konnte gezeigt werden, dass die Variation der Mindestbestellmenge $q_{min, kom}$ je nach Stückzahlenszenario und Bestellpolitik unterschiedliche Effekte aufweist, wobei sich die (t,q)-Politik am robustesten gegenüber den Beschaffungskosten $c_{beschaffung}$ erwiesen hat und keine starken Schwankun-

gen in diesen zeigt. Bezüglich der Variation Lieferzeit τ_{kom} weisen alle Bestellpolitiken einen positiven Trend in der Liefertreue LT auf, je kürzer die Lieferzeit ist.

Hinsichtlich der zugrundeliegenden Zielsetzung der vorliegenden Arbeit lassen sich somit klare Wirkzusammenhänge zwischen einem höheren Informationsaustausch in der RL und der MRP im Remanufacturing erkennen. Je nach Präferenz hinsichtlich der untersuchten Kennzahlen sowie entsprechendem Stückzahlenszenario können durch die Wahl einer geeigneten Bestellpolitik bereits für einen teilweisen Informationsaustausch oder eine geringe Werkstattanbindung erhebliche Vorteile erreicht werden. Bei einem vollständigen Informationsaustausch mit hoher Werkstattanbindung erreichen die meisten Bestellpolitiken gute Werte hinsichtlich der untersuchten Kennzahlen.

6.4.2 Benchmark-Läufe

Im nächsten Schritt werden entsprechend des in Kapitel 5.4.3 vorgestellten Vorgehensmodells sog. Benchmark-Läufe (BL) durchgeführt und ausgewertet, um die Performance der echtzeitfähigen und stochastischen Bestellpolitiken im Vergleich zum deterministischen *Wagner-Whitin*-Modell (WW) zu untersuchen. Hierzu wird das simulationsbasierte Optimierungsmodell zunächst entsprechend der Läufe des variierenden Informationsvektors \vec{i} (vl) durchgeführt und die mit der gewählten Bestellpolitik erreichte Lösung sowie die realisierte Nachfrage über den Simulationszeitraum gespeichert. Anschließend wird das exakte Lösungsverfahren des WW-Modells durchgeführt, um die theoretisch optimale Lösung zu ermitteln. Diese ermittelte Lösung wird in einem erneuten Durchlauf des Simulationsmodells umgesetzt, um die resultierende Performance zu ermitteln. Die theoretisch kostenoptimale Lösung des WW kann somit als Benchmark für die Güte der implementierten stochastischen Bestellpolitiken bzw. der SM-Heuristik verwendet werden, die unter unvollständigen Informationen zur Laufzeit der simulationsbasierten Optimierung eine Lösung bestimmen. Mittels *rangbasierter Selektion* werden die echtzeitfähigen Bestellpolitiken bp entsprechend ihrer Optimalitätslücke $\Delta_{bp,WW}$ je Kennzahl in eine Rangfolge gebracht. Die Benchmark-Läufe werden konform zu Kapitel 6.3 ebenfalls für die drei identifizierten Stückzahlenszenarien *szs* Nachfrageüberschuss, Nachfrage-Angebot-Matching und Coreüberschuss durchgeführt. Da das WW-Lösungsverfahren ohnehin Zugriff auf die realisierte Nachfrage aus der simulationsbasierten Optimierung erhält, sollten für die untersuchten stochastischen bzw. echtzeitfähigen Bestellpolitiken die besten, echtzeitfähigen Bedingungen gelten. Dies wird mit einem vollständigen Informationsaustausch ia und 100 % Werkstattanbindung wka sichergestellt. Die Auswertung erfolgt analog zu den vl-Läufen anhand der Kennzahlen Gesamtkosten, Liefertreue, CO_2 -Belastung und Aufarbeitungsquote.

Abbildung 6.13 zeigt den Vergleich der fünf untersuchten Bestellpolitiken mit dem WW-Modell für das Stückzahlzenario Nachfrageüberschuss. Die Horizontale stellt dabei das normierte Ergebnis des WW-Modells für die verschiedenen Kennzahlen dar, Säulen über der Horizontalen stehen für eine Abweichung nach oben (z. B. höhere Kosten), Säulen unterhalb der Horizontalen für Abweichungen nach unten (z. B. geringere Liefertreue). Dabei fällt hinsichtlich der Gesamtkosten auf, dass die (t,q)- und (s,q)-Politiken die geringste Abweichung $\Delta_{bp,WW}$ von der optimalen Lösung von 8,19 % bzw. 10,17 % aufweisen und somit entsprechend der *rangbasierten Selektion* hinsichtlich dieser Kennzahl die Ränge 1 bzw. 2 erreichen. Die größte Abweichung hingegen liegt mit 214,08 % bei der (s,S)-Politik (Rang 5) vor, was mit den Ergebnissen der vl-Läufe übereinstimmt (vgl. Kapitel 6.4.1). Die SM- und (t,S)-Politiken weichen um 31,00 % (Rang 3) bzw. 33,10 % (Rang 4) ab. Im Durchschnitt erreichen die echtzeitfähigen Bestellpolitiken somit um 39,31 % höhere Gesamtkosten als eine deterministische, optimale Lösung. Hinsichtlich der erreichten Liefertreue betragen die Abweichungen von der optimalen Lösung im Durchschnitt 51,56 %, wobei die untersuchten Bestellpolitiken keine großen Unterschiede untereinander aufweisen. Bezüglich der CO₂-Belastung fallen die Abweichungen zur optimalen Lösung gering aus und betragen nur durchschnittlich 3,45 %, erneut unterscheiden sich die echtzeitfähigen Bestellpolitiken nur geringfügig. Hinsichtlich der Aufarbeitungsquote sind keine klaren Muster erkenntlich. Während bspw. die (s,q)-, SM- und (t,S)-Politiken (Rang 1 bis 3) zu einer geringeren Aufarbeitungsquote im Vergleich zum WW-Modell führen, erreichen die (s,S)- und (t,q)-Politiken (Rang 4 und 5) höhere Werte und übersteigen die optimale Lösung um 3,47 % bzw. 7,86 %.

Abbildung 6.14 zeigt eine analoge Abbildung für das Stückzahlzenario Nachfrage-Angebot-Matching. Im Allgemeinen fällt auf, dass die Abweichungen $\Delta_{bp,WW}$ in diesem Fall deutlich geringer ausfallen als im Nachfrageüberschuss. So beträgt die durchschnittliche Kostensteigerung der echtzeitfähigen Bestellpolitiken nur noch 19,95 % im Vergleich zu dem Ergebnis des WW-Modells. Dabei ist erneut die (s,q)- sowie in diesem Fall die SM-Politik hervorzuheben, die lediglich Abweichungen von 1,20 % bzw. 3,87 % von der optimalen Lösung aufweisen und somit entsprechend der *rangbasierten Selektion* die Ränge 1 bzw. 2 zugewiesen bekommen. Die anderen drei Bestellpolitiken weisen jedoch mit durchschnittlich 31,55 % deutlich höhere Werte auf. Hinsichtlich der Liefertreue beträgt die durchschnittliche Abweichung von der optimalen Lösung im Stückzahlzenario Nachfrage-Angebot-Matching nur 6,70 %. Bestätigend zu den Ergebnissen der vl-Läufe erreicht die SM-Heuristik dabei mit einer Abweichung von 3,24 % (Rang 1) die besten Ergebnisse und die (s,q)-Politik mit 9,13 % (Rang 5) die schlechtesten. In Bezug auf die CO₂-Belastung erreichen die echtzeitfähigen Bestellpolitiken in diesem Stückzahlzenario leicht höhere Werte als die optimale Lösung, wobei die Abweichungen mit durchschnittlich 3,68 % gering ausfallen. Ebenso lassen sich keine relevanten Unterschiede zwischen den Bestellpolitiken identifizieren. Erneut lassen sich hinsichtlich der

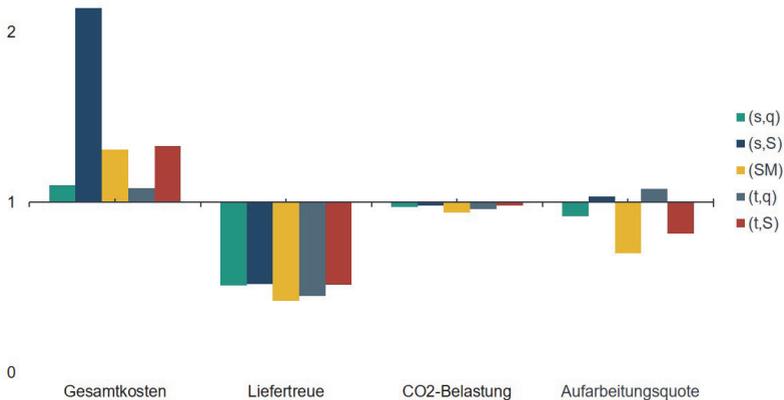


Abbildung 6.13: Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlzenario Nachfrageüberschuss.

Aufarbeitungsquote keine eindeutigen Trends erkennen: Während die (t,q)- und SM-Politiken um 16,79 % bzw. 8,05 % (Rang 1 bzw. 2) bessere Werte erreichen als das WW-Modell, fallen die Ergebnisse der restlichen Bestellpolitiken schlechter aus. Insbesondere die (s,S)-Politik (Rang 5) fällt dabei negativ auf, da sie eine um mehr als 45 % schlechtere Aufarbeitungsquote erreicht als das Benchmarkverfahren des WW-Modells.

Zuletzt werden die Ergebnisse des Stückzahlzenarios Coreüberschuss in Abbildung 6.15 untersucht. Die Abweichungen $\Delta_{bp,WW}$ der Gesamtkosten liegen in diesem Stückzahlzenario etwas höher als im Nachfrage-Angebot-Matching und betragen im Durchschnitt der echtzeitfähigen Bestellpolitiken 21,92 % im Vergleich zum WW-Modell. Dabei fällt insbesondere auf, dass die SM-Heuristik sogar um 2,25 % geringere Kosten erreicht als das WW-Modell und somit entsprechend der *rangbasierten Selektion* den ersten Rang erzielt. Diese Beobachtung lässt sich durch den dreistufigen Ablauf der simulationsbasierten Optimierung erklären, wodurch die theoretisch optimale Lösung des WW-Modells in einem erneuten Durchlauf der Simulation der RL realisiert wird und sich durch die stochastischen Effekte darin Abweichungen ergeben können (vgl. Kapitel 5.4.3). Die Abweichung der restlichen echtzeitfähigen Bestellpolitiken vom Benchmark beträgt im Durchschnitt 27,97 %, wobei die (s,S)-Politik mit 14,98 % (Rang 2) positiv und die (s,q)-Politik mit 40,28 % (Rang 5) negativ hervorzuheben sind. Diese Beobachtungen bestätigen auch die Analyse der vl-Läufe (vgl. Kapitel 6.4.1). Hinsichtlich der Liefertreue ist erneut die SM-Heuristik mit einer Abweichung von 4,86 % (Rang 1)

2

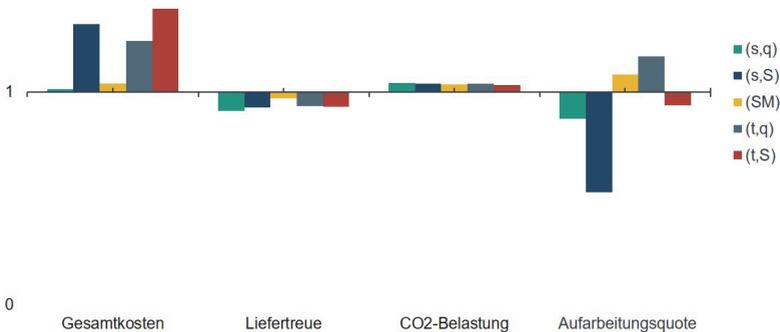


Abbildung 6.14: Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlzenario Nachfrage-Angebot-Matching.

vom Benchmark hervorzuheben. Die anderen echtzeitfähigen Bestellpolitiken unterscheiden sich kaum und erreichen im Durchschnitt eine um 9,60 % geringere Liefertreue als die Lösung des WW-Modells. Auch bezüglich der CO₂-Belastung sind keine relevanten Unterschiede zwischen den untersuchten Bestellpolitiken zu erkennen. Es fällt auf, dass alle Bestellpolitiken eine geringere CO₂-Belastung verursachen als die des Benchmark-Verfahrens und dabei Einsparungen von durchschnittlich 24,06 % erreichen. Jedoch ist auch die Aufarbeitungsquote für die meisten der untersuchten Bestellpolitiken schlechter als der Benchmark. Insbesondere die (s,q)-Politik (Rang 5) fällt mit einer um 41,66 % geringeren Aufarbeitungsquote als das WW-Modell auf. Die (s,S)-, SM- und (t,q)-Politiken erreichen jeweils eine etwas schlechtere Aufarbeitungsquote als der Benchmark und weichen durchschnittlich um 8,24 % von dieser ab. Lediglich die (t,S)-Politik (Rang 1) erreicht eine um 1,35 % höhere Aufarbeitungsquote als das WW-Modell.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das WW-Verfahren hinsichtlich der Gesamtkosten in fast allen Fällen zu den besten Ergebnissen führt und somit als Benchmark für die stochastischen, echtzeitfähigen Bestellpolitiken verwendet werden kann. Insbesondere im Nachfrageüberschuss sind die Abweichungen in den Gesamtkosten sowie in der Liefertreue durchschnittlich sehr hoch, woraus sich schließen lässt, dass die untersuchten Bestellpolitiken in diesem Stückzahlzenario nur bedingt geeignet sind bzw. eine entsprechende Auswahl getroffen werden muss. Im Nachfrage-Angebot-Matching bzw. im Coreüberschuss werden die

2

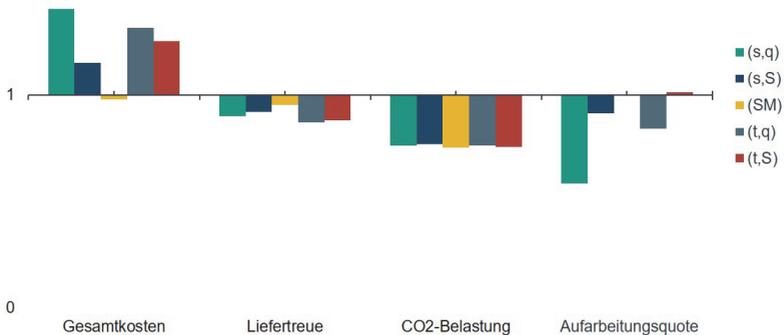


Abbildung 6.15: Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlzenario Coreüberschuss.

Abweichungen der echtzeitfähigen Bestellpolitiken in den Gesamtkosten und der Liefertreue im Vergleich zum WW-Modell geringer und liegen bei geeigneter Wahl einer Bestellpolitik in einem akzeptablem Rahmen, wodurch die Güte der implementierten Lösung bestätigt werden kann. Für den untersuchten, vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung führt vor allem die SM-Heuristik zu sehr guten Ergebnissen. Hinsichtlich der ökologischen Kennzahlen lässt sich kein klares Muster erkennen: Während im Nachfrageüberschuss das WW-Modell noch schlechtere Werte für die CO₂-Belastung erreicht, sind diese im Nachfrage-Angebot-Matching besser und im Coreüberschuss wieder deutlich schlechter. Da diese Kennzahl jedoch weder für die echtzeitfähigen Bestellpolitiken noch für das WW-Modell eine Zielgröße, d. h. eine zu optimierende Variable, darstellt, lässt sich daraus nur schwierig auf die Güte und Performance dieser schließen. Auch hinsichtlich der Aufarbeitungsquote schwanken die Unterschiede zwischen echtzeitfähigen Bestellpolitiken und WW-Modell sowohl innerhalb der untersuchten Stückzahlzenarien, als auch darüber hinaus stark, sodass ebenfalls kein klarer Trend zu erkennen ist. Entsprechend der *rangbasierten Selektion* lassen sich die echtzeitfähigen Bestellpolitiken für jedes Stückzahlzenario und jede Kennzahl in eine eindeutige Rangfolge gegenüber dem WW-Modell bringen, wobei eine mögliche Gesamtrangfolge von den spezifischen Entscheidungspräferenzen abhängt (vgl. Kapitel 6.5).

6.4.3 Konstanter Informationsvektor

Im Gegensatz zu den simulationsbasierten Optimierungsläufen mit variierendem Informationsvektor (vgl. Kapitel 6.4.1) werden im Rahmen des konstanten Informationsvektors (kl) die Informationsvektoren \vec{i} der modellierten Cores bzw. Komponenten für eine definierte Anzahl an Typen von Cores als Eingangswert vorgegeben und somit nicht variiert. Jede modellierte Komponente vom gleichen Typ hat somit die exakt gleichen Informationen und Eigenschaften sowohl innerhalb eines Laufs als auch zwischen den Läufen. Dadurch werden stochastische Schwankungen verhindert und es wird untersucht, welche Informationsarten bzw. -ausprägungen einen besonders hohen Einfluss auf die untersuchten Kennzahlen haben und somit für die MRP besonders nützlich sind (vgl. Kapitel 5.4.4).

Abbildung 6.16 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der entsprechenden kl-Läufe auf die Kennzahlen Liefertreue und CO₂-Belastung. Um ein intuitives Bild zu erzeugen, wurde statt der Liefertreue die Kennzahl Fehlmengenanteil $f = 1 - LT$ verwendet. Somit gilt für die in Abbildung 6.16 dargestellten Balken: Je kürzer der Balken, desto weniger wirken sich die zugehörigen Eigenschaften auf die entsprechende Kennzahl aus.

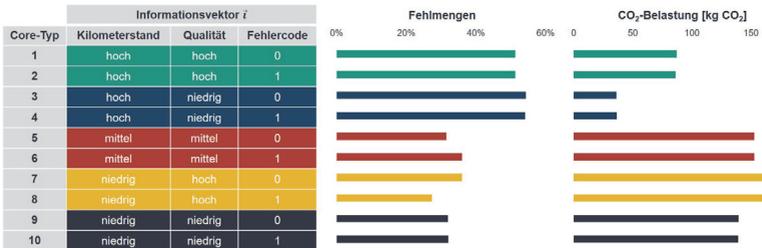


Abbildung 6.16: Auswertung des konstanten Informationsvektors \vec{i} in Bezug auf Fehlmengen und CO₂-Belastung.

Die Darstellung fokussiert sich auf diejenigen Kombinationen des Informationsvektors \vec{i} , die besonders interessante Ergebnisse zeigen. Für nicht dargestellte Kombinationen (z. B. hoher Kilometerstand, mittlere Qualität) ergeben sich keine ergänzenden Erkenntnisse. Somit wurden für den konstanten Informationsvektor \vec{i} zehn unterschiedliche Eigenschaftskombinationen identifiziert, deren Informationsausprägungen in Abbildung 6.16 links dargestellt sind. Im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung wird somit jedem Core vom Typ 1 ein hoher Kilometerstand und eine hohe Qualität zugeteilt sowie der Fehlercode nicht erhoben. In Fällen, in denen der Fehlercode erhoben wird (z. B. Core-Typ 2), hat dieser eine mittlere Auswirkung auf die Regenerationsrate (vgl. Tabelle 6.2). Sowohl der Kilometerstand als

auch die allgemeine Qualität werden hingegen immer erhoben, allerdings in unterschiedlichen Ausprägungen. Innerhalb derselben Farbkombination in Abbildung 6.16 wurde dabei jeweils nur die Aufnahme des Fehlercodes variiert, um einen direkten visuellen Vergleich zu ermöglichen.

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, werden die Fehlmengen (bzw. die Liefertreue) insbesondere von einem hohen Kilometerstand beeinflusst. Die Core-Typen 1-4 führen insgesamt mit durchschnittlich 52,50 % zu den höchsten Fehlmengen. Im Vergleich dazu scheint eine niedrige allgemeine Qualität nicht den gleichen Effekt auf die Fehlmengen aufzuweisen, da sich die Werte hierfür zwischen den Core-Typen 7-8 sowie 9-10 kaum unterscheiden, obwohl die Qualität zwischen den beiden extremen Ausprägungen variiert wird. Beim Vergleich der Core-Typen mit einem schlechten Kilometerstand und einer guten Qualität (1-2) sind die Fehlmengenanteile durchschnittlich deutlich höher (51 %) als bei einem geringen Kilometerstand und einer schlechten Qualität (9-10, 32 %). Somit kann darauf geschlossen werden, dass die Fehlmengen (bzw. die Liefertreue) sensibler gegenüber der Informationsaufnahme des Kilometerstands als der Qualität reagieren.

Die Analyse der Aufnahme des Fehlercodes führt im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen zu keinen deutlichen Veränderungen mehr. Lediglich zwischen Core-Typen 5 und 6, d. h. bei mittlerem Kilometerstand und mittlerer Qualität, sowie zwischen Core-Typen 7 und 8, d. h. bei niedrigem Kilometerstand und hoher Qualität, lässt sich ein Unterschied erkennen. Auffällig ist dabei, dass dies insbesondere diejenigen Fälle sind, in denen der Kilometerstand ohnehin keine bzw. nur eine geringe Rolle spielt und die Qualität eine vorteilhafte Ausprägung besitzt. In diesen Fällen werden die Cores somit ohnehin seltener aufgrund ihres Kilometerstands oder der Qualität aussortiert bzw. die Aufarbeitung ist mit höherer Wahrscheinlichkeit erfolgreich, sodass nur dann ein größerer Effekt der Aufnahme des Fehlercodes erkennbar ist. Insgesamt reagieren die Fehlmengen (bzw. die Liefertreue) somit robust gegenüber der Aufnahme des Fehlercodes.

Für die CO₂-Belastung ergibt sich ein klares Bild: Innerhalb der Variation des Fehlercodes ergeben sich kaum Änderungen in der Umweltbelastung. Auch hier hat die Aufnahme des Fehlercodes somit wenig Einfluss auf die CO₂-Belastung. Analog zu den Fehlmengen lässt sich hier lediglich eine kleine Veränderung zwischen den Core-Typen 7 und 8 erkennen (163,51 kg CO₂ bzw. 160,30 kg CO₂), was sich wiederum auf die Kombination der Ausprägungen von Kilometerstand und Qualität zurückführen lässt, wodurch der Fehlercode einen stärkeren Einfluss hat. Zwischen den Variationen des Fehlercodes hingegen lassen sich eindeutige Unterschiede erkennen. Die Kennzahl der CO₂-Belastung ist somit sehr sensitiv gegenüber der Aufnahme von Kilometerstand und Qualität. Beim Vergleich der Core-Typen 3-4 (hoher Kilometerstand, niedrige Qualität) gegenüber den Core-Typen 7-8 (niedriger Kilometerstand,

hohe Qualität) ist dabei der größte Unterschied zu erkennen (36,27 kg CO₂ bzw. 163,51 kg CO₂). Entsprechend der bereits zuvor identifizierten höheren Sensitivität der Fehlmengen gegenüber dem Kilometerstand als gegenüber der Qualität kann diese Schlussfolgerung auch für die CO₂-Belastung getroffen werden. Während die CO₂-Belastung für Core-Typen mit mittlerem oder niedrigem Kilometerstand noch bei durchschnittlichen 152,00 kg CO₂ liegt, ist dieser Wert für einen hohen Kilometerstand nur bei durchschnittlich 61,75 kg CO₂. Diese drastische Reduktion der CO₂-Belastung lässt sich damit begründen, dass die Wahrscheinlichkeit mit der Cores mit einem hohen Kilometerstand frühzeitig ausgeschleust werden, da sie ohnehin nicht für das Remanufacturing geeignet sind, deutlich höher ist und somit unnötige Transporte vermieden werden. Gleichzeitig fällt beim Vergleich der Core-Typen 1-2 mit 9-10 auf, dass die Umweltbelastung unter einer niedrigen Qualität deutlich höhere Werte annimmt als bei einem schlechten (hohen) Kilometerstand, da die Qualität der Cores erst am Sammelstandort aufgenommen wird und somit der Transport von den Werkstätten zu diesen schon stattgefunden hat, während im letzteren Fall Cores bereits bei Werkstätten frühzeitig ausgeschlossen werden können.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die Aufnahme der Informationen hinsichtlich Kilometerstand und Qualität sowohl auf die Liefertreue als auch auf die CO₂-Belastung den größten Effekt haben. Die Aufnahme des Fehlercodes hat hingegen einen kaum messbaren Mehrwert. Die Beobachtung, dass die Fehlmengen sensitiver gegenüber der Informationsaufnahme des Kilometerstands als der Qualität reagiert, bestätigen auch Erkenntnisse aus bisheriger Forschung: Da der Kilometerstand bereits in den Werkstätten erhoben wird, die Qualität jedoch erst an den Sammelstandorten, ist eine frühzeitige Informationsaufnahme von Vorteil (vgl. Abbey & Guide 2018).

6.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Entsprechend dem in Kapitel 5 vorgestellten Ansatz erfolgt im letzten Schritt die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Hierzu werden die in Kapitel 6.4 bislang separat voneinander betrachteten, ökonomischen und ökologischen Kennzahlen entsprechend des Konzepts der Ökoeffizienz als übergeordneten Rahmen gemeinsam betrachtet und bewertet (vgl. Kapitel 5.3.3).

Da die Zielgrößen und Prioritäten je nach Anwender des vorgestellten Konzepts unterschiedlich sein können, muss auch in der Ableitung der Handlungsempfehlungen eine entsprechende Flexibilität gewährleistet sein. Mittels integrierter Nutzwertanalyse wird dieser Flexibilität Rechnung getragen. Im vorliegenden Anwendungsfall gehen sowohl die ökonomischen Zielgrößen der Gesamtkosten und Liefertreue, als auch die ökologischen Zielgrößen der CO₂-Belastung sowie der Aufarbeitungsquote in die Bewertung der Ökoeffizienz ein. Um

zunächst einen allgemeinen und ungewichteten Überblick zu erhalten, stellt Abbildung 6.17 zunächst die jeweils beste Bestellpolitik in Bezug auf die jeweilige Kennzahl in Abhängigkeit des Stückzahlenszenarios sowie des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Identifikation der besten Bestellpolitiken für die Kennzahlen Gesamtkosten, Liefertreue und Aufarbeitungsquote stark miteinander korrelieren und bis auf wenige Ausnahmen gleich verlaufen. Insbesondere kann hinsichtlich dieser drei Kennzahlen für das Stückzahlenszenario Nachfrageüberschuss die (t,S)-Politik, für das Nachfrage-Angebot-Matching die (t,S)- und SM-Politik sowie für den Coreüberschuss die (s,S)- und SM-Politik als am vorteilhaftesten identifiziert werden. Für die Kennzahl CO₂-Belastung ergibt die Analyse ein anderes Bild: Für den Nachfrageüberschuss kann hierbei prinzipiell die SM-Heuristik als beste Bestellpolitik identifiziert werden, sofern ein Informationsaustausch und eine Werkstattanbindung existieren. Für das Nachfrage-Angebot-Matching lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen, hier gibt es somit viele Wechsel zwischen den Bestellpolitiken. Im Coreüberschuss fällt die (t,q)-Politik auf, da sie insbesondere im mittleren Bereich der Werkstattanbindung die besten Werte hinsichtlich der CO₂-Belastung erreicht.

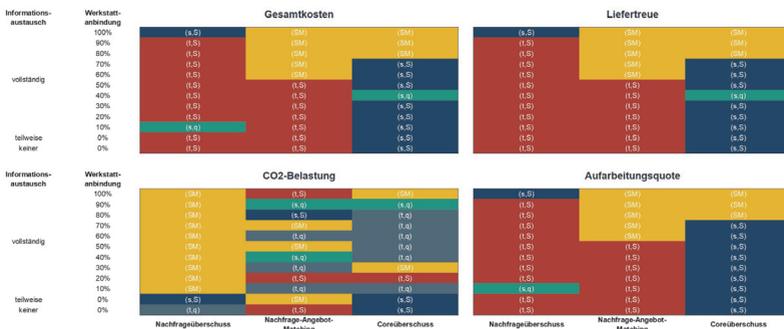


Abbildung 6.17: Identifikation der besten Bestellpolitik für jede Kennzahl in Abhängigkeit des Stückzahlenszenarios und Informationsaustauschs.

Die für die Nutzwertanalyse notwendige, spezifische Gewichtung innerhalb des untersuchten Anwendungsfalls wurde in Workshops mit Industriepartnern festgelegt und wird im Folgenden beispielhaft zur Validierung des vorgestellten Ansatzes verwendet. Dabei ergibt sich für die Gesamtkosten die höchste Gewichtung von 40 %, für die Liefertreue von 20 %, für die CO₂-Belastung von 30 % und für die Aufarbeitungsquote von 10 %. Insgesamt sind somit die ökonomischen Kennzahlen mit 60 % leicht überbewertet gegenüber den ökologischen Kennzahlen mit insgesamt 40 %. Zur Vergleichbarkeit der untersuchten, echtzeitfähigen Bestellpolitiken werden diese in jedem Stückzahlenszenario und in jedem Informationsaustauschszenario entsprechend den vier genannten Kennzahlen in eine eindeutige Rangfolge

von 1 bis 5 gebracht, wobei die höchste Punktzahl jeweils für die beste Bestellpolitik vergeben wird. Die Multiplikation des jeweiligen Rangs mit der entsprechenden Gewichtung ergibt schließlich die Gesamtbewertung. Tabelle 6.6 stellt das Ergebnis der Nutzwertanalyse beispielhaft für das Stückzahlenszenario Coreüberschuss und einen vollständigen Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung dar. Entsprechend der analysierten Ergebnisse (vgl. Kapitel 6.4.1) erreicht in diesem Szenario die SM-Heuristik die besten Ergebnisse hinsichtlich aller untersuchten Kennzahlen, die (s,S)-Politik folgt hinsichtlich Gesamtkosten, Liefertreue und Aufarbeitungsquote mit den jeweils zweitbesten Ergebnissen und bekommt somit den Rang 4 hierfür zugewiesen. Insgesamt ergibt sich somit für jede Bestellpolitik eine Gesamtbewertung, wobei im vorliegenden Fall die SM-Heuristik am besten angesehen werden kann.

Tabelle 6.6: Beispielhafte Nutzwertanalyse zur Berechnung der Ökoeffizienz der einzelnen Bestellpolitiken am Beispiel des Coreüberschusses bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.

Kennzahl	Gewichtung	Bestellpolitik				
		(s,q)	(s,S)	SM	(t,q)	(t,S)
Gesamtkosten	0,4	3	4	5	2	1
Liefertreue	0,2	3	4	5	1	2
CO ₂ -Belastung	0,3	2	1	5	3	4
Aufarbeitungsquote	0,1	3	4	5	1	2
Gesamtbewertung		2,7	3,1	5	2	2,2

Diese Gesamtbewertung kann somit als Wert für die Ökoeffizienz angenommen werden und für alle Kombinationen von Stückzahlenszenarien und Graden des Informationsaustauschs sowie der Werkstattanbindung bestimmt werden. Abbildung 6.18 stellt die entsprechenden Ergebnisse dar und präsentiert somit die resultierenden Handlungsempfehlungen.

Um ein aussagekräftiges, übersichtliches Verlaufsschaubild und damit eine sinnvolle, pragmatische Entscheidungsunterstützung zu ermöglichen, wird in sieben Fällen statt der besten die zweitbeste Bestellpolitik hinsichtlich des Nutzwerts der Ökoeffizienz dargestellt. Die relative Abweichung vom theoretischen Optimum beträgt dabei lediglich 2,53 %, sodass weiterhin eine gute Gesamteffizienz gewährleistet ist. Die originale, unbereinigte Darstellung ist in Anhang A11.1 ergänzt. Somit ergeben sich übersichtliche Cluster, die dem Anwender bei der Gestaltung der MRP in Abhängigkeit des vorliegenden Stückzahl- und Informationsaustauschszenarios die Verwendung einer Bestellpolitik vorschlagen. Dabei ist für den nicht und teilweise vorhandenen Informationsaustausch im Nachfrage- sowie Coreüberschuss die (s,S)-Politik dominierend, während im Nachfrage-Angebot-Matching die (t,S)-Politik die besten Ergebnisse zeigt. Für den Status Quo der im vorliegenden Anwendungsfall untersuchten RL

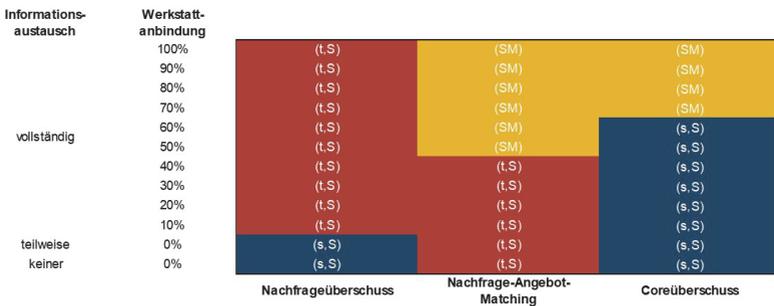


Abbildung 6.18: Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit des untersuchten Stückzahlenszenarios, Informationsaustauschs und Werkstattanbindung nach Bewertung der Ökoeffizienz mittels Nutzwertanalyse.

müsste die MRP somit je Stückzahlenszenario des entsprechend betrachteten Produkttyps angepasst werden. Für den teilweise vorhandenen Informationsaustausch, d. h. die Anbindung der Sammelstandorte, müsste aus Sicht des fokalen Remanufacturing-Unternehmens der organisatorische und monetäre Aufwand zur Anbindung der Sammelstandorte an ein entsprechendes Informationsmanagementsystem gegenüber dem organisatorischen Aufwand aufgrund der Verwendung unterschiedlicher MRP-Strategien abgewogen werden.

In einer RL mit einem vollständigen Informationsaustausch verhalten sich die optimalen Bestellpolitiken je nach Stückzahlenszenario und Ausprägung der Werkstattanbindung unterschiedlich. Im Bereich der niedrigen Werkstattanbindung, d. h. zwischen 10 % und 40 % Werkstattanbindung, dominieren die (t,S)- und (s,S)-Politiken. Dabei stellt im Nachfrageüberschuss sowie im Nachfrage-Angebot-Matching die (t,S)-Politik und im Coreüberschuss die (s,S)-Politik die beste Wahl dar. Dementsprechend lässt sich festhalten, dass im Bereich der niedrigen Werkstattanbindung, d. h. einer weiterhin hohen Unsicherheit hinsichtlich der zurückfließenden Cores und deren Eigenschaften, eine variable Bestellmenge q_{kom} und die Auffüllung der komponentenspezifischen Lager auf den Ziellagerbestand S_{kom} als vorteilhaft anzusehen ist. Durch die geeignete Wahl des Ziellagerbestands und eines ggfs. zu bestimmenden Sicherheitsfaktors a_{kom} wird somit sichergestellt, dass ausreichend Komponenten vorhanden sind, um die Nachfrage trotz unsicheren Rückflusses zu bedienen. Im Nachfrageüberschuss sowie im Nachfrage-Angebot-Matching ist dabei ein diskretes Überwachungsintervall T'_{kom} so zu bestimmen, dass es einerseits kurz genug ist, um Fehlmengen zu vermeiden, und andererseits lang genug, um zu viele Bestellungen bzw. einen zu hohen Lagerbestand zu vermeiden.

Im Bereich von 50 % bis 60 % Werkstattanbindung bleibt die (t,S)-Politik im Nachfrageüberschuss bzw. die (s,S)-Politik im Coreüberschuss unverändert die beste Wahl. Im Nachfrage-Angebot-Matching hingegen erreicht die SM-Heuristik die besten Ökoeffizienz-Werte. Die SM-Heuristik führte bereits hinsichtlich der Kosten und Liefertreue im Coreüberschuss zu den besten sowie in der CO₂-Belastung und der Aufarbeitungsquote zu sehr guten Ergebnissen, womit auch die Ergebnisse hinsichtlich der Ökoeffizienz in diesen Bereichen erklärt werden können.

Im Bereich von 70 % und höherer Werkstattanbindung wechselt auch im Coreüberschuss die optimale Bestellpolitik auf die SM-Heuristik, während diese im Nachfrage-Angebot-Matching bereits optimal war. Im Nachfrageüberschuss bleibt die (t,S)-Politik weiterhin die beste Alternative. Somit kann der organisatorische Aufwand bzgl. einer MRP-Umstellung reduziert werden. In diesem Bereich der Werkstattanbindung ist somit in keinem Stückzahlenszenario mehr eine kontinuierliche Bestandsüberwachung notwendig, was den organisatorischen Aufwand erneut reduzieren könnte. Es stehen somit ausreichend Informationen zur Verfügung, um durch die geeignete Wahl des Überwachungsintervalls T'_{kom} zu den besten Ergebnissen in Bezug auf die Ökoeffizienz zu gelangen. Aufgrund der weitreichenden Anbindung und der damit hohen Bekanntheit über aktuelle Rückflüsse bzw. künftige Bedarfe wird bei der SM-Heuristik das Abbruchkriterium seltener erreicht bzw. Bestellmengen können präziser berechnet werden, wodurch sich die gute Performance der SM-Heuristik hier ergibt. Insgesamt fällt auf, dass die (t,q)- und (s,q)-Politiken in keinem der untersuchten Szenarien für die entsprechend der Nutzwertanalyse gewichteten Kennzahlen der Ökoeffizienz als optimale Bestellpolitik auftritt und dementsprechend als nicht wettbewerbsfähig für die betrachtete RL angesehen werden kann.

Zur weiteren Analyse der abgeleiteten Handlungsempfehlungen wird im nächsten Schritt das PROMETHEE-Verfahren angewendet, um schwache Präferenzen, Unvergleichbarkeiten sowie Insensitivitätsintervalle abzuleiten und somit die Robustheit der ermittelten Lösung zu untersuchen. Analog zur Nutzwertanalyse wird zunächst am Beispiel des Coreüberschusses bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung die Bestimmung der Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse gezeigt (vgl. Tabelle 6.7). Anhang A11.2 zeigt die Visualisierung dieser Berechnung. Wie zu erkennen, weist die SM-Heuristik für diese Ausprägung den höchsten Ausgangs- und niedrigsten Eingangsfluss auf, woraus wiederum der höchste Nettofluss im Vergleich zu den anderen Bestellpolitiken resultiert. Umgekehrt hat die (t,q)-Politik den geringsten Nettofluss. Diese beispielhafte Analyse zeigt, dass im Coreüberschuss mit 100 % Werkstattanbindung keine schwachen Präferenzen vorliegen und die Vergleichbarkeit der SM-Heuristik mit den anderen Bestellpolitiken gegeben ist.

Tabelle 6.7: Bestimmung der Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse der PROMETHEE-Methode für jede Bestellpolitik am Beispiel des Coreüberschusses bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.

$\Pi_{h_{ij}, h_{kj}}$	(s,q)	(s,S)	SM	(t,q)	(t,S)	Ausgangsfluss ϕ_i^{out}	Nettofluss ϕ_i^{net}
(s,q)	0	0,3	0	0,7	0,7	1,7	-0,6
(s,S)	0,7	0	0	0,7	0,7	2,1	0,2
SM	1	1	0	1	1	4	4
(t,q)	0,3	0,3	0	0	0,4	1	-2
(t,S)	0,3	0,3	0	0,6	0	1,2	-1,6
Eingangsfluss ϕ_i^{in}	2,3	1,9	0	3	2,8		

Ergänzend zu diesen Berechnungen können als Ergebnis der PROMETHEE-Methode sog. Insensitivitätsintervalle dargestellt werden. Beispielhaft werden diese in Abbildung 6.19 für das Stückzahlzenario Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 70 % Werkstattanbindung untersucht. Im Gegensatz zur Werkstattanbindung von 100 %, bei der die SM-Heuristik über alle Kennzahlen und deren jeweilige Gewichtung klar dominiert, kann es bei 70 % zu Wechseln in der Wahl der optimalen Bestellpolitik je nach Gewichtung der einzelnen Kennzahlen kommen. So führt beispielsweise eine leicht erhöhte Gewichtung der Gesamtkosten, Liefertreue oder Aufarbeitungsquote dazu, dass die (s,S)-Politik über die SM-Heuristik präferiert wird. Hinsichtlich der CO₂-Belastung hingegen führt eine geringere Gewichtung ebenfalls zur Präferenzierung der (s,S)-, eine höhere Gewichtung dieser jedoch zur (t,q)-Politik.

Somit können für die unterschiedlichen Stückzahlzenarien und Grade des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung diejenigen Intervalle bestimmt werden, in denen eine Verschiebung der Gewichtung der Kennzahlen nicht zu einer Änderung der präferierten Bestellpolitik führt. Die Analyse und Darstellung aller Fälle ist in Anhang A11.3-A11.5 dargestellt. Dabei lässt sich festhalten, dass die in Abbildung 6.18 identifizierten, optimalen Bestellpolitiken in den meisten Fällen sehr robust gegenüber Änderungen in der Gewichtung der Kennzahlen sind. Lediglich in einzelnen Fällen kommt es zu Verschiebungen, wobei diese meistens ohnehin in angrenzenden bzw. benachbarten Gebieten sind, z. B. der Präferenzwechsel im Coreüberschuss bei 70 % Werkstattanbindung von der SM- auf die (s,S)-Politik.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wahl einer passenden Bestellpolitik von den untersuchten Stückzahlzenarien und Graden des Informationsaustauschs abhängt und durch eine Anpassung des Systems, z. B. durch die Erhöhung des Grads der Werkstattanbindung, teilweise auch Änderungen in der MRP notwendig werden. Für bestimmte Abschnitte bzgl. des Grads der Werkstattanbindung sind die identifizierten Bestellpolitiken jedoch größtenteils robust gegenüber Präferenzänderungen, wodurch der organisatorische

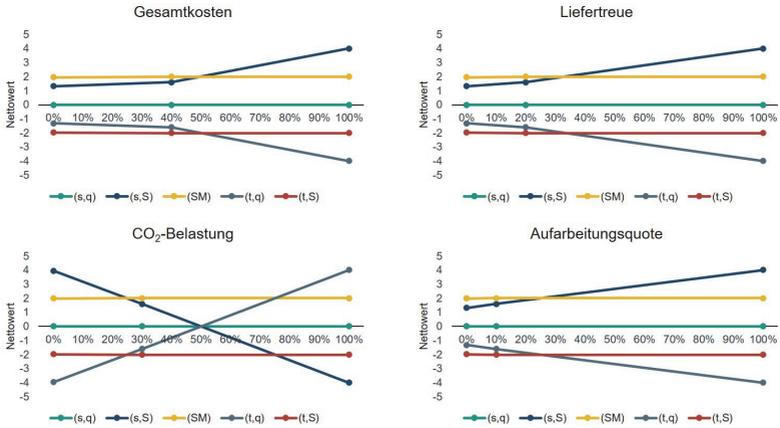


Abbildung 6.19: Insensitivitätsintervalle der untersuchten Kennzahlen für die Bestellpolitiken im Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 70 % Werkstattanbindung.

Aufwand der Anpassung der MRP reduziert werden kann. Idealerweise überprüft das fokale Remanufacturing-Unternehmen das vorliegende Stückzahlenszenario des untersuchten Produkttyps und wechselt bei Bedarf die verwendete Bestellpolitik, um das volle Potential auszuschöpfen.

7 Diskussion und Ausblick

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Reflexion des entwickelten Lösungsansatzes zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik (RL) für die Optimierung der Materialbedarfsplanung (MRP) im Remanufacturing. Hierfür wird der Ansatz zunächst anhand der in Kapitel 3.1 vorgestellten Anforderungen kritisch diskutiert (Kapitel 7.1) und anschließend ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungen im relevanten Themengebiet gegeben (Kapitel 7.2).

7.1 Diskussion und kritische Würdigung

Entsprechend der Herausforderungen, dass die Auswirkungen eines erhöhten Informationsaustauschs in der RL auf nachgelagerte Planungs- und Steuerungsaufgaben im Remanufacturing, insbesondere auf die MRP, bislang nur unzureichend betrachtet wurden, präsentiert der vorliegende Ansatz im Rahmen der vorgestellten Beschreibungsmodelle eine ganzheitliche Modellierung bestehend aus den Strukturen, Beziehungen und dem Verhalten der beteiligten Akteure in der RL, dem Informationsaustausch sowie der MRP. In Kombination mit der entwickelten simulationsbasierten Optimierung, wodurch Dynamiken und Unsicherheiten adäquat abgebildet werden, wird die Ableitung von Wirkzusammenhängen und Handlungsempfehlungen ermöglicht. Dies leistet gleichermaßen einen Beitrag für das im Rahmen von Kapitel 3 vorgestellte Forschungsdefizit (vgl. Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: *Erfüllungsgrad der an den Lösungsansatz gestellten Anforderungen.*

	Problemstellung und Netzwerkstruktur		Informationsaustausch und Transparenzsteigerung			Materialbedarfsplanung im Remanufacturing			Methodik und Abbildung von Wirkzusammenhängen		
Planungshorizont der Problemlösung (A1)	●		●			●			●		
Mehrfachigkeit der Rückführungslogistik (A2)	●		●			●			●		
Mehrstufiger Informationsaustausch (A3)	●		●			●			●		
Mehrere Informationsausprägungen (A4)	●		●			●			●		
Berücksichtigung der Informationsaufnahme (A5)	●		●			●			●		
Berücksichtigung dynamischer Regenerationsraten (A6)	●		●			●			●		
Einfluss produkt spezifischer Informationen (A7)	●		●			●			●		
Einbeziehung der zugrundeliegenden Produktstruktur (A8)	●		●			●			●		
Strategie der Aufarbeitung (A9)	●		●			●			●		
Dynamisches System (A10)	●		●			●			●		
Modellierung von Unsicherheiten (A11)	●		●			●			●		
Multikriterielle Bewertung (A12)	●		●			●			●		
Lösungsansatz	mittel-fristig								beide		

○ Teilweise erfüllt ◐ Größtenteils erfüllt ● Voll erfüllt

Aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung und Modellierung ermöglicht die entwickelte Methode ein bislang nicht vorhandenes, umfassendes Systemverständnis im Kontext der Transparenzsteigerung in der RL zu erlangen und gewährleistet dadurch nicht nur die Erfüllung der zu Beginn identifizierten Anforderungen, sondern leistet gleichzeitig einen wesentlichen Beitrag bei dem Übergang der linearen zu einer ressourceneffizienten und resilienten Kreislaufwirtschaft.

Der Detaillierungsgrad der Modellierung wurde dabei auf ein dem Planungshorizont entsprechendes, sinnvolles Maß umgesetzt. Durch die Fokussierung auf die MRP liegt die Problemstellung zeitlich im mittelfristigen Bereich, was insbesondere durch den Abstraktionsgrad der modellierten Akteure und Prozesse sowie die abgebildeten Kennzahlen widergespiegelt wird. Im Kontext des AA wurde zudem eine mehrstufige RL modelliert, welche alle wertschöpfenden Stufen umfasst (vgl. Kapitel 5.1). Mittels der strukturierten Vorgehensweise, d. h. ausgehend von einer systematischen Identifikation möglicher Core-Quellen Materialflüsse abzuleiten und anschließend eine holistische Modellierung der einzelnen Elemente vorzunehmen, ist auch ein Übertrag auf Industrien und Branchen außerhalb des in der vorliegenden Arbeit fokussierten AA möglich.

Hinsichtlich des modellierten Informationsaustauschs und der damit einhergehenden Transparenzsteigerung in der RL wurde, analog zum Materialfluss, ein mehrstufiger Informationsfluss modelliert, der ebenfalls alle wertschöpfenden Stufen im AA umfasst und jeder dieser Stufen eine klare Rolle hinsichtlich der Informationsaufnahme bzw. -verarbeitung zuweist (vgl. Kapitel 5.2). Aufgrund der ohnehin hohen Komplexität und Unsicherheiten in der modellierten RL bzw. dem darin enthaltenen Informationsaustausch wurden im Rahmen der anwendungsfall-spezifischen Erprobung Vereinfachungen hinsichtlich der Abbildung mehrerer Informationsausprägungen getroffen. Die resultierende Einteilung in verschiedene Ausprägungsklassen war jedoch einerseits notwendig, um die MRP mit diskreten und vergleichbaren Werten zu erproben, und andererseits gleichermaßen zielführend, um die Realisierbarkeit der Grundidee der vorgestellten Methode zu zeigen. Zudem kann zwar das Vorgehen zur Identifikation von produktspezifischen Informationen, die einen Einfluss auf relevante Planungsaufgaben wie z. B. die MRP haben, als allgemeingültig betrachtet werden (vgl. Kapitel 5.2), allerdings ist die Übertragbarkeit dieser Informationen auf Branchen außerhalb des AA nicht trivial und bedarf somit weiterer Untersuchungen. Die Informationsaufnahme hingegen wird sowohl im theoretischen Modell, als auch in der praktischen Erprobung vollumfänglich berücksichtigt. Diese wird sowohl örtlich, als auch hinsichtlich des notwendigen Zeit- bzw. Kostenaufwands modelliert und somit adäquat einbezogen (vgl. Tabelle 7.1). Jedoch bleiben die einmaligen Konfigurationskosten für die Anpassung der RL (z. B. zur Anbindung der Werkstätten an den Informationsaustausch) in dem betrachteten Konzept unberücksichtigt. Diese Einschränkung ist in Hinblick auf den fokussierten, mittelfristigen Planungshorizont allerdings vertretbar.

Mit Hilfe des steigenden Informationsaustauschs in der RL wird die MRP für notwendige Neukomponenten verbessert. Dabei kommt das in dieser Arbeit neu entwickelte Konzept sog. dynamischer Regenerationsraten erstmalig zur Anwendung (vgl. Kapitel 5.3). Dieses Konzept macht sich die Fortschritte in der Digitalisierung und der digitalen Nachverfolgbarkeit einzelner Produkte zu nutze und bestimmt für jede Produktinstanz bzw. darin enthaltene Komponenten

eine individuelle Wahrscheinlichkeit, mit der die jeweils betrachtete Komponente erfolgreich im Remanufacturing genutzt werden kann. Dabei erweitert die vorliegende Arbeit in dieser Hinsicht den existierenden Stand der Forschung, indem nicht mehr nur zusammenfassende Qualitätsklassen gebildet werden, die einer gewissen Ungenauigkeit unterliegen. Stattdessen ist es mit Hilfe der dynamischen Anpassung der Regenerationsrate möglich, neu aufgenommene Produktinformationen instanzindividuell zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Einflüsse produktspezifischer Informationen sowie der Einbeziehung der zugrundeliegenden Produktstruktur muss jedoch kritisch hinzugefügt werden, dass eine vollständige Zielerreichung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich war (vgl. Tabelle 7.1). Zwar wurden für den AA relevante produktspezifische Informationen von Cores identifiziert, jedoch konnten die Ausprägungen dieser ebenso wie die konkreten Auswirkungen auf die dynamische Regenerationsrate der modellierten Produkte bzw. Komponenten lediglich abgeschätzt und von Experten validiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die im Anwendungsfall untersuchte RL in einem so frühen Stadium ist, dass bislang keine produktspezifischen Informationen aufgenommen bzw. geteilt werden, standen zur Erprobung auch entsprechende Realdaten nicht zur Verfügung. Hinsichtlich der Strategie der Aufarbeitung können die von Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. (2018) erlangten Erkenntnisse bzgl. der Vorteilhaftigkeit einer *Pull*-Strategie für die Aufarbeitung bestätigt werden. Zur Abbildung realitätsnaher Zusammenhänge wurde jedoch der Rückfluss der Cores als *Push*-System modelliert, wobei die Entkopplung der beiden Systeme am Remanufacturing-Standort erfolgt. Diese Kombination ermöglicht somit die Nutzung der Vorteile beider Systeme.

Mit Blick auf die in der vorliegenden Arbeit verwendete Methodik sowie die Identifikation von Wirkzusammenhängen wurde mit Hilfe einer modularen und flexiblen Implementierung eines simulationsbasierten Optimierungsmodells sichergestellt, dass die zuvor modellierten Prozesse und Zusammenhänge dynamisch abbildet (vgl. Kapitel 5.4). Ebenso kann über die Simulation die im System bzw. in dessen Teilsystemen enthaltene Stochastik bereits gut abgebildet werden. Durch die Flexibilität in der Implementierung der simulationsbasierten Optimierung können darüber hinaus die für das Remanufacturing typischen, multidimensionalen Unsicherheiten berücksichtigt werden. So werden bspw. die Unsicherheiten hinsichtlich der Qualität der Cores über die dynamische Regenerationsrate ihrer Komponenten abgebildet. Dabei hat sich für die Bestimmung der Häufigkeitsverteilungen der unterschiedlichen Merkmale die von Zikopoulos (2017) vorgeschlagene Verwendung der Beta-Binomialverteilung auch im vorliegenden Anwendungsfall als angemessen und gleichzeitig flexibel anpassbar herausgestellt, wohingegen die Auswirkungen der Informationsausprägungen mit Hilfe von Experten geschätzt wurden. Zur Berücksichtigung der im Remanufacturing typischen Unsicherheiten hinsichtlich Anzahl und Zeitpunkt der zurückfließenden Cores wurden im Rahmen der Erprobung einerseits drei unterschiedliche Stückzahlzenarien untersucht, die repräsentative

Phasen im Remanufacturing-Lebenszyklus nachbilden. Andererseits wurden die Quellen der Cores anhand von NUTS 2-Regionen in der EU modelliert, die eine annähernd gleichverteilte Bevölkerungsanzahl haben, wodurch auch die Gesamtstückzahl gleichverteilt auf die Regionen aufgeteilt werden kann. Durch die geographische Verteilung dieser NUTS 2-Regionen wird zudem die Transportdauer und die damit einhergehende zeitliche Verzögerung vom Eintreffen eines Cores in einer Werkstatt bis zum Remanufacturing berücksichtigt. Dieses Vorgehen lässt sich flexibel anpassen und somit auf andere Anwendungsfälle übertragen, in denen z. B. die NUTS 2-Regionen eine alternative Core-Quelle darstellen oder ein anderes Abstraktionslevel der NUTS-Regionen gewählt wird. Ebenso sind die verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen flexibel anpassbar. Hinsichtlich der multikriteriellen Bewertung der identifizierten Wirkzusammenhänge wurden entsprechend des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Konzepts der Ökoeffizienz ökonomische und ökologische Kennzahlen eingeführt und im Rahmen der beispielhaften Erprobung ausgewertet. Mit Hilfe einer flexiblen Gewichtung der Nutzwertanalyse können zudem anwenderspezifische Präferenzen berücksichtigt werden. Das in der Literatur im Kontext von Nachhaltigkeit üblicherweise verwendete Konzept der "Triple-Bottom-Line" (vgl. Barbier 1987, S. 104) inkludiert neben diesen Dimensionen zusätzlich die soziale Nachhaltigkeit, welche im vorliegenden Ansatz jedoch unberücksichtigt bleibt. Darüber hinaus erfolgt zwar die multikriterielle Bewertung bzw. der Vergleich der ermittelten Lösungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand von ökonomischen und ökologischen Kennzahlen, die Entscheidungsfindung der MRP (d. h. die Bestimmung von Bestellmenge und -zeitpunkt) hingegen erfolgt entsprechend der klassischen Vorgehensweise und minimiert die involvierten Kosten, ohne dabei jedoch ökologische Auswirkungen zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 7.1).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der entwickelte und vorgestellte Lösungsansatz das Forschungsdefizit adressiert und die Forschungslücke daher schließt. Dennoch bestehen weiterhin Entwicklungs- und Verbesserungspotentiale sowohl an der entwickelten Methode im Speziellen, als auch am Vorgehen im Allgemeinen. Neben den bereits erläuterten Aspekten kann bspw. eine differenziertere Betrachtung hinsichtlich der Komponenteneigenschaften sowie die Verwendung unterschiedlicher Bestellpolitiken je Komponente oder Core während des selben Durchlaufs einer simulationsbasierten Optimierung untersucht werden. Darüber hinaus sollten die in der exemplarischen Erprobung verwendeten Parameter überprüft und angepasst werden, sobald Realdaten aus der Anwendung zur Verfügung stehen, um ggfs. weiteres Optimierungspotential zu identifizieren.

Nichtsdestotrotz wird durch eine weitgehend allgemeingültige Vorgehensweise sowie eine flexible Modellierung und Implementierung der erlangten Erkenntnisse ein klarer Fortschritt im untersuchten Bereich erzielt. Das neuartige Konzept der instanzindividuellen, dynamischen

Regenerationsraten kann darüber hinaus auch für weitere nachgelagerte Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL bzw. im Remanufacturing verwendet werden. Die Modellierung bzw. Kombination aus *Push*- und *Pull*-System ermöglicht zudem eine realitätsnahe Darstellung der Komplexität bei gleichzeitiger Optimierungsmöglichkeit des Remanufacturings selbst. Neben den wissenschaftlichen Fortschritten leistet der entwickelte Lösungsansatz zudem einen Mehrwert für die Praxis. Die in Kapitel 6.5 identifizierten und abgeleiteten Handlungsempfehlungen sind allgemein verständlich und können situationsspezifisch angewendet werden. Sie können zudem durch die einfach lesbaren und klaren Schaubilder verifiziert werden, wodurch die Authentizität und Akzeptanz der Ergebnisse verstärkt und der Übertrag in die Praxis wiederum erleichtert wird. Wie in Kapitel 5.3 erläutert kann die Arbeit als Grundlage für die (Weiter-) Entwicklung von ERP-Systemen genutzt werden, bspw. durch die Umsetzung der dynamischen Regenerationsraten oder durch die dynamische Anpassung der Parameter der verwendeten Bestellpolitik. Darüber hinaus findet zur Zeit im Rahmen des vorgestellten EU-Projekts DigiPrime die Entwicklung einer mobilen Anwendung statt, welche in Werkstätten und anderen Core-Quellen zur Aufnahme und Weitergabe von Informationen entsprechend des Modells aus Kapitel 5.2 zum Einsatz kommen soll. Auch ein Übertrag auf weitere Branchen außerhalb des AA, z. B. auf die Batterie-, Textil- oder Verbundwerkstoffbranche, ist im Rahmen des Projekts und der Erprobung angedacht, indem in diesen zunächst relevante Core-Quellen und produktspezifische Informationen identifiziert werden und anschließend analog eine entsprechende Modellierung vorgenommen wird.

7.2 Ausblick

Abgeleitet aus der Diskussion und kritischen Würdigung des entwickelten Lösungsansatzes ergeben sich für das Themengebiet der Transparenzsteigerung in der RL sowie der Optimierung der MRP für das Remanufacturing vielfältige Potentiale für weiterführende Forschungsarbeiten. Unter Berücksichtigung der Planungsaufgaben globaler Produktionsnetzwerke (vgl. Lanza & Ferdows et al. 2019) wird auf diese im Folgenden näher eingegangen. Abbildung 7.1 stellt die potentiellen, zukünftigen Arbeiten auf den Ebenen der Produktionsstrategie, der Netzwerkgestaltung sowie des Netzwerkmanagements dar.

Zunächst kann direkt an den vorgestellten Lösungsansatz anknüpfende Forschung im Netzwerkmanagement erfolgen. Neben den bereits erwähnten Erweiterungen, z. B. hinsichtlich der Anpassung der Bestellpolitiken zur Berücksichtigung ökologischer Faktoren als Optimierungsgröße (vgl. Battini & Persona et al. 2014), kann das Modell zudem um neue Bestell- und Lagerhaltungspolitiken erweitert werden. Dadurch können auch Prioritäten des Anwenders bei der MRP berücksichtigt werden, indem eine Gewichtung hinsichtlich der unterschiedlichen Optimierungsgrößen stattfindet. Dabei können neben dem klassischen EOQ-Modell auch datenbasierte Ansätze sowie der darauf aufbauende Einsatz von künstlicher Intelligenz zum

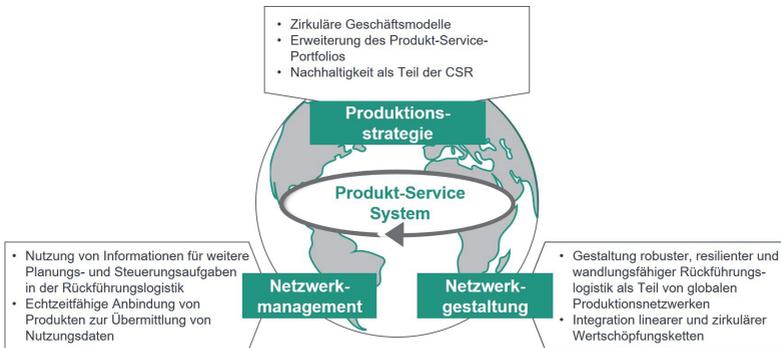


Abbildung 7.1: Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

Lernen aus diesen Daten herangezogen werden. Darüber hinaus können Prognosemodelle in das vorgestellte Modell integriert werden, um einerseits bei einem nicht oder nur teilweise vorhandenem Informationsaustausch dennoch eine gute MRP durchzuführen und andererseits die aufgenommenen Informationen anzureichern und die MRP dadurch zusätzlich zu verbessern.

Kapitel 2.1.2 stellt zudem vielfältige weitere Planungs- und Steuerungsaufgaben im Remanufacturing vor, die durch einen erhöhten Informationsaustausch in der RL optimiert werden können. Auf Ebene der kurzfristigen Steuerung bzw. des Netzwerkmanagements sei hierbei beispielhaft die Planung von Sammelrouten, die frühzeitige Bewertung und entsprechende Sortierung von Cores sowie das darauffolgende Scheduling genannt, die durch einen erhöhten Informationsaustausch profitieren können. Hierfür wird in Anhang A5.1 bereits ein erweitertes Rezeptormodell vorgestellt, welches den konkreten Nutzen von produktspezifischen Informationen für die Routenplanung aufzeigt. Darüber hinaus scheint die echtzeitfähige Anbindung von Produkten zur Übermittlung von Nutzungsdaten vielversprechend, um eine durchgehende Nachverfolgbarkeit bzw. *Traceability* zu gewährleisten. Dadurch können aufgenommene Informationen nicht nur noch früher für die nachgelagerten Planungs- und Steuerungsaufgaben verwendet werden, sondern es ist gleichzeitig eine Kopplung mit prädiktiven Algorithmen möglich, was wiederum Potentiale in der Geschäftsmodellgestaltung offenlegt, indem der Austausch von Produkten oder Komponenten proaktiv vorgeschlagen wird.

Im Bereich der Netzwerkgestaltung liegt zusätzlicher Forschungsbedarf in der Konfiguration robuster, resilienter und wandlungsfähiger RLs als Teil von globalen Produktionsnetzwerken. Erneut kann die in Anhang A5.1 vorgestellte Erweiterung des Rezeptormodells z. B. in Bezug

auf die Netzwerkconfiguration von Sammelstandorten verwendet werden. Ebenso sind im Rahmen der RL die Wahl und Gestaltung der Akquisitions- bzw. Sammlungsstrategie relevant und bedürfen weiterer Forschung. Relevante Forschungsarbeiten in diesem Bereich können somit zunächst den Fragen nachgehen, wie Robustheit, Resilienz und Wandlungsfähigkeit in Produktionsnetzwerken gemessen werden können und welcher Trade-Off entsteht. Neben den bisher in der Netzwerkgestaltung vorwiegend greifbaren Faktoren, verwendeten Zielgrößen bzw. Restriktionen spielen dabei insbesondere immaterielle bzw. nicht-greifbare Faktoren eine größere Rolle und sollten sowohl in der Gestaltung von Produktionsnetzwerken, als auch von einer effizienten RL berücksichtigt werden. Im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft kann zuletzt ein Fokus auf die Integration linearer und zirkulärer Wertschöpfungsketten gelegt werden. Interessante Forschungsfragen können dabei bspw. *Brownfield*- und *Greenfield*-Ansätze verknüpfen und untersuchen, inwiefern eine Integration einer neu aufzubauenden RL in die bestehenden Strukturen eines linearen Produktionsnetzwerks möglich und sinnvoll ist. In Kombination mit den zuvor genannten Forschungspotentialen kann zudem der Frage nachgegangen werden, inwiefern die Integration einer RL die Robustheit und Resilienz eines Produktionsnetzwerks steigert, z. B. indem im Falle von Lieferengpässen oder sonstigen Störungen auf die zirkulären Strukturen zurückgegriffen werden kann.

Abschließend können im Bereich der Produktionsstrategie neue, zirkuläre Geschäftsmodelle entwickelt werden, die die Rückführung von End-of-Life (EoL)-Produkten ermöglichen. Ergänzend hierzu kann eine Erweiterung des bestehenden Produkt-Service-Portfolios, z. B. durch das Angebot von *Leasing*-Möglichkeiten, die Rückführung von EoL-Produkten inklusive zugehöriger Produktinformationen erleichtern. Neben der Anpassung des Geschäftsmodells ist eine kontinuierliche Überprüfung zwischen Produktionsstrategie und Netzwerkgestaltung erforderlich, um die Harmonisierung dieser Bereiche auszurichten. Insbesondere die Wirkzusammenhänge zwischen dem gewählten Geschäftsmodell zur Rückführung von EoL-Produkten (vgl. Sundin & Dunbäck 2013) mit dem initialen Aufbau bzw. der Anpassung der Netzwerkconfiguration in der RL erscheint dabei aussichtsreich. Ebenfalls auf strategischer bzw. langfristiger Ebene kann eine Anpassung des Produktdesigns Potentiale hinsichtlich einer höheren Nachhaltigkeit bzw. einer einfacheren Umsetzung der Kreislaufwirtschaft entfalten. Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklung und Produktionstechnik können dabei in Form eines hochvernetzten Produkt-Produktions-CoDesigns in Hinblick auf verschiedene Problemstellungen der Kreislaufwirtschaft untersucht werden (vgl. Albers & Lanza et al. 2022). Zuletzt ist eine Verankerung der Zielgröße Nachhaltigkeit als Teil der gesellschaftlichen Unternehmensverantwortung (CSR) sowie die Durchdringung dieser strategischen Vorgaben in allen Unternehmensbereichen bzw. die Operationalisierung dieser notwendig.

8 Zusammenfassung

Hervorgerufen durch einen stetig steigenden Ressourcenverbrauch in den letzten Jahrzehnten sowie die Anfälligkeit von Wertschöpfungsketten durch externe Ereignisse sind die Grenzen der linearen *Take-Make-Use-Dispose*-Mentalität erreicht. Daher sind neuartige Produktionsmuster erforderlich, die diese Herausforderungen lösen können. Die Kreislaufwirtschaft, d. h. die Wieder- und Weiterverwendung von Produkten, Komponenten und Materialien, trägt einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen und zur Erhaltung des gesellschaftlichen Wohlstands bei. Der Wandel zur Kreislaufwirtschaft ist jedoch nicht trivial, da das heutige Wirtschaftssystem entscheidend vom linearen Modell geprägt ist.

Das Remanufacturing spielt eine zentrale Rolle in der Kreislaufwirtschaft, da es den höchsten Standard in Bezug auf Qualität und Werterhalt der Cores aufweist. Dabei spielt die effiziente Gestaltung und Steuerung der Rückführungslogistik eine entscheidende Rolle, um das Remanufacturing mit *End-of-Life*-Produkten zu versorgen. Trotz ökonomischer und ökologischer Einsparpotentiale durch das Remanufacturing steht die Umsetzung dessen bislang erst am Anfang. Dies lässt sich auf die vielfältigen Herausforderungen u. a. aufgrund der Vielzahl von Akteure in einem dezentralen und mehrstufigen System zurückführen. Eine im Remanufacturing relevante Planungsaufgabe ist die Materialbedarfsplanung, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Versorgung des Remanufacturings mit notwendigen Neukomponenten als Ersatz für nicht wiederverwendbare, gebrauchte Komponenten verstanden wird. Ein erhöhter Informationsaustausch und damit eine Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik kann als entscheidender Befähiger zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung angesehen werden.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die vorliegende Arbeit eine Methode zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik für die Optimierung der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing. Ausgehend von der Erarbeitung der Beschreibungsmodelle für den Material- und Informationsfluss in der Rückführungslogistik, die die mehrstufigen, komplexen Strukturen berücksichtigen, erfolgt die Gestaltung von echtzeitfähigen Bestellpolitiken für das Remanufacturing. Hierzu wird das Konzept der instanzindividuellen, dynamischen Regenerationsraten entwickelt, das auf Basis der in der Rückführungslogistik aufgenommenen Informationen die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der eine Komponente erfolgreich aufgearbeitet werden kann. Diese werden von den Bestellpunkt- und Bestellrhythmusverfahren sowie von der *Silver-Meal*-Heuristik verwendet, um die jeweils nächsten Bestellzeitpunkte und -mengen von Neukomponenten zu bestimmen. Zur Ermittlung der Güte wird das *Wagner-Whitin*-Verfahren verwendet, das als deterministisches Verfahren die theoretisch kostenoptimale Lösung ermittelt. Zum Vergleich wird ein Kennzahlensystem auf Basis der Ökoeffizienz entwickelt, das die

operativen Gesamtkosten und die Liefertreue als ökonomische sowie die CO₂-Belastung und die Aufarbeitungsquote als ökologische Kennzahlen einführt. Im Rahmen des Analysemodells erfolgt die Umsetzung in Form einer simulationsbasierten Optimierung. Dabei wird der Material- und Informationsfluss im Rahmen des Simulationsmodells umgesetzt, um die vorherrschenden Dynamiken und Unsicherheiten adäquat abzubilden. Die Implementierung der Materialbedarfsplanung erfolgt im Rahmen des Optimierungsmodells, das als Submethode in die Simulation integriert ist. Um aus dem erhöhten Informationsaustausch Wirkzusammenhänge auf die Materialbedarfsplanung zu identifizieren wird eine Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung sowie eine statistische Versuchsplanung entwickelt. Dabei werden Konzepte hinsichtlich *variierendem Informationsvektor \vec{i}* , *Benchmark-Läufen* und *konstantem Informationsvektor \vec{i}* vorgestellt sowie ein *Latin-Hypercube-Design* zur Reduktion des Versuchsaufwands bei gleichzeitiger Erhaltung der Aussagekraft entwickelt. Abschließend wird ein allgemeingültiges Vorgehen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen mit Hilfe einer Nutzwertanalyse und der PROMETHEE-Methode vorgestellt.

Die beispielhafte Validierung und Erprobung der entwickelten Methode erfolgt im Rahmen des *Automotive Aftermarkets*, in dem die Rückführung und Aufarbeitung von mechatronischen und elektronischen Produkten aus der automobilen Anwendung untersucht wird. Die Ergebnisse zeigen dabei erhebliche Einsparpotentiale durch die Verwendung einer geeigneten Bestellpolitik in Abhängigkeit des vorliegenden Stückzahlenszenarios sowie des Grads des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung auf. Prinzipiell weist dabei jede untersuchte Bestellpolitik Verbesserungen in den zugrundeliegenden Kennzahlen mit steigendem Grad des Informationsaustauschs auf, wobei diese je nach Bestellpolitik und Stückzahlenszenario unterschiedlich stark ausfallen. Insbesondere diejenigen Bestellpolitiken mit einer variablen Bestellmenge, d. h. die (t,S)- und (s,S)-Politiken, sowie die für Echtzeitfähigkeit angepasste SM-Heuristik, die ebenfalls eine variable Bestellmenge ermöglicht, liefern dabei hinsichtlich der Kennzahlen die besten Ergebnisse. Mit Hilfe der PROMETHEE-Methode lassen sich zudem Insensitivitätsintervalle ableiten, die zeigen, dass die identifizierte Lösung größtenteils sehr robust gegenüber Veränderungen in den Entscheidungspräferenzen sind.

Zusammenfassend schließt die entwickelte Methode die in der vorliegenden Arbeit identifizierte Forschungslücke einer Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten den Nutzen der produktspezifischen Informationen für weitere Planungs- und Steuerungsaufgaben, die Gestaltung integriert linearer und zirkulärer Wertschöpfungsketten sowie die Harmonisierung dieser mit zirkulären Geschäftsmodellen fokussieren.

Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A_<Name><Jahr>) beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die vom Verfasser der Dissertation angeleitet wurden.

A_Dressler 2023

Dressler, K.-U. (2023), „Simulationsbasierte Planung und Steuerung von Beschaffungsprozessen im Remanufacturing als Teil eines globalen Produktionsnetzwerks“. Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Eisen 2021

Eisen, S. (2021), „Entwicklung eines Konzepts für die Anwendung einer simulationsbasierten Optimierung in Remanufacturing-Netzwerken“. Masterarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Förster 2023

Förster, D. (2023), „Statistische Versuchsplanung zur Auswertung eines Simulationsmodells der Materialbedarfsplanung und des Informationsflusses in Remanufacturing-Netzwerken“. Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gallei 2021

Gallei, M. (2021), „Potential assessment of an increased exchange of information concerning core returns in remanufacturing“. Bachelor Thesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Ittenbach 2020

Ittenbach, J. M. (2020), „Analyse und Simulation des Informationsflusses in globalen Remanufacturing-Netzwerken“. Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Lindemann 2020

Lindemann, M. (2020), „Simulation von globalen Produktionsnetzwerken mit Einbezug des Remanufacturing“. Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Nilles 2022

Nilles, M. (2022), „Simulationsbasierte Optimierung des Produkt- und Informationsrückflusses in der Rückwärtslogistik zur Optimierung der Beschaffung im Remanufacturing“. Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Weldner 2021

Weldner, B. (2021), „Development of a concept to increase the return of electronic cores enabling resource-efficient reuse of automotive parts through remanufacturing“. Master Thesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

Abbey & Guide 2018

Abbey, J. d. & Guide, V. D. R. (2018), „A typology of remanufacturing in closed-loop supply chains“, *International Journal of Production Research* 56.1-2, S. 374–384. DOI: 10.1080/00207543.2017.1384078.

Albers & Lanza et al. 2022

Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles“. 32nd CIRP Design Conference (CIRP Design 2022) - Design in a changing world (Gif-sur-Yvette, France, 28.–30. März 2022). Hrsg. von N. Anwer. Bd. 109, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.231.

Alpar & Alt et al. 2016

Alpar, P.; Alt, R.; Bensberg, F. & Weimann, P. (2016), *Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik: Strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen*. 8. Aufl. 2016. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-658-25581-7.

Amaran & Sahinidis et al. 2014

Amaran, S.; Sahinidis, N. V.; Sharda, B. & Bury, S. J. (2014), „Simulation optimization: a review of algorithms and applications“, *4OR - A Quarterly Journal of Operations Research* 12.4, S. 301–333. DOI: 10.1007/s10288-014-0275-2.

Amezquita & Bras 1996

Amezquita, T. & Bras, B. (1996), „Lean Remanufacture of an Automobile Clutch“. *Proceedings of the 1st International Working Seminar on Reuse*. 1st International Working Seminar on Reuse (Eindhoven, The Netherlands, 11.–13. Nov. 1996). Hrsg. von S. D. Flapper & A. J. de Ron, S. 5–22.

Andler 1929

Andler, K. (1929), *Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße*. Berlin, Boston: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. DOI: 10.1515/9783486994155.

APRA Europe 2015

APRA Europe (2015), „Remanufacturing as best practice of the Circular Economy: A Position Paper of the Automotive Parts Remanufacturer Association – Europe“, URL: <https://www.apra-europe.com/wp-content/uploads/2015/06/Remanufacturing-as-best-practice-of-the-Circular-Economy-Position-Paper-2015.pdf>

- [//apra.org/page/EuroRemanResources?&hhsearchterms=22position+and+paper](https://apra.org/page/EuroRemanResources?&hhsearchterms=22position+and+paper)
(besucht am 31.01.2021).
- Aras & Boyaci et al. 2004
Aras, N.; Boyaci, T. & Verter, V. (2004), „The effect of categorizing returned products in remanufacturing“, *IIE Transactions* 36.4, S. 319–331. DOI: 10.1080/07408170490279561.
- Arnold & Isermann et al. 2008
Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. & Furmans, K. (2008), *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-72929-7.
- Arnold & Palomäki et al. 2021
Arnold, M.; Palomäki, K.; Blévennec, K.; Koop, C.; Geerken, T.; Jensen, P. & Colgan, S. (2021), *Contribution of remanufacturing to Circular Economy: Eionet Report - ETC/WMGE 2021/10*. URL: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/contribution-of-remanufacturing-to-circular-economy> (besucht am 30.09.2022).
- Asif & Bianchi et al. 2012
Asif, F. M. A.; Bianchi, C.; Rashid, A. & Nicolescu, C. M. (2012), „Performance analysis of the closed loop supply chain“, *Journal of Remanufacturing* 2.4, S. 1–21. DOI: 10.1186/2210-4690-2-4.
- Ayres & Ferrer et al. 1997
Ayres, R.; Ferrer, G. & van Leynseele, T. (1997), „Eco-efficiency, asset recovery and remanufacturing“, *European Management Journal* 15.5, S. 557–574. DOI: 10.1016/S0263-2373(97)00035-2.
- Bach & Brehm et al. 2012
Bach, N.; Brehm, C.; Buchholz, W. & Petry, T. (2012), *Wertschöpfungsorientierte Organisation: Architekturen - Prozesse - Strukturen*. Wiesbaden: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-8349-3691-2.
- Bag & Dhamija et al. 2021
Bag, S.; Dhamija, P.; Gupta, S. & Sivarajah, U. (2021), „Examining the role of procurement 4.0 towards remanufacturing operations and circular economy“, *Production Planning & Control* 32.16, S. 1368–1383. DOI: 10.1080/09537287.2020.1817602.
- Barbier 1987
Barbier, E. B. (1987), „The Concept of Sustainable Economic Development“, *Environmental Conservation* 14.2, S. 101–110. DOI: 10.1017/S0376892900011449.
- Barquet & Rozenfeld et al. 2013
Barquet, A. P.; Rozenfeld, H. & Forcellini, F. A. (2013), „An integrated approach to remanu-

- facturing: model of a remanufacturing system“, *Journal of Remanufacturing* 3.1, S. 1–11. DOI: 10.1186/2210-4690-3-1.
- Bartel 2015**
Bartel, P. (2015), *Aktuelle Herausforderungen und Strategien des Remanufacturing von Automobilteilen*. URL: https://www.kongress-bw.de/sites/default/files/2016-07/151007_ressourcen_forum_4.pdf (besucht am 25.06.2023).
- Battini & Persona et al. 2014**
Battini, D.; Persona, A. & Sgarbossa, F. (2014), „A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications“, *International Journal of Production Economics* 149.2, S. 145–153. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.06.026.
- Bayındır & Erkip et al. 2007**
Bayındır, Z. P.; Erkip, N. & Güllü, R. (2007), „Assessing the benefits of remanufacturing option under one-way substitution and capacity constraint“, *Computers & Operations Research* 34.2, S. 487–514. DOI: 10.1016/j.cor.2005.03.010.
- Benoy & Owen et al. 2014**
Benoy, A.-M.; Owen, L. & Folkerson, M. (2014), *Triple Win: The Economic, Social and Environmental Case for Remanufacturing*. URL: <https://www.policyconnect.org.uk/media/986/download> (besucht am 26.06.2023).
- Biswas & Duong et al. 2013**
Biswas, W. K.; Duong, V.; Frey, P. & Islam, M. N. (2013), „A comparison of repaired, remanufactured and new compressors used in Western Australian small- and medium-sized enterprises in terms of global warming“, *Journal of Remanufacturing* 3.1, S. 675. DOI: 10.1186/2210-4690-3-4.
- Bogner & Littig et al. 2002**
Bogner, A.; Littig, B. & Menz, W., Hrsg. (2002), *Das Experteninterview: Theorie, Methode, Anwendung*. Springer eBook Collection Humanities, Social Science. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. DOI: 10.1007/978-3-322-93270-9.
- Bogner & Littig et al. 2014**
Bogner, A.; Littig, B. & Menz, W. (2014), *Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-531-19416-5.
- Borshchev 2013**
Borshchev, A. (2013), *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8*. o. o.: AnyLogic North America.
- Boutarfa & Senoussi et al. 2020**
Boutarfa, Y.; Senoussi, A. & Brahimi, N. (2020), „Reverse Logistics with Disassembly, Assembly, Repair and Substitution“. *2020 IEEE International Conference on Industrial*

- Engineering and Engineering Management (IEEM)* (Singapore, 14.–17. Dez. 2020). IEEE. DOI: 10.1109/ieem45057.2020.9309912.
- Boyatzis 1998**
Boyatzis, R. E. (1998), *Transforming Qualitative Information: Thematic Analysis and Code Development*. London, New Delhi: SAGE Publications.
- Brabänder 2020**
Brabänder, C. (2020), *Stochastisches Bestandsmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-28191-5.
- Brans & Smet 2016**
Brans, J.-P. & Smet, Y. de (2016), „PROMETHEE Methods“. *Multiple Criteria Decision Analysis*. Hrsg. von S. Greco; M. Ehrgott & J. R. Figueira. Bd. 233. International series in operations research & management science. New York, NY: Springer, S. 187–219. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- Bras & Hammond 1996**
Bras, B. & Hammond, R. (1996), „Towards design for remanufacturing—Metrics for assessing remanufacturability“. *Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse*. 1st International Working Seminar on Reuse (Eindhoven, The Netherlands, 11.–13. Nov. 1996). Hrsg. von S. D. Flapper & A. J. de Ron, S. 5–22.
- Breitschwerdt & Cornet et al. 2017**
Breitschwerdt, D.; Cornet, A.; Kempf, S.; Michor, L. & Schmidt, M. (2017), *The changing aftermarket game—and how automotive suppliers can benefit from arising opportunities*. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/the%20changing%20aftermarket%20game%20and%20how%20automotive%20suppliers%20can%20benefit%20from%20arising%20opportunities/the-changing-aftermarket-game.pdf> (besucht am 29. 12. 2020).
- Bullinger & Spath et al. 2009**
Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J. & Westkämper, E., Hrsg. (2009), *Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung*. 3. Aufl. 2009. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-87595-6.
- Bundesministerium der Justiz 2012**
Bundesministerium der Justiz (2012), *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG): KrWG*. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/> (besucht am 30. 12. 2020).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015**
Bundesministerium für Bildung und Forschung (2015), *Zukunftsbild Industrie 4.0*. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/>

zukunfts bild- industrie- 4- 0 . pdf? _ _ blob=publicationFile&v=4 (besucht am 26. 06. 2023).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Hrsg. (2016), *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*. Berlin. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_II_broschuere_de_bf.pdf (besucht am 26. 06. 2023).

Buscher 2018

Buscher, U. (2018), „Aufgaben und Ziele des Produktions- und Logistikmanagements“. *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*. Hrsg. von H. Corsten; R. Gössinger & T. S. Spengler. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, S. 13–30. DOI: 10.1515/9783110473803-002.

Butzer & Schötz et al. 2017

Butzer, S.; Schötz, S.; Petroschke, M. & Steinhilper, R. (2017), „Development of a Performance Measurement System for International Reverse Supply Chains“. *The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering* (Kamakura, Japan, 8.–10. März 2017). Hrsg. von S. Takata; Y. Umeda & S. Kondoh. Bd. 61, S. 251–256. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.264.

Cachon & Fisher 2000

Cachon, G. P. & Fisher, M. (2000), „Supply Chain Inventory Management and the Value of Shared Information“, *Management Science* 46.8, S. 1032–1048. DOI: 10.1287/mnsc.46.8.1032.12029.

Cannella & Bruccoleri et al. 2016

Cannella, S.; Bruccoleri, M. & Framinan, J. M. (2016), „Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance?“, *International Journal of Production Economics* 175.2, S. 35–49. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.01.012.

Capgemini Research Institute 2021

Capgemini Research Institute (2021), *Circular Economy: For a sustainable future*. Hrsg. von Capgemini Research Institute. URL: https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2021/11/Circular-Economy_11112021_v10_web-2-1.pdf (besucht am 26. 06. 2023).

Caridi & Crippa et al. 2010

Caridi, M.; Crippa, L.; Perego, A.; Sianesi, A. & Tumino, A. (2010), „Measuring visibility to improve supply chain performance: a quantitative approach“, *Benchmarking: An International Journal* 17.4, S. 593–615. DOI: 10.1108/14635771011060602.

Casper 2021

Casper, R. (2021), „Automotive Remanufacturing in a Changing Market: Challenges and

- Opportunities in a market with a growing share of electric cars“. Dissertation. Linköping: Linköping University. DOI: 10.3384/diss.diva-180947.
- Casper & Sundin 2018
- Casper, R. & Sundin, E. (2018), „Addressing Today’s challenges in automotive remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing* 8.3, S. 93–102. DOI: 10.1007/s13243-018-0047-9.
- Chanintrakul & Coronado Mondragon et al. 2009
- Chanintrakul, P.; Coronado Mondragon, A. E.; Lalwani, C. & Wong, C. Y. (2009), „Reverse logistics network design: a state-of-the-art literature review“, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling* 1.1, S. 61–81. DOI: 10.1504/IJBPSM.2009.026266.
- Chevreux & Hu et al. 2018
- Chevreux, L.; Hu, M. & Gandhi, S. (2018), *Why Supply Chains Must Pivot*. MIT Sloan Management Review. URL: <https://sloanreview.mit.edu/article/why-supply-chains-must-pivot/> (besucht am 30.09.2022).
- Chhajed & Lowe 2008
- Chhajed, D. & Lowe, T. J., Hrsg. (2008), *Building Intuition: Insights from basic operations management models and principles*. International series in operations research & management science. New York, NY: Springer. DOI: 10.1007/978-0-387-73699-0.
- Chunfa & Jingfeng et al. 2010
- Chunfa, L.; Jingfeng, L. & Jianjian, L. (2010), „Used product remanufacturing information gathering system based on multi-agent“. 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering (Chengdu, China, 16.–18. Apr. 2010). Hrsg. von IEEE. Bd. 1, S. 155–158. DOI: 10.1109/ICIME.2010.5477758.
- Cisek & Habicht et al. 2002
- Cisek, R.; Habicht, C. & Neise, P. (2002), „Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97.9, S. 441–445. DOI: 10.3139/104.100566.
- CLEPA & MERA et al. 2016
- CLEPA; MERA; APRA; ANRAP; FIRM & CPRA (2016), *Remanufacturing Associations Agree on International Industry Definition*. URL: <https://clepa.eu/mediaroom/remanufacturing-associations-agree-international-industry-definition/> (besucht am 25.06.2023).
- Clotley 2016
- Clotley, T. (2016), „Development and evaluation of a rolling horizon purchasing policy for cores“, *International Journal of Production Research* 54.9, S. 2780–2790. DOI: 10.1080/00207543.2016.1142133.

Commoner 1972

Commoner, B. (1972), „The environmental cost of economic growth“, *Chemistry in Britain* 8.2, S. 52–56.

Copani & Tolio et al. 2014

Copani, G.; Tolio, T. & Colledani, M. (2014), „De-Manufacturing Systems // De-manufacturing Systems“. *Variety Management in Manufacturing*. 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (Windsor, ON, Canada, 28.–30. Apr. 2014). Hrsg. von H. ElMaraghy. Bd. 17, S. 14–19. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.075.

Corbett & Savaskan 2001

Corbett, C. & Savaskan, R. C. (2001), „Contracting and coordination in closed-loop supply chains“, *Northwestern University, Kellogg School of Management* 1327, S. 1–23.

Daecke 2013

Daecke, N. (2013), *Akteursbasierte Führung von Supply Chain-Beziehungen: Handlungsrahmen zum Erfolgsfaktoren-basierten Lieferanten-Management*. Bd. 11. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-4003-2.

Daniel & Guide et al. 2000

Daniel, V.; Guide, R. & Jayaraman, V. (2000), „Product acquisition management: Current industry practice and a proposed framework“, *International Journal of Production Research* 38.16, S. 3779–3800. DOI: 10.1080/00207540050176003.

Dean & Voss et al. 2017

Dean, A.; Voss, D. & Draguljić, D. (2017), *Design and Analysis of Experiments*. 2nd edition. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0.

Dekker & Fleischmann et al. 2004

Dekker, R.; Fleischmann, M.; Inderfurth, K. & van Wassenhove, L. N., Hrsg. (2004), *Reverse Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-24803-3.

Denizel & Ferguson et al. 2010

Denizel, M.; Ferguson, M. & Souza, G. (2010), „Multiperiod Remanufacturing Planning With Uncertain Quality of Inputs“, *IEEE Transactions on Engineering Management* 57.3, S. 394–404. DOI: 10.1109/TEM.2009.2024506.

Dias & Kim et al. 2013

Dias, A. S.; Kim, H.; Sivakumar, P. K.; Liu, Z.-C. & Zhang, H.-C. (2013), „Life Cycle Assessment: A Comparison of Manufacturing and Remanufacturing Processes of a Diesel Engine“. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (Singapore, 17.–19. Apr. 2013). Hrsg. von A. Y. C. Nee; B. Song & S.-K. Ong, S. 675–678. DOI: 10.1007/978-981-4451-48-2_110.

Domschke & Drexel et al. 2015

Domschke, W.; Drexel, A.; Klein, R. & Scholl, A. (2015), *Einführung in Operations Research*.

- 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-662-48216-2.
- Domschke & Scholl et al. 1997
Domschke, W.; Scholl, A. & Voß, S. (1997), *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte*. 2., überarb. und erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Duberg & Johansson et al. 2020
Duberg, J. V.; Johansson, G.; Sundin, E. & Kurilova-Palisaitiene, J. (2020), „Prerequisite factors for original equipment manufacturer remanufacturing“, *Journal of Cleaner Production* 270.1, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122309.
- Ehrlich & Holdren 1971
Ehrlich, P. R. & Holdren, J. P. (1971), „Impact of Population Growth“, *Science* 171.3977, S. 1212–1217. URL: <https://faculty.washington.edu/stevehar/Ehrlich.pdf> (besucht am 26.06.2023).
- Eppler 2006
Eppler, M. J. (2006), *Managing Information Quality: Increasing the Value of Information in Knowledge-intensive Products and Processes*. 2nd Edition. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/3-540-32225-6.
- European Commission 2021
European Commission (2021), *European Green Deal: Delivering on our Targets*. Hrsg. von Publications Office of the European Union. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_3688 (besucht am 26.06.2023).
- Eurostat 2023
Eurostat (14. März 2023), *NUTS - Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik*. Hrsg. von Europäische Union. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/nuts/background> (besucht am 26.06.2023).
- Fandel & Fistek et al. 2011
Fandel, G.; Fistek, A. & Stütz, S. (2011), *Produktionsmanagement*. 2., überarb. und erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Farshid & Golpîra 2019
Farshid, A. & Golpîra, H. (2019), „Reverse/Closed Loop Supply Chain Network Design: A Short Review“. The First International Conference on Modern Approaches in Engineering Sciences (ICMAES 2018) (Tbilisi, Georgia, 21. Nov. 2018), S. 26–42.
- Ferguson & Guide et al. 2009
Ferguson, M.; Guide, V. D. R. & Koca, E. (2009), „The Value of Quality Grading in Remanufacturing“, *Production and Operations Management* 18.3, S. 300–314. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2009.01033.x.

Ferguson & Toktay 2006

Ferguson, M. E. & Toktay, L. B. (2006), „The Effect of Competition on Recovery Strategies“, *Production and Operations Management* 15.3, S. 351–368. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2006.tb00250.x.

Ferrer 2003

Ferrer, G. (2003), „Yield information and supplier responsiveness in remanufacturing operations“, *European Journal of Operational Research* 149.3, S. 540–556. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00454-X.

Ferrer & Whybark 2001

Ferrer, G. & Whybark, D. C. (2001), „Material planning for a remanufacturing facility“, *Production and Operations Management* 10.2, S. 112–124. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2001.tb00073.x.

Figueira & Almada-Lobo 2014

Figueira, G. & Almada-Lobo, B. (2014), „Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion“, *Simulation Modelling Practice and Theory* 46.11, S. 118–134. DOI: 10.1016/j.simpat.2014.03.007.

Finkenzeller 2015

Finkenzeller, K. (2015), *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. 7., aktualisierte u. erw. Aufl. München: Hanser.

Fleischmann & Meyr et al. 2008

Fleischmann, B.; Meyr, H. & Wagner, M. (2008), „Advanced Planning“. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Hrsg. von H. Stadtler & C. Kilger. Bd. 5. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 81–106. DOI: 10.1007/978-3-540-74512-9_5.

Fleischmann 2000

Fleischmann, M. (2000), „Quantitative Models for Reverse Logistics“. Dissertation. Rotterdam: Erasmus University Rotterdam.

Fleischmann & Krikke et al. 2000

Fleischmann, M.; Krikke, H. R.; Dekker, R. & Flapper, S. D. P. (2000), „A characterisation of logistics networks for product recovery“, *Omega* 28.6, S. 653–666. DOI: 10.1016/S0305-0483(00)00022-0.

Fu 2002

Fu, M. C. (2002), „Feature Article: Optimization for simulation: Theory vs. Practice“, *INFORMS Journal on Computing* 14.3, S. 192–215. DOI: 10.1287/ijoc.14.3.192.113.

Gaur & Subramoniam et al. 2017

Gaur, J.; Subramoniam, R.; Govindan, K. & Huisingh, D. (2017), „Closed-loop supply chain

- management: From conceptual to an action oriented framework on core acquisition“, *Journal of Cleaner Production* 167.2, S. 1415–1424. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.098.
- Geldermann & Lerche 2014
- Geldermann, J. & Lerche, N. (2014), *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multi-kriteriellen Entscheidungsunterstützung*. Hrsg. von Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.
- Ghisellini & Cialani et al. 2016
- Ghisellini, P.; Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016), „A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems“, *Journal of Cleaner Production* 114, S. 11–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- Gläser & Laudel 2010
- Gläser, J. & Laudel, G. (2010), *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrument rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.
- Golinska-Dawson & Kawa 2011
- Golinska-Dawson, P. & Kawa, A. (2011), „Remanufacturing in automotive industry: Challenges and limitations“, *Journal of Industrial Engineering and Management* 4.3, S. 453–466. DOI: 10.3926/jiem.v4n3.p453-466.
- Goltsos & Ponte et al. 2019
- Goltsos, T. E.; Ponte, B.; Wang, S.; Liu, Y.; Naim, M. M. & Syntetos, A. A. (2019), „The boomerang returns? Accounting for the impact of uncertainties on the dynamics of remanufacturing systems“, *International Journal of Production Research* 57.23, S. 7361–7394. DOI: 10.1080/00207543.2018.1510191.
- Goodall & Sharpe et al. 2019
- Goodall, P.; Sharpe, R. & West, A. (2019), „A data-driven simulation to support remanufacturing operations“, *Computers in Industry* 105.5, S. 48–60. DOI: 10.1016/j.compind.2018.11.001.
- Gotzel & Inderfurth 2002
- Gotzel, C. & Inderfurth, K. (2002), „Performance of MRP in Product Recovery Systems with Demand, Return and Leadtime Uncertainties“. *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*. Hrsg. von A. Klöse; M. G. Speranza & L. N. van Wassenhove. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 99–114.
- Govindan & Soleimani 2017
- Govindan, K. & Soleimani, H. (2017), „A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A Journal of Cleaner Production focus“, *Journal of Cleaner Production* 142.1, S. 371–384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.126.
- Grigoryev 2022
- Grigoryev, I. (2022), *AnyLogic in Three Days: A quick course in simulation modeling*.

Sixth edition. o. O.: o. V. URL: <https://www.anylogic.com/upload/al-in-3-days/anylogic-in-3-days.pdf> (besucht am 26.06.2023).

Guidat & Uoti et al. 2015

Guidat, T.; Uoti, M.; Tonteri, H. & Määttä, T. (2015), „A Classification of Remanufacturing Networks in Europe and their Influence on New Entrants“. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2014) - Emerging Potentials (Johor Bahru, Malaysia, 22.–24. Sep. 2014). Hrsg. von G. Seliger & N. M. Yusof. Bd. 26, S. 683–688. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.033.

Guide & van Wassenhove 2002

Guide, V. D. R. & van Wassenhove, L. N. (2002), „The Reverse Supply Chain“, *Harvard Business Review* 80.2, S. 25–26.

Guide & Teunter et al. 2003

Guide, V. D. R.; Teunter, R. H. & van Wassenhove, L. N. (2003), „Matching Demand and Supply to Maximize Profits from Remanufacturing“, *Manufacturing & Service Operations Management* 5.4, S. 303–316. DOI: 10.1287/msom.5.4.303.24883.

Guide & van Wassenhove 2001

Guide, V. D. R. & van Wassenhove, L. N. (2001), „Managing Product Returns For Remanufacturing“, *Production and Operations Management* 10.2, S. 142–155. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2001.tb00075.x.

Guide & van Wassenhove 2009

Guide, V. D. R. & van Wassenhove, L. N. (2009), „OR FORUM - The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research“, *Operations Research* 57.1, S. 10–18. DOI: 10.1287/opre.1080.0628.

Guide 2000

Guide, V. R. (2000), „Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs“, *Journal of Operations Management* 18.4, S. 467–483. DOI: 10.1016/S0272-6963(00)00034-6.

Gupta 2013

Gupta, S. M. (2013), *Reverse supply chains: Issues and analysis*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis. DOI: 10.1201/b13749.

Gutenschwager & Rabe et al. 2017

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2017), *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer und Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-662-55745-7.

Harris 1915

Harris, F. (1915), *Operations and Cost: Factory Management Series*. Chicago: A.W. Shaw Co.

Hauschild 2015

Hauschild, M. Z. (2015), „Better – But is it Good Enough? On the Need to Consider Both Eco-efficiency and Eco-effectiveness to Gauge Industrial Sustainability“. *Efficiency to Effectiveness: Sustainability in Manufacturing*. The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (Sydney, Australia, 7.–9. Apr. 2015). Hrsg. von S. Kara. Bd. 29. 4, S. 1–7. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.126.

Hauschild & Kara et al. 2020

Hauschild, M. Z.; Kara, S. & Röpke, I. (2020), „Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering“, *CIRP Annals* 69.2, S. 533–553. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.05.004.

Hausladen 2016

Hausladen, I. (2016), *IT-gestützte Logistik: Systeme - Prozesse - Anwendungen*. 3. Aufl. 2016. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-13080-0.

Haynsworth & Lyons 1987

Haynsworth, H. C. & Lyons, R. T. (1987), „Remanufacturing by design, the missing link“, *Production and inventory management* 28.2, S. 24–29.

Held 2008

Held, L. (2008), *Methoden der statistischen Inferenz: Likelihood und Bayes*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Helfferich 2011

Helfferich, C. (2011), *Die Qualität qualitativer Daten: Manual für die Durchführung qualitativer Interviews*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. DOI: 10.1007/978-3-531-92076-4.

Helmus 2009

Helmus, M. (2009), *RFID in der Baulogistik: Forschungsbericht zum Projekt Integriertes Wertschöpfungsmodell mit RFID in der Bau- und Immobilienwirtschaft*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. DOI: 10.1007/978-3-8348-9319-2.

Herrmann & Vetter 2021

Herrmann, C. & Vetter, O. (2021), *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Remanufacturing von Produkten*. Hrsg. von VDI Zentrum für Ressourceneffizienz (ZRE). URL: <https://www.ressourcenwende.net/publikationen/oekologische-und-oekonomische-bewertung-des-ressourcenaufwands-remanufacturing-von-produkten/> (besucht am 04. 10. 2022).

Ijomah 2002

Ijomah, W. L. (2002), „A model-based definition of the generic remanufacturing business process“. Dissertation. Plymouth: University of Plymouth.

Ijomah & Childe et al. 2004

Ijomah, W. L.; Childe, S. & McMahon, C. (2004), „Remanufacturing: A Key Strategy for Sustainable Development“. *Design and manufacture for sustainable development*. 3rd International Conference on Design and Manufacture for Sustainable Development (Loughborough, UK, 1.–2. Sep. 2004). Hrsg. von T. Bhamra & B. Hon, S. 51–64.

Ilgın & Gupta 2010

Ilgın, M. A. & Gupta, S. M. (2010), „Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art“, *Journal of environmental management* 91.3, S. 563–591. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.09.037.

Inmar Reverse Logistics 2009

Inmar Reverse Logistics (2009), *Automotive Aftermarket: Reverse Logistics Opportunities*. Hrsg. von MEMA information services council. North Carolina, USA.

Jayaraman & Guide et al. 1999

Jayaraman, V.; Guide, V. D. R. & Srivastava, R. (1999), „A closed-loop logistics model for remanufacturing“, *Journal of the Operational Research Society* 50.5, S. 497–508. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600716.

Jena & Sarmah 2015

Jena, S. K. & Sarmah, S. P. (2015), „Measurement of consumers' return intention index towards returning the used products“, *Journal of Cleaner Production* 108.3, S. 818–829. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.115.

Kalverkamp 2018

Kalverkamp, M. (2018), „Hidden potentials in open-loop supply chains for remanufacturing“, *The International Journal of Logistics Management* 29.4, S. 1125–1146. DOI: 10.1108/IJLM-10-2017-0278.

Kalverkamp & Raabe 2018

Kalverkamp, M. & Raabe, T. (2018), „Automotive Remanufacturing in the Circular Economy in Europe“, *Journal of Macromarketing* 38.1, S. 112–130. DOI: 10.1177/0276146717739066.

Kamper & Triebis et al. 2019

Kamper, A.; Triebis, J.; Hollah, A. & Lienemann, C. (2019), „Remanufacturing of electric vehicles: Challenges in production planning and control“. *Sustainable Manufacturing for Global Circular Economy: Proceedings of the 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing (Lexington, Kentucky, USA, 2.–4. Okt. 2018). Hrsg. von G. Seliger; I. S. Jawahir; F. Badurdeen & H. Kohl. Bd. 33, S. 280–287. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.034.

Kara & Hauschild et al. 2022

Kara, S.; Hauschild, M.; Sutherland, J. & McAloone, T. (2022), „Closed-loop systems to

circular economy: A pathway to environmental sustainability?“, *CIRP Annals* 71.2, S. 505–528. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.05.008.

Ketzenberg 2009

Ketzenberg, M. (2009), „The value of information in a capacitated closed loop supply chain“, *European Journal of Operational Research* 198.2, S. 491–503. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.09.028.

Khor & Udin 2012

Khor, K. & Udin, Z. (2012), „Impact of Reverse Logistics Product Disposition towards Business Performance in Malaysian E&E Companies“, *Journal of Supply Chain and Customer Relationship Management*, S. 1–19. DOI: 10.5171/2012.699469.

Kirchherr & Reike et al. 2017

Kirchherr, J.; Reike, D. & Hekkert, M. (2017), „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“, *Resources, Conservation & Recycling* 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kleppmann 2020

Kleppmann, W. (2020), *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 10., überarbeitete Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser. DOI: 10.3139/9783446463974.

Köhler 2011

Köhler, D. C. F. (2011), „Regenerative Supply Chains: Regenerative Wertschöpfungsketten“. Dissertation. Bayreuth: Universität Bayreuth.

Krcmar 2015

Krcmar, H. (2015), *Informationsmanagement*. 6., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-662-45863-1.

Krumwiede & Sheu 2002

Krumwiede, D. W. & Sheu, C. (2002), „A model for reverse logistics entry by third-party providers“, *Omega* 30.5, S. 325–333. DOI: 10.1016/S0305-0483(02)00049-X.

Kuckartz 2012

Kuckartz, U. (2012), *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.

Kummer & Grün et al. 2013

Kummer, S.; Grün, O. & Jammernegg, W. (2013), *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. 3. aktualisierte Auflage. München: Pearson Deutschland GmbH.

Kuo 2011

Kuo, T. C. (2011), „The study of production and inventory policy of manufacturing / remanufacturing environment in a closed-loop supply chain“, *International Journal of Sustainable Engineering* 4.4, S. 323–329. DOI: 10.1080/19397038.2011.593008.

Kurilova-Palisaitiene & Lindkvist et al. 2015

Kurilova-Palisaitiene, J.; Lindkvist, L. & Sundin, E. (2015), „Towards Facilitating Circular

- Product Life-Cycle Information Flow via Remanufacturing“. The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (Sydney, Australia, 7.–9. Apr. 2015). Hrsg. von S. Kara. Bd. 29, S. 780–785. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.162.
- Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2015
- Kurilova-Palisaitiene, J. & Sundin, E. (2015), „Toward Pull Remanufacturing: A Case Study on Material and Information Flow Uncertainties at a German Engine Remanufacturer“. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Emerging Potentials (Johor Bahru, Malaysia, 22.–24. Sep. 2014). Hrsg. von G. Seliger & N. M. Yusof. Bd. 26, S. 270–275. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.187.
- Kurilova-Palisaitiene & Sundin et al. 2018
- Kurilova-Palisaitiene, J.; Sundin, E. & Poksinska, B. (2018), „Remanufacturing challenges and possible lean improvements“, *Journal of Cleaner Production* 172, S. 3225–3236. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.023.
- Lacy & Rutqvist 2015
- Lacy, P. & Rutqvist, J. (2015), *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. London: Palgrave Macmillan UK. DOI: 10.1057/9781137530707.
- Lamnek 2008
- Lamnek, S. (2008), *Qualitative Sozialforschung: Lehrbuch*. 4., vollst. überarb. Aufl. Beltz PVU Lehrbuch. Weinheim, Basel: Beltz PVU.
- Lange 2017
- Lange, U. (2017), *Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen: Kurzanalyse Nr. 18*. Hrsg. von VDI ZRE. URL: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-18-remanufacturing/> (besucht am 26.06.2023).
- Lanza & Ferdows et al. 2019
- Lanza, G.; Ferdows, K.; Kara, S.; Mourtzis, D.; Schuh, G.; Váncza, J.; Wang, L. & Wiendahl, H.-P. (2019), „Global production networks: Design and operation“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68.2, S. 823–841. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.008.
- Lasch 2021
- Lasch, R. (2021), *Strategisches und operatives Logistikmanagement: Beschaffung*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-35257-8.
- Lassmann 2006
- Lassmann, W. (2006), *Wirtschaftsinformatik*. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-9152-2.
- Lau & Xie et al. 2008
- Lau, R.; Xie, J. & Zhao, X. (2008), „Effects of inventory policy on supply chain performance:

A simulation study of critical decision parameters“, *Computers & Industrial Engineering* 55.3, S. 620–633. DOI: 10.1016/j.cie.2008.02.002.

Law 2015

Law, A. M. (2015), *Simulation modeling and analysis*. Fifth edition. New York, NY: McGraw Hill Education.

Law 2017

Law, A. M. (2017), „A tutorial on design of experiments for simulation modeling“. 2017 Winter Simulation Conference (WSC) (Las Vegas, NV, USA, 3.–6. Dez. 2017). IEEE, S. 550–564. DOI: 10.1109/wsc.2017.8247814.

Li & González et al. 2009

Li, J.; González, M. & Zhu, Y. (2009), „A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing“, *International Journal of Production Economics* 117.2, S. 286–301. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.11.005.

Li & Chao et al. 2012

Li, W. D.; Chao, K.-M.; Jin, G. Q.; Xia, K. & Gao, L. (2012), „Sustainable information management for Waste Electrical and Electronic Equipment“. 16th IEEE International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD 2012) (Wuhan, China, 23.–25. Mai 2012). Hrsg. von L. Gao. IEEE, S. 875–881. DOI: 10.1109/CSCWD.2012.6221924.

Liang & Jin et al. 2014

Liang, X.; Jin, X. & Ni, J. (2014), „Forecasting product returns for remanufacturing systems“, *Journal of Remanufacturing* 4.1, S. 18. DOI: 10.1186/s13243-014-0008-x.

Lind & Olsson et al. 2014

Lind, S.; Olsson, D. & Sundin, E. (2014), „Exploring inter-organizational relationships in automotive component remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing* 4.1, S. 999. DOI: 10.1186/2210-4690-4-5.

Liu & Jiang et al. 2016

Liu, Z.; Jiang, Q.; Li, T.; Dong, S.; Yan, S.; Zhang, H. & Xu, B. (2016), „Environmental benefits of remanufacturing: A case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding“, *Journal of Cleaner Production* 133.2, S. 1027–1033. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.049.

MacArthur 2013

MacArthur, E. (2013), *Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation.

Mahadevan & Pyke et al. 2003

Mahadevan, B.; Pyke, D. F. & Fleischmann, M. (2003), „Periodic review, push inventory policies for remanufacturing“, *European Journal of Operational Research* 151.3, S. 536–551. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00627-6.

Makarova & Shubenkova et al. 2020

Makarova, I.; Shubenkova, K.; Buyvol, P.; Shepelev, V. & Gritsenko, A. (2020), „The Role of Reverse Logistics in the Transition to a Circular Economy: Case Study of Automotive Spare Parts Logistics“, *FME Transactions* 49.1, S. 173–185. DOI: 10.5937/fme2101173M.

Malolan & Mathirajan 2020

Malolan, S. & Mathirajan, M. (2020), „Mathematical Models for Sustainable Inventory and Production Plans for Component Remanufacturing Problems of OEM with Break-Even Period Determination“. *Sustainable Supply Chains: Strategies, Issues, and Models*. Hrsg. von U. Ramanathan & R. Ramanathan. Bd. 49. Cham: Springer International Publishing, S. 75–132. DOI: 10.1007/978-3-030-48876-5_3.

März & Krug et al. 2011

März, L.; Krug, W.; Rose, O. & Weigert, G. (2011), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Bd. 130. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-14536-0.

Matsumoto & Ijomah 2013

Matsumoto, M. & Ijomah, W. L. (2013), „Remanufacturing“. *Handbook of Sustainable Engineering*. Hrsg. von J. Kauffmann & K.-M. Lee. Dordrecht: Springer, S. 389–408. DOI: 10.1007/978-1-4020-8939-8_93.

Matsumoto & Umeda et al. 2016

Matsumoto, M.; Umeda, Y.; Tsuchiya, S. & Tang, L. (2016), „Development of demand forecasting model for automotive electric component remanufacturing“. 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG) (Berlin, 6.–9. Sep. 2016). Hrsg. von Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 1–7. DOI: 10.1109/EGG.2016.7829817.

Mawandiya & Jha et al. 2020

Mawandiya, B. K.; Jha, J. K. & Thakkar, J. J. (2020), „Optimal production-inventory policy for closed-loop supply chain with remanufacturing under random demand and return“, *Operational Research* 20.3, S. 1623–1664. DOI: 10.1007/s12351-018-0398-x.

Mayer 2011

Mayer, S. (2011), „Methoden und Anwendungen der simulationsbasierten Optimierung“, *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 40.5, S. 218–224. DOI: 10.15358/0340-1650-2011-5-218.

McKinsey Global Institute 2011

McKinsey Global Institute (2011), *Resource Revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/resource-revolution> (besucht am 26.06.2023).

Melo & Nickel et al. 2009

Melo, M. T.; Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2009), „Facility location and supply chain management – A review“, *European Journal of Operational Research* 196.2, S. 401–412. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.

Meuser & Nagel 1989

Meuser, M. & Nagel, U. (1989), *Experteninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht: ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion (Arbeitspapier SFB 186, 6)*. Bremen: Universität Bremen.

MHI & Deloitte 2021

MHI & Deloitte (2021), *Innovation Driven Resilience: How technology and innovation help supply chains thrive in unprecedented times*. URL: <https://www.mhi.org/publications/report#download8> (besucht am 26.06.2023).

Misoch 2019

Misoch, S. (2019), „Qualitative Einzelinterviews“. *Qualitative Interviews*. De Gruyter, S. 65–136. DOI: 10.1515/9783110545982-004.

Möller 2008

Möller, N. (2008), „Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme“. Dissertation. München: Technische Universität München.

Moon 2017

Moon, Y. B. (2017), „Simulation modelling for sustainability: a review of the literature“, *International Journal of Sustainable Engineering* 10.1, S. 2–19. DOI: 10.1080/19397038.2016.1220990.

Mossali & Diani et al. 2020

Mossali, E.; Diani, M. & Colledani, M. (2020), „DigiPrime: Digital Platform for Circular Economy in Cross-Sectorial Sustainable Value Networks“. The 8th Annual International Sustainable Places Conference (SP2020) (Online, 27.–30. Okt. 2020). Bd. 65. 1. MDPI, S. 1. DOI: 10.3390/proceedings2020065001.

Mujkić & Kraslawski et al. 2018

Mujkić, Z.; Kraslawski, A. & Qorri, A. (2018), „Sustainability and Optimization of Supply Chains: a Literature Review“, *Operations and Supply Chain Management* 11.4, S. 186–199. DOI: 10.31387/oscm0350213.

Murphy 1986

Murphy, P. (1986), „A Preliminary Study of Transportation and Warehousing Aspects of Reverse Distribution“, *Transportation Journal* 25.4, S. 12–21.

Nasr & Russell 2018

Nasr, N. Z. & Russell, J. D. (2018), *Redefining Value - The manufacturing revolution: Remanufacturing, refurbishment, repair and direct reuse in the circular economy: A Report*

of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya. URL: <https://www.resourcepanel.org/reports/re-defining-value-manufacturing-revolution> (besucht am 26.06.2023).

Neuner 2009

Neuner, C. (2009), *Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit*. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-8344-2.

Nickel & Stein et al. 2014

Nickel, S.; Stein, O. & Waldmann, K.-H. (2014), *Operations Research*. Zweite, korrigierte und aktualisierte Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Gabler.

North 2011

North, K. (2011), *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-6427-4.

Nuss & Sahamie et al. 2015

Nuss, C.; Sahamie, R. & Stindt, D. (2015), „The Reverse Supply Chain Planning Matrix: A Classification Scheme for Planning Problems in Reverse Logistics“, *International Journal of Management Reviews* 17.4, S. 413–436. DOI: 10.1111/ijmr.12046.

Nyamsi 2020

Nyamsi, E. A., Hrsg. (2020), *IT-Lösungen auf Basis von SysML und UML*. Wiesbaden: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-658-29057-3.

Nyhuis 2008

Nyhuis, P., Hrsg. (2008), *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-75642-2.

Oberle & Bringezu et al. 2019

Oberle, B.; Bringezu, S.; Hatfield-Dodds, S.; Hellweg, S.; Schandl, H. & Clement, J. (2019), *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future we want*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. URL: <https://www.resourcepanel.org/file/1161/download?token=gnbLydMn> (besucht am 26.06.2023).

OECD 2019

OECD (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD Publishing. DOI: 10.1787/9789264307452-en.

Oflazgil 2017

Oflazgil, K. (2017), „Simulationsbasierte Bewertung alternativer Reverse Supply Chains“. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Okorie & Charnley et al. 2020

Okorie, O.; Charnley, F.; Ehiagwina, A.; Tiwari, D. & Salonitis, K. (2020), „Towards a simulation-based understanding of smart remanufacturing operations: a comparative analysis“, *Journal of Remanufacturing* 2.2, S. 1–23. DOI: 10.1007/s13243-020-00086-8.

Olhager & Pashaei et al. 2015

Olhager, J.; Pashaei, S. & Sternberg, H. (2015), „Design of global production and distribution networks“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 45.1/2, S. 138–158. DOI: 10.1108/IJPDLM-05-2013-0131.

Oltra-Badenes & Gil-Gomez et al. 2019

Oltra-Badenes, R.; Gil-Gomez, H.; Guerola-Navarro, V. & Vicedo, P. (2019), „Is It Possible to Manage the Product Recovery Processes in an ERP? Analysis of Functional Needs“, *Sustainability* 11.16, S. 4380. DOI: 10.3390/su11164380.

Ostertag 2008

Ostertag, R. (2008), *Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie: Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung*. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-8148-6.

Östlin 2008

Östlin, J. (2008), „On Remanufacturing Systems: Analysing and Managing Material Flows and Remanufacturing Processes“. Dissertation. Linköping: Linköping University.

Östlin & Sundin et al. 2008

Östlin, J.; Sundin, E. & Björkman, M. (2008), „Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing“, *International Journal of Production Economics* 115.2, S. 336–348. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.02.020.

Otto 2002

Otto, A. (2002), *Management und Controlling von Supply Chains: Ein Modell auf der Basis der Netzwerktheorie*. 1. Auflage. Bd. 290. Neue betriebswirtschaftliche Forschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Panagiotidou & Nenes et al. 2013

Panagiotidou, S.; Nenes, G. & Zikopoulos, C. (2013), „Optimal procurement and sampling decisions under stochastic yield of returns in reverse supply chains“, *OR Spectrum* 35.1, S. 1–32. DOI: 10.1007/s00291-010-0234-z.

Papathanasiou & Ploskas 2018

Papathanasiou, J. & Ploskas, N. (2018), *Multiple criteria decision aid: Methods, examples and Python implementations*. Bd. v.136. Springer Optimization and Its Applications Ser. Cham: Springer.

Parker 2010

Parker, D. (2010), „Briefing: Remanufacturing and reuse – trends and prospects“, *Waste and Resource Management* 163.4, S. 141–147. DOI: 10.1680/warm.2010.163.4.141.

Parker & Riley et al. 2015

Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar,

S. & Peck, D. (2015), *Remanufacturing Market Study*. Hrsg. von D. Parker & European Remanufacturing Network. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a4bc7898&appId=PPGMS> (besucht am 26.06.2023).

PAS 1049:2004-12 2004

PAS 1049:2004-12 (2004), *Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen - Der Recyclingpass*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Piller 2006

Piller, F. T. (2006), *Mass Customization: Ein Wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. 4. Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Pokharel & Mutha 2009

Pokharel, S. & Mutha, A. (2009), „Perspectives in reverse logistics: A review“, *Resources, Conservation and Recycling* 53.4, S. 175–182. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.11.006.

Poles 2013

Poles, R. (2013), „System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies“, *International Journal of Production Economics* 144.1, S. 189–199. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.02.003.

Pschyrembel 2014

Pschyrembel, W. D. (2014), *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch: Mit klinischen Syndromen und Nomina Anatomica*. 266. neubearb. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter & Co.

Robert & Parris et al. 2005

Robert, K. W.; Parris, T. M. & Leiserowitz, A. A. (2005), „What is Sustainable Development? Goals, Indicators, Values, and Practice“, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 47.3, S. 8–21. DOI: 10.1080/00139157.2005.10524444.

Robotis & Bhattacharya et al. 2005

Robotis, A.; Bhattacharya, S. & van Wassenhove, L. N. (2005), „The effect of remanufacturing on procurement decisions for resellers in secondary markets“, *European Journal of Operational Research* 163.3, S. 688–705. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.01.013.

Rogers & Tibben-Lembke 1998

Rogers, D. S. & Tibben-Lembke, R. S. (1998), *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reno, Nevada: Reverse Logistics Executive Council.

Sakao & Sundin 2019

Sakao, T. & Sundin, E. (2019), „How to Improve Remanufacturing?—A Systematic Analysis of Practices and Theories“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141.2, S. 1–13. DOI: 10.1115/1.4041746.

Savaskan & Bhattacharya et al. 2004

Savaskan, R. C.; Bhattacharya, S. & van Wassenhove, L. N. (2004), „Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing“, *Management Science* 50.2, S. 239–252. DOI: 10.1287/mnsc.1030.0186.

Schaltegger & Sturm 1989

Schaltegger, S. & Sturm, A. (1989), „Ecology induced management decision support: Starting points for instrument formation“. WWZ discussion paper No. 8914. University of Basel.

Schmidheiny 1998

Schmidheiny, S. (1998), *Changing Course: A global business perspective on development and the environment*. 5. print. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Schönherr 2014

Schönherr, O. (2014), „Modellierung, Simulation und Transformation von diskreten Prozessen in der Produktion und Logistik auf der Basis von SysML“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München.

Seaver 1994

Seaver, W. B. (1994), „Design considerations for remanufacturability, recyclability and reusability of user interface modules“. 1994 IEEE International Symposium on Electronics and The Environment (San Francisco, CA, USA, 2.–4. Mai 1994). New York und Piscataway, NJ: IEEE, S. 241–245. DOI: 10.1109/ISEE.1994.337251.

Seitz & Peattie 2004

Seitz, M. A. & Peattie, K. (2004), „Meeting the Closed-Loop Challenge: The Case of Remanufacturing“, *California Management Review* 46.2, S. 74–89. DOI: 10.2307/41166211.

Seliger 2007

Seliger, G. (2007), *Sustainability in Manufacturing: Recovery of Resources in Product and Material Cycles*. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-49871-1.

Siebertz & van Bebber et al. 2017

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 2. Aufl. 2017. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer.

Singhal & Tripathy et al. 2020

Singhal, D.; Tripathy, S. & Jena, S. K. (2020), „Remanufacturing for the circular economy: Study and evaluation of critical factors“, *Resources, Conservation and Recycling* 156.2, S. 104681. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104681.

Spengler 1998

Spengler, T. S. (1998), *Industrielles Stoffstrommanagement: Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen: Zugl.: Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr., 1998*. Bd. 54. Technological economics. Berlin: Erich Schmidt.

Staniskis & Arbaciauskas 2009

Staniskis, J. K. & Arbaciauskas, V. (2009), „Sustainability Performance Indicators for Industrial Enterprise Management“, *Environmental Research, Engineering and Management* 48.2, S. 42–50.

Stecca & Lanza et al. 2016

Stecca, G.; Lanza, G. & Peters, S. (2016), „Optimization in Manufacturing“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Hrsg. von L. Laperrière & G. Reinhart. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–5. DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7_6565-5.

Stefanic-Allmayer 1927

Stefanic-Allmayer, K. (1927), „Die günstigste Bestellmenge beim Einkauf“, *Sparwirtschaft - Zeitschrift für wirtschaftlichen Betrieb* 10, S. 504–508.

Steinhilper 2001

Steinhilper, R. (2001), „Recent trends and benefits of remanufacturing: from closed loop businesses to synergetic networks“. Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (Tokyo, Japan, 11.–15. Dez. 2001). IEEE Comput. Soc, S. 481–488. DOI: 10.1109/ECODIM.2001.992404.

Steinhilper 1998

Steinhilper, R. (1998), „Remanufacturing: The ultimate form of recycling“. Dissertation. Stuttgart: Fraunhofer IPA.

Steinhilper & Weiland 2015

Steinhilper, R. & Weiland, F. (2015), „Exploring New Horizons for Remanufacturing an Up-to-date Overview of Industries, Products and Technologies“. The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering (Sydney, Australia, 7.–9. Apr. 2015). Hrsg. von S. Kara. Bd. 29. Elsevier B.V., S. 769–773. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.041.

Stich & Oedekoven et al. 2013

Stich, V.; Oedekoven, D. & Brosze, T. (2013), „Informationssysteme für das Logistikmanagement“. *Logistikmanagement*. Hrsg. von G. Schuh & V. Stich. Springer eBook Collection Computer Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 257–304.

Stölting 2006

Stölting, W. (2006), *Lebenszyklusorientierte strategische Planung von Remanufacturing-Systemen für elektr(on)ische Investitionsgüter: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2006*. Bd. 176. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Subramoniam & Huisingsh et al. 2009

Subramoniam, R.; Huisingsh, D. & Chinnam, R. B. (2009), „Remanufacturing for the automotive aftermarket-strategic factors: literature review and future research needs“, *Journal of Cleaner Production* 17.13, S. 1163–1174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.03.004.

Sundin 2004

Sundin, E. (2004), „Product and process design for successful remanufacturing“. Dissertation. Linköping: Linköping University.

Sundin 2019

Sundin, E. (2019), „The Role of Remanufacturing in a Circular Economy“. *Remanufacturing in the Circular Economy: Operations, Engineering and Logistics*. Hrsg. von N. Nasr. Hoboken, NJ, USA: Wiley, S. 31–60. DOI: 10.1002/9781119664383.ch2.

Sundin & Dunbäck 2013

Sundin, E. & Dunbäck, O. (2013), „Reverse logistics challenges in remanufacturing of automotive mechatronic devices“, *Journal of Remanufacturing* 3.2, S. 1–8. DOI: 10.1186/2210-4690-3-2.

Sundin & Östlin et al. 2008

Sundin, E.; Östlin, J.; Rönnbäck, A. Ö.; Lindahl, M. & Sandström, G. Ö. (2008), „Remanufacturing of Products used in Product Service System Offerings“. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. Hrsg. von M. Mitsuishi; K. Ueda & F. Kimura. Bd. 9. London: Springer, S. 537–542. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8_110.

Suyabatmaz & Altekin et al. 2014

Suyabatmaz, A. Ç.; Altekin, F. T. & Şahin, G. (2014), „Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider“, *Computers & Industrial Engineering* 70, S. 74–89. DOI: 10.1016/j.cie.2014.01.004.

Swarnkar & Harding 2009

Swarnkar, R. & Harding, J. A. (2009), „Modelling and optimisation of a product recovery network“, *International Journal of Sustainable Engineering* 2.1, S. 40–55. DOI: 10.1080/19397030802576288.

Sydow 2010

Sydow, J. (2010), „Management von Netzwerkorganisationen – Zum Stand der Forschung“. *Management von Netzwerkorganisationen*. Hrsg. von J. Sydow. Bd. 27. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 373–470. DOI: 10.1007/978-3-8349-8593-4_12.

Tang & Naim 2004

Tang, O. & Naim, M. M. (2004), „The impact of information transparency on the dynamic behaviour of a hybrid manufacturing/remanufacturing system“, *International Journal of Production Research* 42.19, S. 4135–4152. DOI: 10.1080/00207540410001716499.

Thammatadatrakul & Chiadamrong 2019

Thammatadatrakul, P. & Chiadamrong, N. (2019), „Optimal inventory control policy of a hybrid manufacturing – remanufacturing system using a hybrid simulation optimisation algorithm“, *Journal of Simulation* 13.1, S. 14–27. DOI: 10.1080/17477778.2017.1387334.

Thevenin & Adulyasak et al. 2021

Thevenin, S.; Adulyasak, Y. & Cordeau, J. F. (2021), „Material Requirements Planning Under Demand Uncertainty Using Stochastic Optimization“, *Production and Operations Management* 30.2, S. 475–493. DOI: 10.1111/poms.13277.

Thierry & Salomon et al. 1995

Thierry, M.; Salomon, M.; van Nunen, J. & van Wassenhove, L. N. (1995), „Strategic Issues in Product Recovery Management“, *California Management Review* 37.2, S. 114–136. DOI: 10.2307/41165792.

Toktay & van der Laan et al. 2004

Toktay, L. B.; van der Laan, E. A. & Brito, M. P. de (2004), „Managing Product Returns: The Role of Forecasting“. *Reverse Logistics*. Hrsg. von R. Dekker; M. Fleischmann; K. Inderfurth & L. N. van Wassenhove. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 45–64. DOI: 10.1007/978-3-540-24803-3_3.

Tolio & Bernard et al. 2017

Tolio, T.; Bernard, A.; Colledani, M.; Kara, S.; Seliger, G.; Duflou, J.; Battaia, O. & Takata, S. (2017), „Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66.2, S. 585–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.001.

Treber 2020

Treber, S. N. (2020), „Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken: Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie. DOI: 10.5445/IR/1000119769.

van Wassenhove & Zikopoulos 2010

van Wassenhove, L. N. & Zikopoulos, C. (2010), „On the effect of quality overestimation in remanufacturing“, *International Journal of Production Research* 48.18, S. 5263–5280. DOI: 10.1080/00207540903150585.

Váncza 2016

Váncza, J. (2016), „Production Networks“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Hrsg. von L. Laperrière & G. Reinhart. Bd. 147. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7_16829-1.

VDI 3633-1 2014

VDI 3633-1 (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 3633-12 2020

VDI 3633-12 (2020), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Simulation und Optimierung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 5200-4 2016

VDI 5200-4 (2016), *Fabrikplanung: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Vereinte Nationen 1987

Vereinte Nationen (1987), *Development and International Economic Co-operation: Environment: Report of the World Commission on Environment and Development*. Hrsg. von UN Secretary-General & World Commission on Environment and Development.

Wagner & Whitin 1958

Wagner, H. M. & Whitin, T. M. (1958), „Dynamic Version of the Economic Lot Size Model“, *Management Science* 5.1, S. 89–96. DOI: 10.1287/mnsc.5.1.89.

Walther 2010

Walther, G. (2010), *Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus*. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-8643-6.

Wannenwetsch 2014

Wannenwetsch, H. (2014), „Materialbestand und Materialbedarf im Unternehmen“. *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*. Hrsg. von H. Wannenwetsch. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 65–114. DOI: 10.1007/978-3-642-45023-5_3.

Wannenwetsch 2021

Wannenwetsch, H. (2021), *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-61095-4.

Warsen & Laumer et al. 2011

Warsen, J.; Laumer, M. & Momberg, W. (2011), „Comparative Life Cycle Assessment of Remanufacturing and New Manufacturing of a Manual Transmission“. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (Braunschweig, Germany, 2.–6. Mai 2011). Hrsg. von J. Hesselbach & C. Herrmann. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 67–72.

Weber & Kummer 1998

Weber, J. & Kummer, S. (1998), *Logistikmanagement. 2., aktualisierte und erw. Aufl.* Bd. 141. Sammlung Poeschel. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Wei & Tang et al. 2015

Wei, S.; Tang, O. & Sundin, E. (2015), „Core (product) Acquisition Management for remanufacturing: a review“, *Journal of Remanufacturing* 5.1, S. 523. DOI: 10.1186/s13243-015-0014-7. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13243-015-0014-7>.

Wiendahl & Lutz 2002

Wiendahl, H.-P. & Lutz, S. (2002), „Production in Networks“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51, S. 573–586. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61701-6.

Wiendahl 2011

Wiendahl, H.-H. (2011), *Auftragsmanagement der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-19149-7.

World Economic Forum 2014

World Economic Forum (2014), „Towards the circular economy: accelerating the scale-up across global supply chains“. *World Economic Forum Geneva*. Geneva.

Yang 2019

Yang, S. (2019), „Global Challenges and Market Transformation in Support of Remanufacturing“. *Remanufacturing in the Circular Economy*. Hrsg. von N. Nasr. Wiley, S. 169–210. DOI: 10.1002/9781119664383.ch7.

Zhang & Guan et al. 2019

Zhang, F.; Guan, Z.; Zhang, L.; Cui, Y.; Yi, P. & Ullah, S. (2019), „Inventory management for a remanufacture-to-order production with multi-components (parts)“, *Journal of Intelligent Manufacturing* 30.1, S. 59–78. DOI: 10.1007/s10845-016-1232-z.

Zhou & Xie et al. 2016

Zhou, L.; Xie, J.; Gu, X.; Lin, Y.; Ieromonachou, P. & Zhang, X. (2016), „Forecasting return of used products for remanufacturing using Graphical Evaluation and Review Technique (GERT)“, *International Journal of Production Economics* 181.1, S. 315–324. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.04.016.

Zikopoulos 2017

Zikopoulos, C. (2017), „Remanufacturing lotsizing with stochastic lead-time resulting from stochastic quality of returns“, *International Journal of Production Research* 55.6, S. 1565–1587. DOI: 10.1080/00207543.2016.1150616.

Zikopoulos & Tagaras 2007

Zikopoulos, C. & Tagaras, G. (2007), „Impact of uncertainty in the quality of returns on the profitability of a single-period refurbishing operation“, *European Journal of Operational Research* 182.1, S. 205–225. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.025.

Zikopoulos & Tagaras 2008

Zikopoulos, C. & Tagaras, G. (2008), „On the attractiveness of sorting before disassembly in remanufacturing“, *IIE Transactions* 40.3, S. 313–323. DOI: 10.1080/07408170701488078.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Unterscheidung verschiedener Akteure in der Rückführungslogistik, in Anlehnung an Kalverkamp (2018), Kalverkamp & Raabe (2018) und Guidat; Uoti et al. (2015).	11
2.2	Matrix der Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Rückführungslogistik, in Anlehnung an Nuss; Sahamie et al. (2015).	13
2.3	Begriffe aus der Bestellmengenplanung, in Anlehnung an Kummer; Grün et al. (2013), Lasch (2021) und Wannenwetsch (2021).	16
2.4	Klassifikation von Bestellpolitiken, in Anlehnung an Lasch (2021) und Domschke; Scholl et al. (1997).	18
2.5	Ausschnitt aus der Wissenstreppe, in Anlehnung an North (2011).	21
2.6	Merkmale des Informationsaustauschs, in Anlehnung an Treber (2020).	22
2.7	Unterscheidung verschiedener Simulationsmethoden, in Anlehnung an Law (2015) und Grigoryev (2022).	28
2.8	Optimierungsmethoden innerhalb der skalaren Optimierung, in Anlehnung an Stecca; Lanza et al. (2016).	29
2.9	Konzept der simulationsbasierten Optimierung, in Anlehnung an März; Krug et al. (2011).	31
2.10	Kategorisierung der Kopplungsmethoden von Simulation und Optimierung, in Anlehnung an März; Krug et al. (2011).	32
2.11	Ablauf einer Simulationsstudie, in Anlehnung an Gutenschwager; Rabe et al. (2017), VDI 3633-1.	35
4.1	Überblick über den Lösungsansatz.	58
5.1	Ableitung von Materialflüssen aus den identifizierten Core-Quellen, grün: fokussierte Materialflüsse (A_Weldner 2021).	60
5.2	Wertstrombasierte Modellierung des Materialflusses in der Rückführungslogistik (A_Nilles 2022, A_Eisen 2021).	63
5.3	Profildiagramm (PD) der Domäne <i>Rückführungslogistik</i> (A_Eisen 2021).	65
5.4	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) der Entität <i>Core</i> (Goodall; Sharpe et al. 2019, A_Eisen 2021).	67
5.5	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs <i>Werkstatt</i> (A_Eisen 2021).	67
5.6	Modellierung des Remanufacturings nach der <i>Pull</i> -Steuerung (A_Eisen 2021).	69
5.7	Detaillierte Interviewergebnisse (A_Gallei 2021).	71
5.8	Charakteristische Merkmale der Informationen (A_Gallei 2021, A_Ippenbach 2020).	73

5.9	Übergang klassischer Rezeptoren auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Rezeptoren.	76
5.10	Modellierung des Informationsagenten (A_Eisen 2021, A_Nilles 2022). . . .	78
5.11	Formalisierung der Herausforderungen in der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing (A_Eisen 2021).	79
5.12	Informationsvektor \vec{i} des Cores $co \in CO$ und Komponentenvektor jeder enthaltene Komponente $kom \in Kom$ des Cores co (A_Nilles 2022). . . .	81
5.13	Vorgehen zur Bestimmung dynamischer Regenerationsraten (A_Nilles 2022).	82
5.14	Modellierung des Kürzeste-Wege-Graphen zur Lösung des <i>Wagner-Whitin</i> -Modells, in Anlehnung an Domschke; Drexl et al. 2015.	87
5.15	Aufbau und Module des simulationsbasierten Optimierungsmodells.	94
5.16	Aufbau des MRP-Moduls.	96
5.17	Integration und Ablauf der Materialbedarfsplanung für Neukomponenten im Remanufacturing (A_Nilles 2022).	97
5.18	Ablaufplanung der simulationsbasierten Optimierung (A_Dressler 2023). . .	99
5.19	Framework zur Ableitung von Handlungsempfehlungen.	105
6.1	Untersuchte Stückzahlenszenarien hinsichtlich Core-Rückfluss und Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten, in Anlehnung an Östlin 2008.	116
6.2	Veränderung der durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt im Vergleich von keinem zum vollständigen Informationsaustausch für das Stückzahlenszenario Nachfrage-Angebot-Matching.	120
6.3	Veränderung der durchschnittlichen Gesamtkosten je Produkt im Detail. . .	121
6.4	Veränderung der Transport-, Straf- und Beschaffungskosten je Produkt im Vergleich.	123
6.5	Auswirkungen der Variation der Mindestbestellmenge auf die Beschaffungskosten.	126
6.6	Auswirkungen der Variation der Lieferzeit auf die Liefertreue.	127
6.7	Entwicklung der Liefertreue für die SM-Heuristik über alle drei Stückzahlenszenarien.	128
6.8	Veränderung der durchschnittlichen Liefertreue je Produkt im Detail.	129
6.9	Durchschnittliche CO_2 -Belastung je Core U_{co} im Coreüberschuss unter Verwendung der (t,q) -Bestellpolitik.	130
6.10	Veränderung der durchschnittlichen CO_2 -Belastung je Produkt im Detail. . .	131
6.11	Verlauf der Aufarbeitungsquote im Nachfrage-Angebot-Matching für die (s,q) - und SM-Bestellpolitiken.	132
6.12	Veränderung der Aufarbeitungsquote im Detail.	133

6.13	Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlscenario Nachfrageüberschuss.	137
6.14	Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlscenario Nachfrage-Angebot-Matching.	138
6.15	Vergleich der echtzeitfähigen Bestellpolitiken mit den WW-Ergebnissen für das Stückzahlscenario Coreüberschuss.	139
6.16	Auswertung des konstanten Informationsvektors \vec{i} in Bezug auf Fehlmengen und CO ₂ -Belastung.	140
6.17	Identifikation der besten Bestellpolitik für jede Kennzahl in Abhängigkeit des Stückzahlscenarios und Informationsaustauschs.	143
6.18	Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit des untersuchten Stückzahlscenarios, Informationsaustauschs und Werkstattanbindung nach Bewertung der Ökoeffizienz mittels Nutzwertanalyse.	145
6.19	Insensitivitätsintervalle der untersuchten Kennzahlen für die Bestellpolitiken im Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 70 % Werkstattanbindung.	148
7.1	Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.	154
A2.1	Framework zur Gestaltung und Steuerung von Core-Rückflüssen (A_Weldner 2021).	XVI
A2.2	Geschäftsprozess zur Identifikation von Core-Quellen (A_Weldner 2021).	XX
A2.3	Geschäftsprozess zur Definition von Rückführungsstrategien (A_Weldner 2021).	XXI
A2.4	Geschäftsprozess zur Rückfluss-Gestaltung (A_Weldner 2021).	XXII
A3.1	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Stereotypen <i>Transport</i> (A_Eisen 2021).	XXIII
A3.2	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs <i>Sammelstandort</i> (A_Eisen 2021).	XXIV
A3.3	Internes Blockdiagramm (IBD) des Akteurs <i>Remanufacturing-Standort</i> (A_Eisen 2021).	XXV
A3.4	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs <i>Lieferant</i> (A_Eisen 2021).	XXVI
A3.5	Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs <i>Distribution</i> (A_Eisen 2021).	XXVI
A7.1	Kurvenschar der Beta-Binomialverteilung	XXXIX
A8.1	Histogramm der Core- und Nachfrage-Ankünfte in den drei Szenarien Nachfrageüberschuss, Nachfrage-Angebot-Matching und Coreüberschuss.	XLI
A10.1	Auswirkungen der Variation des Ziellagerbestands S_{kom} auf die Liefertreue LT	XLIII

A10.2	Auswirkungen der Variation des Meldebestands s_{kom} auf die Beschaffungskosten $c_{beschaffung}$	XLIV
A10.3	Auswirkungen der Variation der Informationssensitivität IS_{kom} auf die Liefertreue LT	XLV
A10.4	Auswirkungen der Variation der statischen Regenerationsraten $R_{stat,kom}$ auf die Liefertreue LT	XLV
A10.5	Auswirkungen der Variation der Wartezeit $w_{D_{rpro}}$ auf die Liefertreue LT	XLVI
A11.1	Originale, unbereinigte Darstellung der Handlungsempfehlungen.	XLVII
A11.2	Visualisierung der berechneten Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse für alle Bestellpolitiken im Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.	XLVIII
A11.3	Insensitivitätsintervalle für den Nachfrageüberschuss.	L
A11.4	Insensitivitätsintervalle für das Nachfrage-Angebot-Matching.	LI
A11.5	Insensitivitätsintervalle für den Coreüberschuss.	LII

Tabellenverzeichnis

2.1	Kombination aus ABC- und XYZ-Analyse, in Anlehnung an Lasch (2021) . . .	15
2.2	System- und Modelleigenschaften im Überblick, in Anlehnung an Guten- schwager; Rabe et al. (2017).	27
2.3	Klassifizierung ausgewählter Lösungsverfahren der simulationsbasierten Optimierung, in Anlehnung an Figueira & Almada-Lobo (2014) und Amaran; Sahinidis et al. (2014).	33
3.1	Bewertung relevanter Forschungsansätze (in alphabetischer Reihenfolge) zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik.	55
5.1	Kategorischer Nutzen von produktspezifischen Informationsarten für Planungs- und Steuerungsaufgaben in der RL (A_Gallei 2021).	74
5.2	Rezeptormodell zur Darstellung des Nutzens von Informationen in der Mate- rialbedarfsplanung (A_Gallei 2021).	77
5.3	Übersicht der Steuerfaktoren (A_Förster 2023).	101
5.4	Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien mit variierendem Informations- vektor \vec{i} (vl).	103
5.5	Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien der Benchmark-Läufe (BL). . . .	103
5.6	Beispielhafte Ausprägungen für Szenarien mit konstantem Informationsvek- tor \vec{i} (kl).	104
6.1	Beispielhafte Modellierung der Werkstätten anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen.	110
6.2	Auswirkungen und Häufigkeitsverteilung verschiedener Informationsarten und -ausprägungen auf die dynamische Regenerationsrate der Kompen- ten $R_{dyn, kom}$ für verschiedene Optionen.	112
6.3	Beispielhafte Modellierung der Produktstruktur im Anwendungsfall.	114
6.4	Ausprägungen der Steuerfaktoren (A_Förster 2023).	117
6.5	Prozentuale Verbesserung der untersuchten Kennzahlen eines vollständigen Informationsaustauschs mit 100 % Werkstattanbindung im Vergleich zu keinem Informationsaustausch mit 0 % Werkstattanbindung.	119
6.6	Beispielhafte Nutzwertanalyse zur Berechnung der Ökoeffizienz der einzel- nen Bestellpolitiken am Beispiel des Coreüberschusses bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.	144
6.7	Bestimmung der Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse der PROMETHEE- Methode für jede Bestellpolitik am Beispiel des Coreüberschusses bei voll- ständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.	147

7.1	Erfüllungsgrad der an den Lösungsansatz gestellten Anforderungen.	149
A1.1	Einführung in die Experteninterviews (Weldner 2021).	XII
A1.2	Fünf inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens (Weldner 2021).	XIV
A1.3	Abschluss der Experteninterviews (Weldner 2021).	XV
A1.4	Liste von durchgeführten Interviews (Weldner 2021).	XV
A4.1	Einführung in die Experteninterviews (Gallei 2021).	XXVIII
A4.2	Drei inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Remanufacturing- Unternehmen (Gallei 2021).	XXIX
A4.3	Vier inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Sammel- standorten (Gallei 2021).	XXXI
A4.4	Drei inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Werkstätten (Gallei 2021).	XXXII
A4.5	Abschluss der Experteninterviews (Gallei 2021).	XXXII
A4.6	Liste von durchgeführten Interviews (Gallei 2021).	XXXIII
A5.1	Erweiterungen des Rezeptormodells zur Darstellung des Nutzens von Infor- mationen in der Netzwerkkonfiguration und Routenplanung (A_Gallei 2021).	XXXIV
A6.1	Modellierung der Werkstätten <i>wks</i> anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen (Teil 1) (Nilles 2022).	XXXVII
A6.2	Modellierung der Werkstätten <i>wk</i> anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen (Teil 2) (Nilles 2022).	XXXVIII
A6.3	Modellierung der Sammelstandorte <i>sast</i> , der Remanufacturing-Standorte <i>rest</i> und des Lieferanten <i>l</i> anhand der x- und y-Koordinaten (Nilles 2022).	XXXVIII
A7.1	Verwendete Parameter der Beta-Binomialverteilung und resultierende bzw. gerundete Auftrittswahrscheinlichkeit in den verschiedenen Optionen (För- ster 2023).	XL
A8.1	Verwendete Parameter der Exponentialverteilung zur Modellierung der Core- und Nachfrage-Ankünfte.	XLI
A9.1	Verteilung der Läufe der simulationsbasierten Optimierung auf die verschie- denen Szenarien.	XLII

Liste eigener Veröffentlichungen

- Benfer, M.; Gartner, P.; Klenk, F.; Wallner, C.; Jaspers, M.-C.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „A Circular Economy Strategy Selection Approach: Component-based Strategy Assignment using the Example of Electric Motors“. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2022) (Vancouver, Canada, 17. Mai 2022). Hrsg. von D. Herberger, S. 22–31. DOI: 10.15488/12133.
- Bodin, U.; Dhanrajani, S.; Abdalla Abdelrahman, H.; Diani, M.; Klenk, F.; Colledani, M.; Palm, E. & Schelén, O. (2021), „Demand-supply matching through auctioning for the circular economy“. 10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2020) - Digital Technologies as Enablers of Industrial Competitiveness and Sustainability (Budapest, Hungary, 11. Okt. 2021). Hrsg. von J. Vancza & P. G. Maropoulos. Bd. 54, S. 82–87. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.07.013.
- Hochdörffer, J.; Klenk, F.; Fusen, T.; Häfner, B. & Lanza, G. (2021), „Approach for integrated product variant allocation and configuration adaption of global production networks featuring post-optimality analysis“, *International Journal of Production Research*, S. 1–25. DOI: 10.1080/00207543.2021.1884765.
- Klenk, F.; Gallei, M.; Wurster, M.; Wagner, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „Potential assessment of an increased exchange of core information for remanufacturing in automotive reverse supply chains“. 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (Leuven, Belgium, 4. Apr. 2022). Hrsg. von W. Dewulf & J. Duflou. Bd. 105, S. 446–451. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.074.
- Klenk, F.; Gleich, K.; Meister, F.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Approach for developing implementation strategies for circular economy in global production networks“. 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE 2020) (Grenoble, France; Online, 13. Mai 2020). Hrsg. von D. Brissaud; P. Zwolinski; H. Paris & A. Riel. Bd. 90, S. 127–132. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.052.
- Klenk, F.; Haefner, B.; Lanza, G. & Wagner, M. (2019), „Kreislaufwirtschaft in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. Analyse aktueller Herausforderungen zur industriellen Umsetzung der Kreislaufwirtschaft“, *Industrie 4.0 Management* 35.6, S. 29–32. DOI: 10.30844/I40M_19-6_S25-28.
- Klenk, F.; Kerndl, F.; Heidinger, F.; Benfer, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „Product allocation and network configuration in global production networks“, *Production Engineering* 68.2, S. 117–132. DOI: 10.1007/s11740-022-01149-4.
- Klenk, F.; Peukert, S. & Lanza, G. (2021), „Product-Mix Allocation“. *Global Manufacturing Management*. Hrsg. von Friedli, Thomas; Lanza, Gisela & Remling, Dominik. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-72740-6_9.

Klenk, F.; Potarca, M.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Kreislaufwirtschaft in Produktionsnetzwerken. Parameter und Stellschrauben für die erfolgreiche Umsetzung nachhaltiger Produktionsprinzipien“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115.10, S. 668–672. DOI: 10.1515/zwf-2020-1151005.

Lanza, G.; Klenk, F. & Krahe, C. (2019), „Track & Trace als Basis für die Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie“, *Werkstoffe in der Fertigung* 2019.6, S. 22–23.

Anhang

A1 Interviewleitfaden und weiterführende Informationen zur Modellierung des Materialflusses

Die Tabellen A1.1-A1.3 stellen die Einführung, die fünf inhaltlichen Blöcke sowie den Abschluss der durchgeführten Experteninterviews dar. Tabelle A1.1 stellt dabei die Einführung in die Interviews dar, in denen den Teilnehmenden zunächst allgemeine Informationen zum zugrundeliegenden Forschungsprojekt und der Zielsetzung, zum Ablauf sowie weiteren Formalien gegeben wird.

Tabelle A1.1: Einführung in die Experteninterviews (Weldner 2021).

Einführung	
Abschnitt	Text
Begrüßung	Vielen Dank, dass Sie sich Zeit für das Interview nehmen.
Projektinformation und Zielsetzung	Bevor wir mit dem Interview beginnen, möchte ich Ihnen kurz erzählen, worum es in dem Projekt geht: DigiPrime ist ein von der EU gefördertes Projekt mit dem Ziel der Entwicklung eines neuen Konzepts für eine digitale Plattform der Kreislaufwirtschaft. Die Grundlage für eine solche Plattform ist die datengestützte Wiederverwendung und Wiederherstellung von Produkten. Um Produkte wiederherstellen zu können ist ein kritischer Faktor wiederum die Rückführung von Produkten. Heute wollen wir uns insbesondere auf die Rückführung von Elektronikprodukte fokussieren.
Ablauf des Interviews	Im Verlauf des Gesprächs werde ich Ihnen verschiedene offene Fragen stellen, bei denen ich Sie grundsätzlich bitte, einfach all das zu erzählen, was Ihnen zu diesem Thema einfällt.
Kein Test der Person und der Fähigkeiten	Ich werde Sie dabei nicht unterbrechen, da es kein „richtig“ oder „falsch“ gibt und dementsprechend auch keine Wertung.
Unabhängigkeit	Außerdem bin ich unabhängig und deshalb nicht davon betroffen, wenn Sie negative oder positive Anmerkungen gegenüber dem Thema allgemein oder dem dahinterstehenden Unternehmen machen. Ich freue mich, wenn Sie ganz frei Ihre Meinung äußern.
Dauer	Auch werde ich Ihnen genügend Zeit lassen, fühlen Sie sich also nicht unter Druck gesetzt. Ich schätze, dass das Interview etwa 45 bis 60 Minuten dauern wird.
Formalien	Nun noch zu ein paar formellen Angelegenheiten: Ich möchte das Interview für die spätere Auswertung aufnehmen und es anschließend verschriftlichen. Dadurch kann ich Ihnen im Gespräch besser folgen, da ich nicht mitschreiben muss. Selbstverständlich verwenden wir das Interviewmaterial in dem Projekt streng vertraulich und anonym. Das heißt: Alle persönlichen Daten, die Rückschlüsse auf Sie erlauben, werden gelöscht oder anonymisiert. Darüber hinaus werden alle Daten nur dann anonymisiert ausgewertet, wenn Sie dazu Ihre Einverständniserklärung nach dem Interview gegeben haben. Ist das für Sie in Ordnung?

Tabelle A1.2 stellt die fünf inhaltlichen Blöcke des Interviewleitfadens dar, die entsprechend des idealtypischen Arbeitsablaufs in der Werkstatt gegliedert sind. Somit beschäftigt sich der erste Block zunächst mit dem Ausbau bzw. Wechsel des Gebrauchprodukts aus dem Fahrzeug, im Speziellen mit einem Elektronikteil. Der zweite Block geht im Detail auf die Bestellung eines neuen bzw. Austauschprodukts ein und klärt dabei insbesondere Fragen hinsichtlich vertraglicher Aspekte und Kontakt zum Lieferanten. Im dritten und vierten Block geht es um den Umgang mit dem ausgebauten Elektronikteil im Speziellen bzw. ausgebauten Core im Allgemeinen, wobei insbesondere Hindernisse im aktuellen Prozessablauf identifiziert werden sollen. Der fünfte Block untersucht den Status Quo des Rückführungsprozesses mit Fokus auf die beteiligten Akteure, mögliche Anreize, Hindernisse und Verbesserungspotentiale.

Tabelle A1.3 stellt den formalen Abschluss der durchgeführten Experteninterviews dar.

Tabelle A1.4 gibt eine anonymisierte und abstrahierte Übersicht über die durchgeführten Interviews. Insgesamt wurden 30 Werkstätten unterschiedlicher Art und Größe kontaktiert. Die zehn erhaltenen Rückmeldungen entsprechen einer Antwortrate von 33,33 %, wobei letztlich aus zeitlichen und organisatorischen Gründen acht Interviews durchgeführt wurden.

Die Auswertung der Interviews erfolgte in einem iterativen Prozess (vgl. Kuckartz 2012). Die Schritte umfassten dabei die Codierung, die Aufzeichnung von Beobachtungen, mögliche Interpretationen sowie Anmerkungen. Zur Auswertung wurde die Software MaxQDA¹ verwendet. Die Codierung erfolgte dabei induktiv und somit lediglich auf den Interviewergebnissen.

¹Für weitere Informationen siehe <https://www.maxqda.com/de/> [20.03.2023].

Tabelle A1.2: Fünf inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens (Weldner 2021).

Block 1: Ausbau bzw. Wechsel des Elektronikteils			
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen	Aufrechterhaltungsfragen
Können Sie mir erzählen, wie Prozesse des Wechsels eines Elektronikteils (alternativ: eines spezifischen Teils) aussehen?	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendeter Diagnosetester • Verwendete Diagnosesoftware • Beteiligte Personen • Zeitpunkt des Ausbaus 	<ul style="list-style-type: none"> • Wie ist der Umgang mit den Daten (Art und Speicherung inkl. interne Dokumentation von Fehlercodes)? • Sind Diagnosetester mit dem Internet verbunden? 	<ul style="list-style-type: none"> • Können Sie das genauer beschreiben? • Haben Sie ein Beispiel dafür, damit ich mir das konkreter vorstellen kann? • Alternativ: Wie ist der Prozess bei einem Navigationssystem?
Block 2: Bestellprozess des elektronischen Ersatzteils			
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen	Aufrechterhaltungsfragen
Können Sie mir beschreiben, wie die Bestellung eines Ersatzteil (alternativ: eines spezifischen Teils) abläuft?	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitpunkt • Beteiligte Personen • Art des Prozesses (Überprüfen verschiedener Optionen, Standardprozess) • Kundenanforderungen • Vertragliche Aspekte • Kontakt zum Lieferanten • Angebotene Optionen beim Lieferanten (bzgl. der Austauschteile)? • Lieferung • Zeitpunkt des Eintreffens • Umgang mit Verpackung 	<ul style="list-style-type: none"> • Können Sie mir einmal beschreiben, wie der Kontakt zu Kunden gestaltet wird? • Welche Möglichkeiten hat der Kunde? • Gibt es vertragliche Vorgaben bzgl. der Nachbestellung? 	<ul style="list-style-type: none"> • Haben Sie ein Beispiel dafür, sodass ich es mir konkreter vorstellen kann? • Können Sie mir das einmal beispielhaft zeigen?
Block 3: Umgang mit ausgebautem Elektronikteil			
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen	Aufrechterhaltungsfragen
Können Sie mir erzählen was mit den ausgebauten Elektronikteilen passiert?	<ul style="list-style-type: none"> • Umgang mit Altteilen (Lagerung, Abholung, Bezahlung bei Abholung, etc.?) • Zeitliche Aspekte • Beteiligte Personen • Vertragliche Bindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kann die Werkstatt mit Elektronikaltteilen Geld verdienen? • Was stellen Hindernisse für Sie dar bezogen auf das Zurücksenden von Altteilen? 	<ul style="list-style-type: none"> • Können Sie mir das einmal beispielhaft zeigen? • Gibt es weitere Hindernisse?
Block 4: Umgang mit anderen ausgebauten Teilen			
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen	Aufrechterhaltungsfragen
Haben Sie schon Erfahrung mit der Rückführung anderer Teile gemacht?	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessablauf • Verwendete Systeme und Funktionsweise 	<ul style="list-style-type: none"> • Nehmen Sie in solchen Prozessen Hindernisse wahr? 	<ul style="list-style-type: none"> • Können Sie mir das einmal beispielhaft zeigen? • Gibt es weitere Hindernisse?
Block 5: Rückführungsprozess			
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen	Aufrechterhaltungsfragen
Wie wäre aus Ihrer Sicht ein idealtypischer Ablauf um Teile zurückzusenden?	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendetes System • Unterstützung • Beteiligte Akteure • Mögliche Anreize 	<ul style="list-style-type: none"> • Was hindert die Umsetzung eines solchen Prozesses? 	

Tabelle A1.3: Abschluss der Experteninterviews (Weldner 2021).

Abschluss	
Abschnitt	Text
Ausliegsfragen	Wir haben jetzt Einiges besprochen, Gibt es von Ihrer Seite aus noch etwas, dass Sie gerne noch erzählen möchten, aber bisher noch nicht zur Sprache gekommen ist?
Danksagung	Ich möchte mich nochmal herzlich bedanken, dass Sie sich Zeit für das Interview genommen haben.
Feedback	Wie haben Sie das Interview empfunden, wie war es für Sie? Was hat Sie dazu bewogen, an dem Interview teilzunehmen? Was könnten wir besser machen?
Einverständniserklärung	Unterschreiben der Einverständniserklärung
Mögliche Aspekte für anschließenden Fragebogen	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendeter Diagnosetester • Verwendete Diagnosesoftware • Wie häufig im Monat tauschen Sie Elektronikteile aus? • Häufigkeit der verschiedenen Arten der Bestellung • Häufigkeit der zurückgeschickten Teile abhängig von den genutzten Systemen (z. B. Bosch Repair Service)?

Tabelle A1.4: Liste von durchgeführten Interviews (Weldner 2021).

	Werkstatt-Typ	Größe	Ort
W1	IAM-Werkstatt (Franchise)	Klein	Wolfenbüttel
W2	IAM-Werkstatt	Klein	Göttingen
W3	IAM-Werkstatt	Klein	Karlsruhe
W4	OES-Werkstatt	Groß	Karlsruhe
W5	IAM-Werkstatt (Franchise)	Klein	Karlsruhe
W6	IAM-Werkstatt (Franchise)	Klein	Karlsruhe
W7	OES-Werkstatt	Groß	Hannover
W8	OES-Werkstatt	Groß	Karlsruhe

A2 Geschäftsprozesse zur Gestaltung und Steuerung von Core-Rückflüssen

Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit auf (vgl. A_Weldner 2021).

Das im Folgenden vorgestellte Framework beinhaltet eine Strukturierung der Core-Akquisitionsfaktoren unter Berücksichtigung des Core-Akquisitionsmanagements (vgl. Wei; Tang et al. 2015). Dieses umfasst die Geschäftsprozesse der Identifikation von Core-Quellen, der Rückführungsstrategien sowie der Gestaltung der Rückführungslogistik. Das Framework enthält jedoch keine Kostenbetrachtung, sondern fokussiert sich ausschließlich auf mögliche Hebel zur Steigerung des Core-Rückflusses.

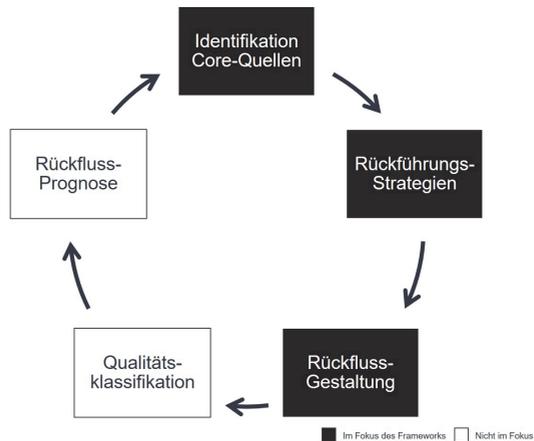


Abbildung A2.1: Framework zur Gestaltung und Steuerung von Core-Rückflüssen (A_Weldner 2021).

Geschäftsprozess Identifikation von Core-Quellen

Die Identifikation von Core-Quellen im Automotive Aftermarket beinhaltet die Bewertung des Volumenpotentials sowie der Qualität der Cores. Der Geschäftsprozess unterstützt somit die Entscheidungsfindung je nach individueller Situation und Rahmenbedingungen (z. B. Volumenziel). Neben der Bewertung der allgemeinen Eignung von Core-Quellen hinsichtlich ihres Volumens werden darüber hinaus auch Richtlinien zur akteurbezogene Volumenabschätzungen identifiziert. Der Geschäftsprozess lässt sich somit in vier Schritte unterteilen, wie in Abbildung A2.2 dargestellt.

Im ersten Schritt wird die Gesetzgebung und insb. staatliche Umweltvorschriften untersucht, da diese einen großen Einfluss auf den Rückfluss von Cores haben und somit erste Anhaltspunkte liefern können (vgl. Ayres; Ferrer et al. 1997; Jena & Sarmah 2015). Lassen sich durch solche Vorschriften bestimmte Core-Quellen bereits ausschließen oder fokussieren, so kann die nachfolgende Analyse dadurch vereinfacht werden.

Im zweiten Schritt wird das generelle Volumenpotential von Core-Quellen untersucht. Hierzu muss zunächst die Lebenszyklus-Phase des zu untersuchenden Produktportfolios bestimmt werden. Nach Steinhilper (1998) können aus der Lebenszyklus-Phase bereits die dargestellten Implikationen auf das Volumenpotential geschlossen werden. Weiterhin müssen für IAM- und OEM-Werkstätten die Core-Klassifikation und weitere Besonderheiten untersucht werden, bspw. hinsichtlich Abhängigkeiten beim Verkaufskanal oder in den Produkten enthaltene Software und damit einhergehende Herausforderungen bei der Aufarbeitung. Zur Sicherstellung der Allgemeingültigkeit werden auch Schrottplätze in die Analyse einbezogen und für diese die Bewertung der Anzahl in Umlauf befindlichen Gebrauchtfahrzeugen für die Abschätzung des Volumenpotentials berücksichtigt (Kalverkamp & Raabe 2018).

Die ersten beiden Schritte sind unabhängig von Maßnahmen von Drittparteien. Diese gegenseitigen Einflüsse bzw. Abhängigkeiten werden daher im dritten Schritt detailliert betrachtet. Hierbei werden strategische Faktoren wie der Marktwettbewerb, das Vorhandensein alternativer zirkulärer Optionen für die Cores, sowie die Möglichkeit einer strategischen Verdrängung von Cores durch OEMs betrachtet und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Volumenpotentials bewertet. Weiterhin wird das mögliche Verhalten von Endkunden berücksichtigt.

Im vierten und letzten Schritt des vorgestellten Geschäftsprozesses wird die Eignung der Core-Quelle hinsichtlich ihres Qualitätspotentials bewertet. Hierzu sind insbesondere bei mechatronischen und elektronischen Cores die Lagerhaltungsbedingungen sowie der korrekte Umgang, Ausbau und Transport der Cores zu berücksichtigen und ungeeignete Core-Quellen von der weiteren Betrachtung auszuschließen. Für die Analyse im Rahmen der zugrundeliegenden Arbeit haben sich dabei die Schrottplätze aufgrund der Nicht-Erfüllung von Volumen- und Qualitätsanforderungen als ungeeignete Core-Quelle herausgestellt.

Die Durchführung einer solchen Bewertung für jede Core-Quelle führt zu einer Übersicht geeigneter Quellen, die derzeit für die Rückführung von Cores zur Verfügung stehen, inkl. Angaben hinsichtlich erreichbarer Volumen und Qualitäten der Cores.

Geschäftsprozess Rückführungsstrategien

Basierend auf den identifizierten und bewerteten Core-Quellen können im nächsten Schritt geeignete Rückführungsstrategien basierend auf Östlin; Sundin et al. 2008 untersucht werden

(vgl. Abbildung A2.3). Der Geschäftsprozess muss daher für jede Core-Quelle individuell durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt findet daher ein grobes Clustering möglicher Rückführungsstrategien auf Basis der Beziehung zwischen den Akteuren statt. Wenn der Produktbesitz dabei über die gesamte Nutzungsphase beim Originalhersteller verbleibt (Lacy & Rutqvist 2015), lässt sich bereits die eigentumsbasierte Rückführungsstrategie als am besten geeignet identifizieren. Wenn der Produktbesitz jedoch an andere Akteure übergeht, müssen andere Rückführungsstrategien identifiziert und die Kombination mit möglichen Core-Quellen evaluiert werden (Lind; Olsson et al. 2014; Östlin; Sundin et al. 2008).

Im zweiten Schritt werden, abhängig von den individuellen Core-Quellen, Möglichkeiten zur Identifikation geeigneter Rückführungsstrategien aufgezeigt. Für IAM-Werkstätten müssen dabei mehrere Aspekte berücksichtigt werden: Zunächst gilt es zu identifizieren, ob Abhängigkeiten von Vertriebskanälen existieren sowie die Zeit- und Preissensitivitäten der Kunden zu bewerten (Östlin; Sundin et al. 2008). Wenn Zeit keine kritische Rolle spielt oder Kunden den Preis eines neuen Ersatzproduktes als zu hoch ansehen, lassen sich Direktaufträge als geeignete Rückführungsstrategie identifizieren. Andernfalls muss die Notwendigkeit finanzieller Anreize berücksichtigt werden (Subramoniam; Huisinigh et al. 2009; Jena & Sarmah 2015), sodass abhängig hiervon eine freiwillige Rückgabe oder ein Rückkauf (bzw. eine Rückführung auf Basis von Krediten bzw. Pfand als Sonderform hiervon) in Frage kommt. Hinsichtlich OEM-Werkstätten ist insbesondere und ausschließlich die Prozessabhängigkeiten der Werkstätten von ihrer übergeordneten Marke relevant. Wenn es eine Prozessabhängigkeit gibt, kommt lediglich ein Service-Vertrag mit der übergeordneten Marke und somit eine Art Vertragsremanufacturing (CR) in Frage, andernfalls muss erneut die Frage hinsichtlich der Notwendigkeit finanzieller Anreize beantwortet werden. Schrottplätze nehmen in diesem Geschäftsprozess insofern eine Sonderrolle ein, als dass in diesen Produkte lediglich ausgebaut, aber nicht ersetzt werden. Daher hängt die Rückführungsstrategie insbesondere vom Marktwettbewerb, bestehenden Rückführungssystemen sowie der Notwendigkeit finanzieller Anreize ab. Zuletzt wird die Rückführungsstrategie für die Core-Quelle der Endkunden insbesondere von deren Umweltbewusstsein und charakteristischer Merkmale (Gaur; Subramoniam et al. 2017) sowie der Notwendigkeit von Transparenz und finanziellen Anreizen bestimmt.

Der Geschäftsprozess resultiert in einer Auswahl geeigneter Rückführungsstrategien für jede identifizierte und als geeignet bewertete Core-Quelle. In Erweiterung zu bestehenden Geschäftsprozessen zur Definition von Rückführungsstrategien werden neben Kosten auch weitere Faktoren wie bspw. das Umweltbewusstsein und Abhängigkeiten mit weiteren Akteuren berücksichtigt (vgl. Östlin; Sundin et al. 2008).

Geschäftsprozess Rückfluss-Gestaltung

Der Geschäftsprozess der Rückfluss-Gestaltung nimmt eine neue Perspektive ein, indem es fokussiert um die Frage nach der Verantwortung der Core-Einsammlung geht. Die von Savaskan; Bhattacharya et al. 2004 vorgestellten Optionen der Core-Einsammlung (Originalhersteller, Drittpartei und Händler) werden hierbei berücksichtigt und hinsichtlich der Core-Akquisitionsfaktoren bewertet. Dieser Geschäftsprozess besteht aus zwei Schritten.

Der erste Schritt ist spezifisch für die unterschiedlichen Core-Quellen und soll mögliche Einschränkungen bei der Core-Einsammlung identifizieren. Dabei spielen insbesondere Prozess- bzw. Vertriebskanalabhängigkeiten sowie für Motivation und Offenheit der beteiligten Akteure hinsichtlich spezifischer Systeme eine Rolle. Nachdem diese Einschränkungen identifiziert wurden, geht es im zweiten Schritt primär um die Identifikation einer geeigneten Rückfluss-Gestaltung zur Erreichung des Zielvolumens. Wenn bestimmte Einsammlungsmethoden nicht alle Voraussetzungen erfüllen, werden diese von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Hierbei spielt insbesondere die Einfachheit (d. h. kostenloser Versand, Rücksendeverpackung und automatisierte Label-Erstellung) sowie Flexibilität des Rückgabeprozesses (Gaur; Subramoniam et al. 2017) eine entscheidende Rolle. Unabhängig von der spezifischen Core-Quelle spielt außerdem die sichere Handhabung bzw. der Transport eine wesentliche Rolle und sollte somit Berücksichtigung finden.

Als Ergebnis liefert dieser Geschäftsprozess eine Orientierung hinsichtlich passender Einsammlungsmethoden für Cores und somit zur operativen Gestaltung des Rückflusses.

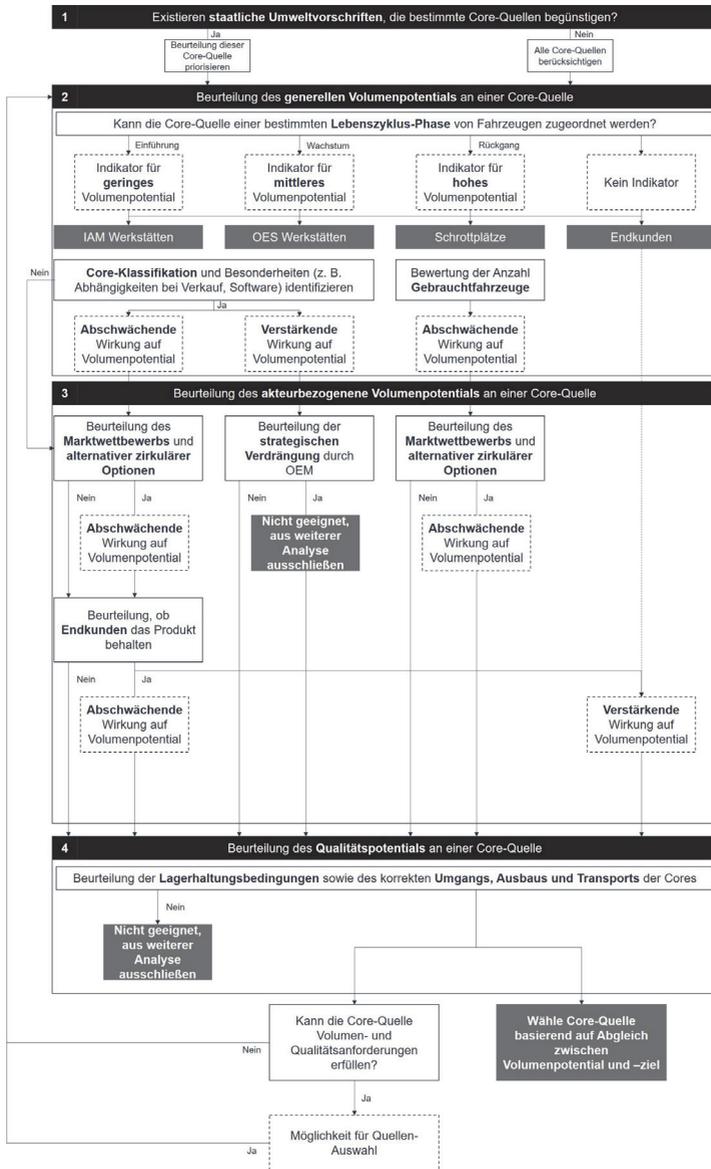


Abbildung A2.2: Geschäftsprozess zur Identifikation von Core-Quellen (A_Weldner 2021).

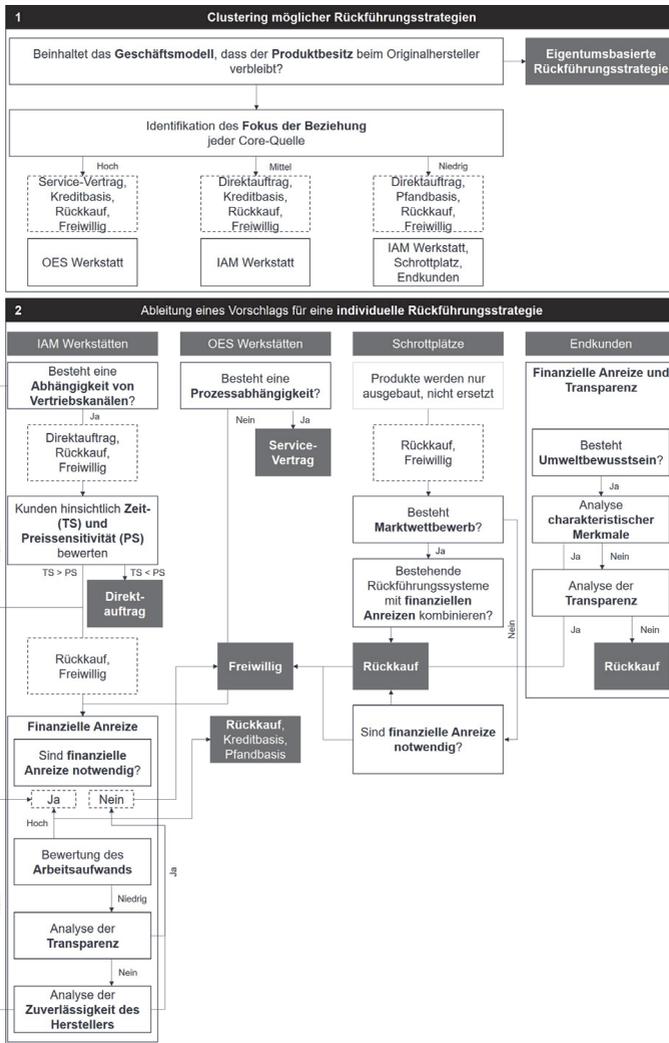


Abbildung A2.3: Geschäftsprozess zur Definition von Rückführungsstrategien (A_Weldner 2021).

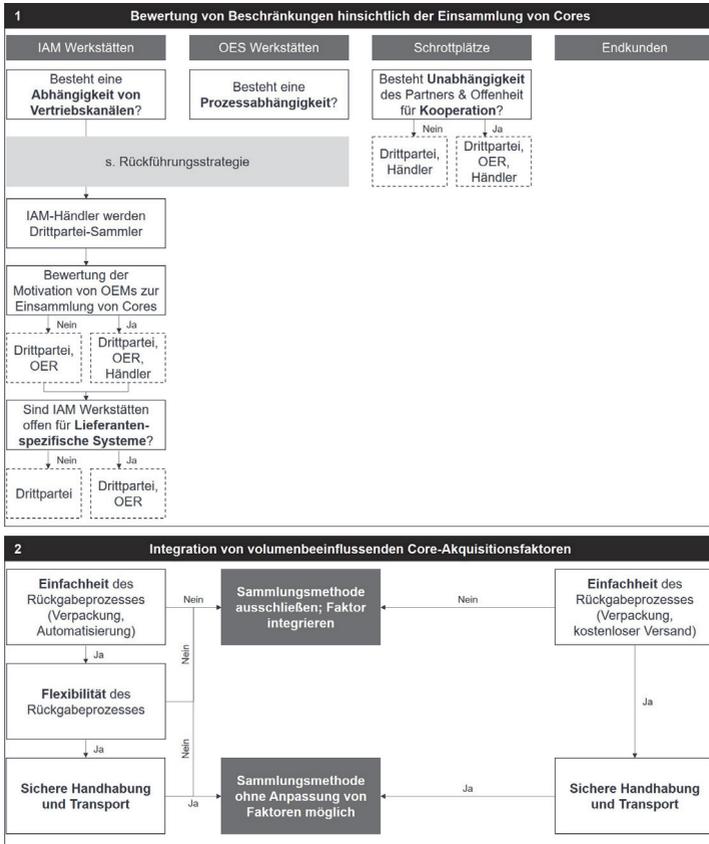


Abbildung A2.4: Geschäftsprozess zur Rückfluss-Gestaltung (A_Weldner 2021).

A3 Ergänzende Elemente der modellierten Rückführungslogistik

Die modellierten Elemente der RL bauen auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit auf (vgl. A_Eisen 2021).

Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Prozesses Transport

Das Blockdefinitionsdiagramm des Stereotypen *Transport* ist in Abbildung A3.1 im Detail dargestellt. Der Stereotyp *Transport* stellt eine spezielle Unterklasse des Stereotypen *Prozess* dar. Dieser ist für den Transportprozess zwischen den einzelnen Standorten im Netzwerk zuständig. Dabei können sowohl fixe, als auch variable Transportkosten pro Kilometer festgelegt werden, wodurch eine Quantifizierung der Auswirkungen eines frühzeitigen Ausschleusens von Cores auf die Transportkosten erfolgen kann. Hinsichtlich der ökologischen Auswertung ist zudem die Angabe von Emissionen zurückgelegtem Kilometer erforderlich. Ein Transportprozess hat zudem stets eine maximale Kapazität sowie eine durchschnittliche Geschwindigkeit. Zur Berechnung der Transportdauer ist zudem ein Start- und Zielort notwendig, der stets über den Stereotypen *Akteur* und dessen Standort gegeben ist.

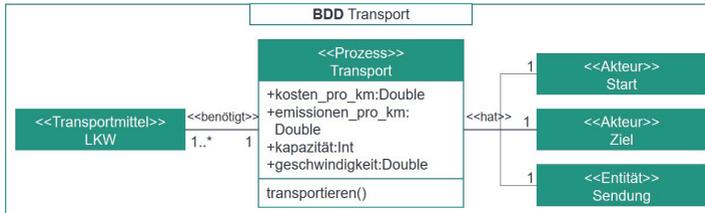


Abbildung A3.1: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Stereotypen *Transport* (A_Eisen 2021).

Zur Realisierung eines Transports sind Transportmittel notwendig, wobei im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich Straßenverkehrsmittel modelliert werden, welche vereinfachend als *LKW* bezeichnet werden. Ein Zugriff auf den Prozess *Transport* erfolgt durch die mit dem Stereotyp *Akteur* belegten Blöcke, mit Ausnahme der *Distribution*, die eine Senke für den Materialfluss in der RL darstellt. Im Rahmen der Ausführung der bereitgestellten Operation *transportieren()* wird die Entität *Sendung*, welche alle Cores bzw. Komponenten enthält die durch den Transport transportiert werden, an den nachfolgenden Block übergeben.

Blockdefinitionsdiagramm des Akteurs *Sammelstandort*

Das BDD des Akteurs *Sammelstandort* ist konzeptionell analog zu dem der Werkstatt aufgebaut und in Abbildung A3.2 dargestellt.

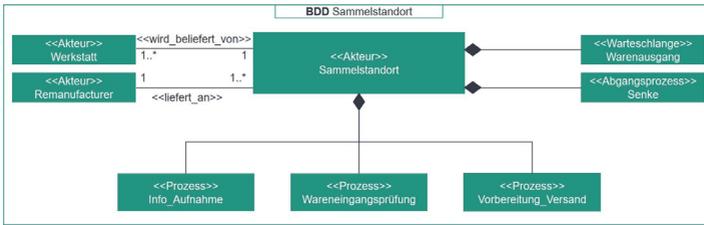


Abbildung A3.2: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs Sammelstandort (A_Eisen 2021).

Attribute und Operationen für diese Blöcke sind dieselben und werden daher aus Gründen der Vereinfachung nicht erneut abgebildet. Sowohl die Prozesse der Informationsaufnahme, als auch die Versandvorbereitung sind Bestandteile des Sammelstandorts. Außerdem verfügt ein Sammelstandort analog zu Werkstätten über einen Warenausgang. Hinzugefügt wird ein Prozess der *Wareneingangsprüfung*, mit Hilfe dessen festgestellt werden kann, ob die zu beachtenden Produktinformationen bereits von der Werkstatt erfasst wurden. Die Informationsaufnahme und -weitergabe kann analog zur Werkstatt mittels Parameter (de-) aktiviert werden. Eine Sammelstelle kann Lieferungen von mehreren Werkstätten erhalten und an einen oder mehrere Remanufacturing-Standorte versenden.

Internes Blockdiagramm des Akteurs Remanufacturing-Standort

IBDs zeigen, entgegen der Darstellung von BDDs, Instanzen der definierten Bestandteile sowie Verbindungen zwischen diesen Bestandteilen. Hierzu werden sog. *Ports* verwendet, die ein- und ausgehende Elemente spezifizieren. Die Pfeile zeigen dabei die Flussrichtung an. Das IBD des Akteurs *Remanufacturing-Standort* verdeutlicht die inneren Strukturen und Abläufe des Remanufacturings. Die farbliche Unterscheidung der einzelnen Ports spezifiziert den entsprechenden Typ der Entität. Für den Prozess der Demontage bedeutet dies bspw., dass ein eingehender Core vollständig in seine Komponenten demontiert wird, der Prozessausgang entspricht somit den Komponenten. Abbildung A3.3 stellt dieses Diagramm graphisch dar.

Der Prozess der *Befundung* wird bei Eingang einer Lieferung von Cores von den Sammelstandorten durchgeführt. Einzelne Cores werden auf ihre Eignung für das Remanufacturing geprüft. Der Prozess besitzt eine Prozessdauer als Eigenschaft, der wiederum mittels einer Verteilung angegeben werden kann. Falls durch zuvor erfasste Produktinformationen bereits Kenntnisse über den Zustand des Cores bestehen, kann die Prozessdauer der Befundung reduziert oder sogar vollständig ausgeschlossen werden (Okorie; Charnley et al. 2020). Weiterhin entstehen durch den Befundungsprozess Kosten und es existiert eine

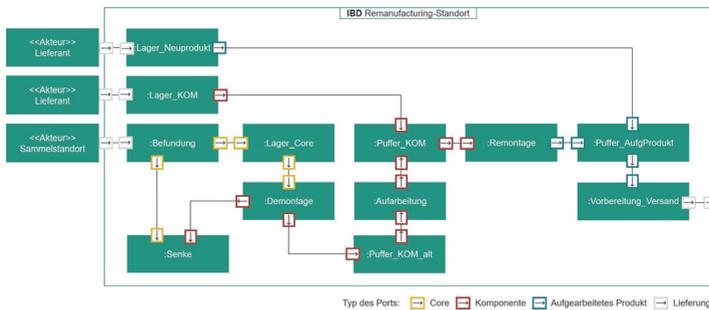


Abbildung A3.3: Internes Blockdiagramm (IBD) des Akteurs Remanufacturing-Standort (A_Eisen 2021).

maximale Kapazität je Zeiteinheit zur Durchführung des Prozesses. Nach Abschluss der Befundung werden die Cores in Abhängigkeit des individuellen Prozessergebnisses an den Block *Lager_Core* übergeben und eingelagert oder, falls sie nicht mehr für das Remanufacturing geeignet sind, mittels einer Senke aus dem System ausgeschleust. Die Blöcke der *Demontage*, *Aufarbeitung* und *Remontage* sind analog zum Befundungsprozess aufgebaut.

Nach erfolgreicher Befundung folgt die Einlagerung der Cores, wobei die maximale Kapazität des Lagers berücksichtigt werden muss. Soll zunächst der gesamte Rückfluss an Cores berücksichtigt werden, empfiehlt es sich, die Kapazitätsgrenze hinreichend groß zu wählen. Das Auslagern der Cores erfolgt nach dem *Pull*-Prinzip, ausgelöst durch die jeweils nachgelagerten Prozessschritte. Demnach folgen danach die Schritte der *Demontage*, *Aufarbeitung* und *Remontage*, die jeweils durch Zwischenlager voneinander entkoppelt sind. Da die Möglichkeit bestehen soll, für jede Komponente je nach Eigenschaften ein individuelles Bestands- und Bestellmanagement zu führen, existieren auch separate Lager hierfür. Abschließend erfolgt der Versand der aufgearbeiteten Produkte an die Distribution. Wie im Hauptteil der Arbeit bereits angesprochen, können externe Lieferanten an zwei Stellen hinzugezogen werden: Einerseits können Komponenten bestellt werden, um unzureichende Rückflüsse von Cores bzw. vorhandenen Komponenten auszugleichen und somit die Aufarbeitung von Cores zu ermöglichen. Andererseits können Neuprodukte bezogen werden, um bspw. Nachfragespitzen oder unzureichende Kapazitäten des Remanufacturings auszugleichen.

Blockdefinitionsdiagramm Lieferant

Die Operationen eines Lieferanten werden basierend auf einer Bestellauslösung eines Remanufacturing-Standorts angeregt und in Abbildung A3.4 dargestellt.



Abbildung A3.4: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs Lieferant (A_Eisen 2021).

Dabei kann ein Lieferant ein oder mehrere Komponenten sowie Neuprodukte aus seinem Sortiment anbieten und somit sowohl unternehmensinterne, als auch -externe Lieferanten darstellen. Zur Reduktion der Modellkomplexität (z. B. im Sinne der Lieferantenauswahl) wird im Rahmen der vorliegenden Modellierung jedoch entweder von homogenen Lieferanten, d. h. gleiche Ausprägungen hinsichtlich Lieferzeit, -kosten und Mindestbestellmenge für alle Lieferanten, oder von einem universellen Lieferanten ausgegangen. Der Versand von bestellten Komponenten bzw. Neuprodukten erfolgt entsprechend der festgelegten Lieferzeit.

Blockdefinitionsdiagramm Distribution

Der Block *Distribution* modelliert die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten und stellt somit die aggregierte Nachfrage von Endkunden dar. Das BDD des Akteurs ist in Abbildung A3.5 dargestellt.

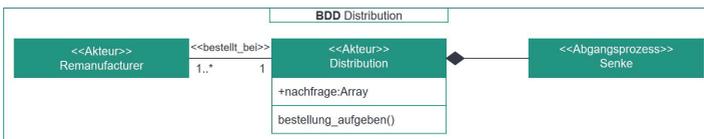


Abbildung A3.5: Blockdefinitionsdiagramm (BDD) des Akteurs Distribution (A_Eisen 2021).

Die generierte Nachfrage muss innerhalb einer gegebenen Zeiteinheit vom Remanufacturing-Standort erfüllt werden. Hierzu wird eine entsprechende Bestellung aufgegeben und die Entität *Lieferung* sowie die Entitäten der *aufgearbeiteten Produkte* nach Erhalt bzw. Befriedigung der Nachfrage mittels einer Senke aus dem modellierten System entfernt. Hinsichtlich der Modellierung der Nachfrage existieren unterschiedliche Ansätze: Cannella; Bruccoleri et al. (2016) und Thammatadatrakul & Chiadamrong (2019) nehmen eine normalverteilte Nachfrage an, Zikopoulos (2017) verwendet den Mittelwert der jährlichen Nachfrage, um daraus ebenfalls eine tägliche, normalverteilte Nachfrage zu ermitteln. Zhang; Guan et al. (2019) beschreiben die Nachfrage mittels Poisson-Prozess, Ferguson; Guide et al. (2009) und Denizel; Ferguson et al. (2010) hingegen nutzen deterministische Nachfragemuster aus

Daten eines Remanufacturing-Unternehmens. Ebenso wie die Verteilung des Ankunftsprozesses der Cores ist auch die Modellierung der Nachfrage offen hinsichtlich individueller Anforderungen, wodurch jegliche Verteilungen angenommen werden können.

A4 Interviewleitfaden und weiterführende Informationen zur Modellierung des Informationsaustauschs

Die Tabellen A4.1-A4.5 stellen die Einführung, die inhaltlichen Blöcke mit den drei Vertretergruppen (Remanufacturing-Unternehmen, Sammelstandorte und Werkstätten) sowie den Abschluss der durchgeführten Experteninterviews dar. Tabelle A1.1 stellt dabei die Einführung in die Interviews dar, in denen den Teilnehmenden zunächst allgemeine Informationen zum zugrundeliegenden Forschungsprojekt und der Zielsetzung, zum Ablauf sowie weiteren Formalien gegeben wird. Dieser Block ist in allen Experteninterviews gleich und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit daher nur einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle A4.1: Einführung in die Experteninterviews (Gallei 2021).

Einführung	
Abschnitt	Text
Begrüßung	Vielen Dank, dass Sie sich Zeit für das Interview nehmen.
Projektinformation und Zielsetzung	Bevor wir mit dem Interview beginnen, möchte ich Ihnen kurz erzählen, worum es in dem Projekt geht: DigiPrime ist ein von der EU gefördertes Projekt mit dem Ziel der Entwicklung eines neuen Konzepts für eine digitale Plattform der Kreislaufwirtschaft. Die Grundlage für eine solche Plattform ist die datengestützte Wiederverwendung und Wiederherstellung von Produkten. Um Produkte wiederherstellen zu können ist ein kritischer Faktor wiederum die Rückführung von Produkten. Heute wollen wir uns insbesondere auf die Rückführung von Elektronikprodukten fokussieren.
Ablauf des Interviews	Im Verlauf des Gesprächs werde ich Ihnen verschiedene offene Fragen stellen, bei denen ich Sie grundsätzlich bitte, einfach all das zu erzählen, was Ihnen zu diesem Thema einfällt.
Kein Test der Person und der Fähigkeiten	Ich werde Sie dabei nicht unterbrechen, da es kein „richtig“ oder „falsch“ gibt und dementsprechend auch keine Wertung.
Unabhängigkeit	Außerdem bin ich unabhängig und deshalb nicht davon betroffen, wenn Sie negative oder positive Anmerkungen gegenüber dem Thema allgemein oder dem dahinterstehenden Unternehmen machen. Ich freue mich, wenn Sie ganz frei Ihre Meinung äußern.
Dauer	Auch werde ich Ihnen genügend Zeit lassen, fühlen Sie sich also nicht unter Druck gesetzt. Ich schätze, dass das Interview etwa 45 bis 60 Minuten dauern wird.
Formalitäten	Nun noch zu ein paar formellen Angelegenheiten: Ich möchte das Interview für die spätere Auswertung aufnehmen und es anschließend verschriftlichen. Dadurch kann ich Ihnen im Gespräch besser folgen, da ich nicht mitschreiben muss. Selbstverständlich verwenden wir das Interviewmaterial in dem Projekt streng vertraulich und anonym. Das heißt: Alle persönlichen Daten, die Rückschlüsse auf Sie erlauben, werden gelöscht oder anonymisiert. Darüber hinaus werden alle Daten nur dann anonymisiert ausgewertet, wenn Sie dazu Ihre Einverständniserklärung nach dem Interview gegeben haben. Ist das für Sie in Ordnung?

Tabelle A4.2 stellt die drei inhaltlichen Blöcke des Interviewleitfadens dar, die mit Vertretern von Remanufacturing-Unternehmen durchgeführt wurden. Dabei beschäftigt sich der erste Block zunächst mit der Analyse des Status Quo hinsichtlich des Informationsaustauschs und der Nutzung produktspezifischer Informationen. Der zweite Block geht auf relevante produktspezifische Informationen und deren potentiellen Nutzen für spezifische Planungs- und Steuerungsaufgaben ein. Im dritten Block geht es um die Skizzierung eines möglichen Zielbildes für den Informationsaustausch und Verbesserungspotentiale.

Tabelle A4.3 stellt die vier inhaltlichen Blöcke des Interviewleitfadens dar, die mit Vertretern von Sammelstandorten durchgeführt wurden. Ergänzend zu dem Interviewleitfaden mit Vertretern von Remanufacturing-Unternehmen kommt ein weiterer Block zur potentiellen Informationsermittlung und -übermittlung hinzu. Dabei werden neben dem aktuellen Status

Tabelle A4.2: Drei inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Remanufacturing-Unternehmen (Gallei 2021).

Block 1: Aktuelle Informationssituation		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würden Sie die aktuelle Informationssituation bzgl. produktspezifischer Informationen zu Cores in Ihrem Unternehmen beschreiben?	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Situation des Informationsaustauschs 	
Block 2: Relevante produktspezifische Informationen und deren Nutzen		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Gibt es Informationen bzgl. Cores, die Ihnen bei Ihrer Arbeit oder im Unternehmen im Allgemeinen helfen würden?	<ul style="list-style-type: none"> Liste der einzelnen Informationen, die hilfreich wären Erläuterung des Nutzens der Informationen Mögliche Vorteile mit bzw. Nachteile ohne Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Welche Informationen wären das? Fallen Ihnen noch weitere Informationen ein? Sie haben Information [...] erwähnt. Was genau würde diese Information erleichtern? Könnte der Nutzen, der mit Information [...] erreicht würde, auch mit einer anderen Information erreicht werden? Wenn ja, welche?
In welcher der folgenden Kategorien würden Sie den größten Nutzen der Information einordnen: Konfiguration (langfristig), Koordination (mittelfristig) oder Steuerung (kurzfristig)?	<ul style="list-style-type: none"> Nutzen der Informationen für konkrete Planungs- und Steuerungsaufgaben Nennung der Informationen mit dem größten Mehrwert 	<ul style="list-style-type: none"> In welchem Prozessschritt genau und wie? In welche alternative Kategorie würden Sie den Nutzen einordnen? Welche der eben genannten Informationen würde Ihrer Meinung nach den größten Mehrwert bringen? Warum schätzen Sie das so ein? Können Sie das mit Zahlen belegen?
Um eine Rangliste zu erstellen, werde ich nun einige paarweise Vergleiche anstellen. Wählen Sie diejenige Information aus, die Sie für wichtiger halten, wenn möglich mit einer kurzen Erklärung.	<ul style="list-style-type: none"> Information [...] vs. [...] Rangliste von Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Was ist der Grund für die Einschätzung?
Block 3: Zielbild der Informationssituation und Wünsche		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würde ein idealtypisches Zielbild für den Informationsaustausch für Sie aussehen?	<ul style="list-style-type: none"> Wünsche, Verbesserungsvorschläge, Denkanstöße Transparenz, bessere Kommunikation 	

insbesondere Möglichkeiten, Hindernisse und verbundene Aufwände mit der Aufnahme und Weitergabe produktspezifischer Informationen thematisiert.

Tabelle A4.4 stellt die drei inhaltlichen Blöcke des Interviewleitfadens dar, die mit Vertretern von Werkstätten durchgeführt wurden. Diese enthalten neben der Ermittlung der aktuellen Informationssituation und der Ableitung eines Zielbilds ebenso den Block hinsichtlich der Informationsermittlung und -übermittlung, der analog bereits in den Interviewleitfäden mit Vertretern von Sammelstandorten durchgeführt wurde (vgl. A4.3).

Tabelle A4.5 stellt den formalen Abschluss der durchgeführten Experteninterviews dar, der analog zur Einführung in allen Interviewgruppen gleich ist und daher aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einmal dargestellt ist.

Tabelle A4.6 gibt eine anonymisierte und abstrahierte Übersicht über die durchgeführten Interviews. Zur Durchführung der Interviews mit Vertretern von Remanufacturing-Unternehmen

und Sammelstandorten wurde auf die (assoziierten) Partner eines europäischen Forschungsprojektes zurückgegriffen. Für die Interviews mit Werkstätten wurden insgesamt 26 Werkstätten unterschiedlicher Art und Größe kontaktiert. Die vier erhaltenen Rückmeldungen entsprechen einer Antwortrate von 15,35 %.

Die Auswertung der Interviews erfolgte wie zuvor in einem iterativen Prozess (vgl. Kuckartz 2012). Die Schritte umfassten dabei die Codierung, die Aufzeichnung von Beobachtungen, mögliche Interpretationen sowie Anmerkungen. Zur Auswertung wurde die Software MaxQDA¹ verwendet. Die Codierung erfolgte dabei induktiv und somit lediglich auf den Interviewergebnissen.

¹Für weitere Informationen siehe <https://www.maxqda.com/de/> [20.03.2023].

Tabelle A4.3: Vier inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Sammelstandorten (Gallei 2021).

Block 1: Aktuelle Informationssituation		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würden Sie die aktuelle Informationssituation bzgl. produktspezifischer Informationen zu Cores in Ihrem Unternehmen beschreiben?	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Situation des Informationsaustauschs 	
Block 2: Relevante produktspezifische Informationen und deren Nutzen		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Gibt es Informationen bzgl. Cores, die Ihnen bei Ihrer Arbeit oder im Unternehmen im Allgemeinen helfen würden?	<ul style="list-style-type: none"> Liste der einzelnen Informationen, die hilfreich wären Erläuterung des Nutzens der Informationen Mögliche Vorteile mit bzw. Nachteile ohne Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Welche Informationen wären das? Fallen Ihnen noch weitere Informationen ein? Sie haben Information [...] erwähnt. Was genau würde diese Information erleichtern? Könnte der Nutzen, der mit Information [...] erreicht würde, auch mit einer anderen Information erreicht werden? Wenn ja, welche?
In welcher der folgenden Kategorien würden Sie den größten Nutzen der Information einordnen: Konfiguration (langfristig), Koordination (mittelfristig) oder Steuerung (kurzfristig)?	<ul style="list-style-type: none"> Nutzen der Informationen für konkrete Planungs- und Steuerungsaufgaben Nennung der Informationen mit dem größten Mehrwert 	<ul style="list-style-type: none"> In welchem Prozessschritt genau und wie? In welche alternative Kategorie würden Sie den Nutzen einordnen? Welche der eben genannten Informationen würde Ihrer Meinung nach den größten Mehrwert bringen? Warum schätzen Sie das so ein? Können Sie das mit Zahlen belegen?
Um eine Rangliste zu erstellen, werde ich nun einige paarweise Vergleiche anstellen. Wählen Sie diejenige Information aus, die Sie für wichtiger halten, wenn möglich mit einer kurzen Erklärung.	<ul style="list-style-type: none"> Information [...] vs. [...] Rangliste von Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Was ist der Grund für die Einschätzung?
Block 3: Informationsermittlung und -übermittlung		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Aus vorangegangenen Interviews wurde deutlich, dass Informationen [...] den Remanufacturing-Unternehmen erhebliche Vorteile bringen würden. Berücksichtigen Sie diese Informationen bereits in Ihrem Arbeitsablauf?	<ul style="list-style-type: none"> Aktuell aufgenommene Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Wie ermitteln Sie diese Informationen bereits?
Gibt es eine Möglichkeit für Sie, diese Informationen zu ermitteln?	<ul style="list-style-type: none"> Potentiale zur Verbesserung 	
Wie könnten Sie sich vorstellen, diese Informationen zu übermitteln?	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeiten der Übermittlung 	
Wie viel Aufwand (Zeit, Kosten, etc.) würden für die Aufnahme und Übermittlung der Informationen anfallen?	<ul style="list-style-type: none"> Informationen zum Aufwand Mögliches Anreizsystem 	<ul style="list-style-type: none"> Können Sie sich vorstellen, diese Informationen aufzunehmen, wenn Sie dafür einen Anreiz erhalten? Wie könnte dieser Anreiz aussehen?
Block 4: Zielbild der Informationssituation und Wünsche		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würde ein idealtypisches Zielbild für den Informationsaustausch für Sie aussehen?	<ul style="list-style-type: none"> Wünsche, Verbesserungsvorschläge, Denkanstöße Transparenz, bessere Kommunikation 	

Tabelle A4.4: Drei inhaltliche Blöcke des Interviewleitfadens mit Vertretern von Werkstätten (Gallei 2021).

Block 1: Aktuelle Informationssituation		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würden Sie die aktuelle Informationssituation bzgl. produktspezifischer Informationen zu Cores in Ihrem Unternehmen beschreiben?	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Situation des Informationsaustauschs 	
Block 2: Informationsermittlung und –übermittlung		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Aus vorangegangenen Interviews wurde deutlich, dass Informationen [...] den Remanufacturing-Unternehmen erhebliche Vorteile bringen würden. Berücksichtigen Sie diese Informationen bereits in Ihrem Arbeitsablauf?	<ul style="list-style-type: none"> Aktuell aufgenommene Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Wie ermitteln Sie diese Informationen bereits?
Gibt es eine Möglichkeit für Sie, diese Informationen zu ermitteln?	<ul style="list-style-type: none"> Potentiale zur Verbesserung 	
Wie könnten Sie sich vorstellen, diese Informationen zu übermitteln	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeiten der Übermittlung 	
Wie viel Aufwand (Zeit, Kosten, etc.) würden für die Aufnahme und Übermittlung der Informationen anfallen?	<ul style="list-style-type: none"> Informationen zum Aufwand Mögliches Anreizsystem 	<ul style="list-style-type: none"> Können Sie sich vorstellen, diese Informationen aufzunehmen, wenn Sie dafür einen Anreiz erhalten? Wie könnte dieser Anreiz aussehen?
Block 3: Zielbild der Informationssituation und Wünsche		
Leitfrage / Erzählimpuls	Inhaltliche Aspekte	Konkrete Nachfragen
Wie würde ein idealtypisches Zielbild für den Informationsaustausch für Sie aussehen?	<ul style="list-style-type: none"> Wünsche, Verbesserungsvorschläge, Denkanstöße Transparenz, bessere Kommunikation 	

Tabelle A4.5: Abschluss der Experteninterviews (Gallei 2021).

Abschluss	
Abschnitt	Text
Ausstiegsfragen	Wir haben jetzt Einiges besprochen. Gibt es von Ihrer Seite aus noch etwas, das Sie gerne noch erzählen möchten, aber bisher noch nicht zur Sprache gekommen ist?
Danksgiving	Ich möchte mich nochmal herzlich bedanken, dass Sie sich Zeit für das Interview genommen haben.
Feedback	Wie haben Sie das Interview empfunden, wie war es für Sie? Was hat Sie dazu bewogen, an dem Interview teilzunehmen? Was könnten wir besser machen?
Einverständniserklärung	Unterschreiben der Einverständniserklärung

Tabelle A4.6: Liste von durchgeführten Interviews (Gallei 2021).

	Typ	Größe	Ort
1	OER	Groß	Hildesheim
2	OER	Groß	Liberec (CZ)
3	OER	Groß	München
4	OER	Mittel	Schwalbach
5	Sammelstandort	Mittel	Göttingen
6	Sammelstandort	Mittel	Hatten (F)
7	Sammelstandort	Groß	Heidelberg
8	IAM-Werkstatt (Franchise)	Groß	Karlsruhe
9	IAM-Werkstatt	Klein	Mannheim
10	OES-Werkstatt	Mittel	Speyer
11	OES-Werkstatt	Groß	Karlsruhe

A5 Erweiterungen des Rezeptormodells

Die modellierten Rezeptormodelle zur Darstellung des Nutzens von Informationen in der Netzwerkkonfiguration und in der Routenplanung bauen auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit auf (vg. A_Gallei 2021). Diese sind in Tabelle A5.1 dargestellt.

Tabelle A5.1: Erweiterungen des Rezeptormodells zur Darstellung des Nutzens von Informationen in der Netzwerkkonfiguration und Routenplanung (A_Gallei 2021).

Information über die ...	... hat einen Effekt auf die ...							
	Netzwerkkonfiguration für Sammelstandorte			Routenplanung				
	... über den Rezeptor ...							
	Anzahl an Knoten	Fixkosten	Grad der Zentrali- sierung	Transport- kosten	Dringende Nachfrage	Abhol- intervall	Transportzeit	Transport- kapazität
Produktnummer		(*)	*	(*)	*	(*)	(*)	(*)
Kilometerstand			*		(*)			
Fehlercodes			*		(*)			
Alter			*		(*)			
Allgemeine Qualität			*	(*)	(*)			
Originalität			*		(*)			
Produkttyp		*		*		*	*	*
Herkunft				*	*	*	*	*
Inspektionen								
Menge	*	*		*		*	*	*
Zeitpunkt der Ankunft								
Korrekte Markierung								

Rezeptormodell für die Netzwerkkonfiguration für Sammelstandorte

Für das Rezeptormodell zur Netzwerkkonfiguration der Sammelstandorte (vgl. Tabelle A5.1, linke Spalte) werden die drei Rezeptoren Menge, Kosten und Zeit fokussiert und für den Anwendungsfall adaptiert. Unter Menge wird im Zusammenhang der Netzwerkkonfiguration die Anzahl der Knotenpunkte von Sammelstandorten innerhalb des Netzwerks verstanden. Die Kosten werden durch die Fixkosten von Sammelstandorten repräsentiert. Für den (De-) Zentralisierungsgrad dient der Rezeptor Zeit: Dabei ist abzuwägen, ob eine dezentralisierte oder eine zentralisierte Struktur von Sammelstandorten zu präferieren ist, und damit eine frühere oder spätere Sortierung, Konsolidierung und Aufnahme von Informationen.

Nachdem die Rezeptoren adaptiert wurden, wird der Einfluss produktspezifischer Informationen untersucht. Dabei lässt sich zunächst festhalten, dass die Anzahl an Knoten im Netzwerk,

d. h. die Anzahl der Sammelstandorte, im Wesentlichen von der Menge der zurückfließenden Cores beeinflusst wird. Dadurch lässt sich die durchschnittliche sowie maximale Auslastung einzelner Standorte bestimmen, wodurch sich ggfs. der Bedarf nach neuen Standorten ergibt, indem diese bspw. entlastend zur Verfügung stehen. Informationen hinsichtlich dem Produkttypen und der Menge der zurückfließenden Cores wirken sich auf den Rezeptor der Fixkosten aus: Mit Hilfe des Produkttyps lässt sich bspw. feststellen, ob spezielle Ladehilfsmittel oder Maschinen für die Handhabung und Verarbeitung der Cores benötigt werden, was sich entsprechend auf die Anschaffungskosten auswirkt. Die Menge wirkt sich zudem auf die Standortkosten aus, da die Kapazitätsauslegung in Hinblick auf Sortier- und Lagerfläche im Wesentlichen davon abhängt. Informationen, die potentiell ein frühzeitiges Ausschleusen von Cores zur Folge haben (d. h. Informationen hinsichtlich der Produktnummer, dem Kilometerstand, Fehlercodes, dem Alter, der allgemeinen Qualität sowie der Originalität) beeinflussen ebenfalls den (De-) Zentralisierungsgrad des Netzwerks. Die potentiellen Einsparungen durch ein frühes Aussortieren von Cores und kürzeren Transportwegen müssen den Mehrkosten mehrerer dezentraler Standorte gegenübergestellt werden. Je nach Ausschlussquoten und individuellen Anforderungen kann somit eine Entscheidung hinsichtlich des (De-) Zentralisierungsgrades getroffen werden.

Rezeptormodell zur Optimierung der Routenplanung

Für das Rezeptormodell zur Optimierung der Routeplanung (vgl. Tabelle A5.1, rechte Spalte) stehen die Auswirkungen produktspezifischer Informationen hinsichtlich der Rezeptoren Kosten, Produkt, Zeit und Menge im Fokus. Die Kosten werden dabei insbesondere durch die variablen Transportkosten zwischen Werkstätten, Sammelstandorten und Remanufacturing-Standorten dargestellt. Der Rezeptor Produkt stellt die zu transportierenden Produkte inkl. ihrer Volumen und Gewichte sowie ggfs. die Dringlichkeit dieser dar. Der Rezeptor Zeit bildet die Grundlage für die Transportzeit sowie für die Abholintervalle. Während erstere insbesondere für Sammel- und Remanufacturing-Standorte relevant ist, ist das Abholintervall insbesondere für Werkstätten relevant. Abschließend stellt der Rezeptor Menge die Transportkapazität sowie Menge der zum Einsatz kommenden Transportmittel dar.

Die produktspezifischen Informationen hinsichtlich der Herkunft, des Produkttyps, der Menge, sowie hinsichtlich der Produktnummer und allgemeinen Qualität ist entscheidend für den Rezeptor Transportkosten und hat somit einen Effekt auf die Routenplanung. Die Herkunft kann genutzt werden, um den Abholort zu bestimmen und somit Routen aus mehreren Orten zu generieren. Diese können hinsichtlich der Transportkosten optimiert werden. Sowohl Informationen hinsichtlich Produktgewicht und -volumen (abgeleitet aus dem Produkttypen), als auch besondere Handhabungsanforderungen aufgrund der Qualität können die Notwendigkeit spezifischer Be- und Entladeeinrichtungen und besonderer Transport- und Lagerbedingungen

auslösen. Diese speziellen Anforderungen haben weitere Implikationen für die Transportkosten. Im Falle eines dringenden Bedarfs nach aufgearbeiteten Produkten und damit Cores zur Aufarbeitung können Routen adaptiert werden, um Eilaufträge zu berücksichtigen. Diese sind wiederum von der Herkunft sowie im Wesentlichen von der Produktnummer abhängig, wobei letztere für die Identifikation eines Abgleichs aus nachgefragten Produkten und Cores genutzt werden kann. Weitere Informationen, z. B. hinsichtlich Alter und Qualität, können die Dringlichkeit und die damit verbundene Anpassung der Routenplanung weiter beeinflussen. Der Rezeptor Zeit ist in die beiden Elemente Abholintervall und Transportzeit unterteilt. Mit Hilfe von Informationen hinsichtlich der Menge, dem Produkttypen sowie der Herkunft kann das Abholintervall der Transportrouten bei den einzelnen Werkstätten optimiert werden. So können bspw. Flächenrestriktionen in Kombination mit einem hohen Auftragsvolumen bei Werkstätten dazu führen, dass die Abholung von Cores in kürzeren Abständen erfolgen muss und somit eine Anpassung von Routen notwendig ist. Die Transportzeit wird von den gleichen produktspezifischen Informationen beeinflusst: Mit Hilfe der Herkunft kann die Transportdistanz und somit die resultierende -zeit ermittelt werden. Ebenso kann die Transportzeit negativ durch spezielle Anforderungen der Cores beeinflusst werden, welche sich wiederum aus Produkttyp, -nummer und Menge identifizieren lassen. Zuletzt beeinflussen die produktspezifischen Informationen hinsichtlich der Menge, Produkttyp, -nummer, und Herkunft den Rezeptor Transportkapazität. Aus Produkttyp und Menge lassen sich die Flächen- und Volumenanforderungen bestimmen, die wesentlich für die Bestimmung der Kapazitätsauslastung eines Transportmodus notwendig sind. Darüber hinaus kann die Anzahl notwendiger Transportmittel je Transportmodi bestimmt werden. Mit Hilfe der Herkunft kann im Rahmen der Optimierung der Routenplanung außerdem bestimmt werden, ob weitere Abholorte in die Route aufgenommen werden können.

A6 Daten zur Modellierung des Materialflusses im Anwendungsfall

Die Tabellen A6.1-A6.2 zeigen die vollständigen Daten zur Modellierung der Werkstätten *wks* anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen in der EU, alphabetisch sortiert nach dem Länderkürzel.

Tabelle A6.1: Modellierung der Werkstätten *wks* anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen (Teil 1) (Nilles 2022).

Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	X-Koordinate	Y-Koordinate	Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	X-Koordinate	Y-Koordinate	Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	X-Koordinate	Y-Koordinate
BE10			376	487	DE11			497	529	EE00	Estland		868	308
BE21			384	478	DE12			472	530	EE04			79	414
BE22			400	484	DE13			461	562	EE05	Irland		84	450
BE23			361	483	DE14			495	500	EE06			114	428
BE24			382	486	DE21			544	551	EL30			822	781
BE25	Belgien		345	483	DE22			571	537	EL41			853	739
BE31			381	491	DE23			553	520	EL42			848	785
BE32			370	495	DE24			537	506	EL43			850	847
BE33			409	494	DE25			523	521	EL51			843	712
BE34			402	508	DE26			505	508	EL52			805	719
BE35			387	498	DE27			516	550	EL53	Griechenland		770	730
BG21			824	654	DE30			584	449	EL64			754	746
BG32			865	663	DE40			390	463	EL61			784	747
BG33			907	660	DE50			478	435	EL62			749	776
BG34	Bulgarien		889	680	DE60			505	425	EL63			768	770
BG41			812	683	DE71			476	507	EL64			792	767
BG42			852	694	DE72			473	491	EL65			790	795
CG21			608	504	DE73			493	481	ES11			96	671
CG22			618	509	DE80	Deutschland		564	420	ES12			134	659
CG23			595	526	DE91			518	454	ES13			181	665
CG24	Tschechien		585	498	DE92			494	454	ES21			216	696
CG25			642	502	DE93			502	437	ES22			228	673
CG26			652	526	DE94			485	438	ES23			217	684
CG27			677	520	DEA1			427	474	ES24			257	703
CG28			692	512	DEA2			427	490	ES30			191	726
DK01			559	372	DEA3			447	461	ES41	Spanien		165	698
DK02			546	384	DEA4			477	462	ES42			210	748
DK03	Dänemark		489	382	DEA5			460	477	ES43			132	757
DK04			496	346	DEB1			448	501	ES51			309	694
DK05			500	344	DEB2			430	508	ES52			280	753
					DEB3			458	520	ES53			344	746
					DEC0			435	520	ES61			168	793
					DEC2			589	480	ES62			241	782
					DED4			573	490					
					DED5			566	475					
					DEE0			544	463					
					DEFO			496	411					
					DEG0			525	486					

Tabelle A6.3 zeigt die Daten zur Modellierung der Sammelstandorte *sast*, der Remanufacturing-Standorte *rest* der OER-Unternehmen, sowie des Lieferanten *l* zum Bezug notwendiger Neukomponenten für das Remanufacturing und Neuprodukte zur Bedienung der Kundennachfrage im Falle unzureichend vorhandener Cores.

Tabelle A6.2: Modellierung der Werkstätten w_k anhand der Zentren der NUTS 2-Regionen (Teil 2) (Nilles 2022).

Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	x-Koordinate	y-Koordinate	Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	x-Koordinate	y-Koordinate	Werkstatt ID	NUTS 2-Region	Land	x-Koordinate	y-Koordinate
FR40			207	549	L000	Lettland		862	301	PL21			742	510
FRD1			205	529	L101	Litauen		854	399	PL22			712	499
FRD2			300	520	L202		815	387	PL41			570	454	
FRE1			336	495	L000	Luxemburg		415	511	PL42			633	425
FRE2			335	514	HU11		714	564	PL43			628	457	
FRF1			446	545	HU12		724	569	PL51			653	481	
FRF2			376	533	HU01		695	568	PL52			687	492	
FRF3			416	534	HU22	Ungarn		661	575	PL61	Polen		701	436
FRB0			314	566	HU23		688	591	PL62			752	418	
FR10			334	535	HU31		747	553	PL63			687	410	
FRG0			258	562	HU32		768	564	PL71			722	468	
FR11			296	637	HU33		734	588	PL72			752	488	
FR12			413	571	NL11		432	431	PL81			802	476	
FR11			296	637	NL12		408	435	PL82			783	507	
FR12			313	603	NL13		428	440	PL84			804	431	
FR13			273	596	NL21		422	440	PL91			761	455	
FRK1			348	605	NL22		411	458	PL92			742	444	
FRK2			401	613	NL23		400	448	PT11			99	704	
FRB0			417	646	NL31	Niederlande		394	458	PT16	Portugal		88	800
FRJ1			390	657	NL32		388	444	PT16			89	736	
FRJ2			307	648	NL33		378	461	PT17			66	765	
FRM0			485	689	NL34		363	476	PT18			90	775	
HR02			676	611	NL41		398	471	RO11			810	570	
HR03			639	644	NL42		412	478	RO12			850	594	
HR05	Kroatien		644	602	AT11		650	570	RO21			890	573	
HR06			651	598	AT12		637	546	RO22			826	624	
ITC1			458	621	AT13		652	547	RO31	Rumänien		857	628	
ITC2			445	604	AT21		592	582	RO32			876	632	
ITC3			486	635	AT22		624	571	RO41			820	633	
ITC4			499	606	AT31	Österreich		596	549	RO42			780	607
ITH1			539	583	AT32		579	568	SI03	Slowenien		628	592	
ITH2			531	597	AT33		536	572	SI04			597	596	
ITH3			610	648	AT34		592	570	SK01	Slowakei		670	545	
ITH4			575	584					SK02			689	544	
ITH6			532	633					SK03			722	536	
IT11			534	660					SK04			762	533	
IT2	Italien		562	668					FI19			812	225	
IT3			578	661					FI18			846	267	
IT4			571	618					FI1C	Finnland		968	252	
ITF1			593	686					FI1D			903	149	
ITF2			611	699					FI20			738	272	
ITF3			618	716					SE11			695	291	
ITF4			665	718					SE12			648	296	
ITF5			644	724					SE21			701	335	
ITF6			654	753					SE22			591	372	
ITG1			695	796					SE23	Schweden		568	323	
ITG2			483	737					SE31			607	265	
									SE32			618	202	
									SE33			720	136	

Tabelle A6.3: Modellierung der Sammelstandorte $sast_i$, der Remanufacturing-Standorte $rest_i$ und des Lieferanten l_i anhand der x- und y-Koordinaten (Nilles 2022).

Sammelstandort ID	x-Koordinate	y-Koordinate	Remanufacturing-Standort ID	x-Koordinate	y-Koordinate	Lieferant ID	x-Koordinate	y-Koordinate
$sast_1$	577	322	$rest_1$	621	487	l_1	562	476
	486	378	$rest_2$	495	453			
	527	460	$rest_3$	571	489			
	386	492						
	504	492						
	604	518						
	722	466						
	418	533						
$sast_2$	432	578						
	638	556						
	519	629						
	190	624						
	657	609						
	722	577						
	760	645						
	664	621						
	789	767						
$sast_3$	964	764						

A7 Kurvenschar der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Beta-Binomialverteilung

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Beta-Binomialverteilung lässt sich wie folgt darstellen, wobei K eine Zufallsvariable und $n \in \mathbb{N}_0$ die Anzahl der Ziehungen und $\alpha, \beta > 0$ die zugehörigen Parameter sind (Held 2008):

$$P(K = k) = \binom{n}{k} \frac{B(\alpha + k, \beta + n - k)}{B(\alpha, \beta)} \quad \text{A7.1}$$

Dabei stellt B die Betafunktion dar, die sich allgemein wiederum wie folgt darstellen lässt:

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} \cdot (1-t)^{y-1} dt \quad \text{A7.2}$$

Für weiterführende Informationen zur Beta-Binomialverteilung sei an dieser Stelle auf Held (2008) verwiesen. Abbildung A7.1 stellt eine Kurvenschar der Beta-Binomialverteilung für unterschiedliche Werte von α und β dar, wobei $n = 10$ konstant gehalten wird. Wie zu erkennen entsteht für $\alpha = \beta = 1$ eine Gleichverteilung. Für $\alpha = \beta = n = 10$ wird hingegen eine Normalverteilung angenähert. Ebenso sind rechts- oder linksschiefe Verteilungen möglich. Die Kurvenschar zeigt somit die große Flexibilität und Variabilität der Beta-Binomialverteilung und erklärt damit deren Eignung zur Modellierung der Auftrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Informationsausprägungen (vgl. Zikopoulos 2017).

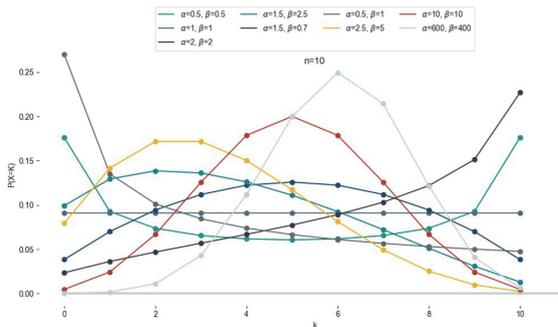


Abbildung A7.1: Kurvenschar der Beta-Binomialverteilung

Tabelle A7.1 stellt die im zugrundeliegenden Anwendungsfall verwendeten Parameter n, α, β der Beta-Binomialverteilung zur Modellierung der Auftrittswahrscheinlichkeit der *qualitätsrelevanten* Informationsarten Kilometerstand, Qualität und Fehlercode in den fünf untersuchten Optionen. Die in den Spalten "Exakte Werte" bzw. "Gerundete Werte" dargestellten Werte beziehen sich dabei auf die unterschiedlichen Ausprägungen entsprechend der Logik (Hoch; Mittel; Niedrig) bzw. (A; B; C; D; E).

Tabelle A7.1: Verwendete Parameter der Beta-Binomialverteilung und resultierende bzw. gerundete Auftrittswahrscheinlichkeit in den verschiedenen Optionen (Förster 2023).

Eigenschaft	Option	n	α	β	Exakte Werte [%]	Gerundete Werte [%]
Kilometerstand $\psi_{km,co}$	1	3	1	1,4	(41,2; 34,3; 24,5)	(40; 35; 25)
	2					
	3					
	4					
	5					
Qualität $\psi_{Q,co}$	1	3	10	10	(26,2; 47,6; 26,2)	(25; 50; 25)
	2		10	10	(26,2; 47,6; 26,2)	(25; 50; 25)
	3		2	2	(30; 40; 30)	(30; 40; 30)
	4		1	1	(33,3; 33,3; 33,3)	(33,3; 33,3; 33,3)
	5		10	10	(26,2; 47,6; 26,2)	(25; 50; 25)
Fehlercode $\psi_{F,co}$	1	5	2,3	0,9	(4,5; 10,5; 18; 27,1; 39,9)	(5; 10; 20; 25; 40)
	2		2,3	0,9	(4,5; 10,5; 18; 27,1; 39,9)	(5; 10; 20; 25; 40)
	3		0,5	0,5	(27,3; 15,6; 15,6; 15,6; 27,3)	(27,5; 15; 15; 15; 27,5)
	4		1,5	0,8	(8,9; 14; 18,7; 24,3; 34,1)	(10; 15; 20; 25; 30)
	5		2,3	0,9	(4,5; 10,5; 18; 27,1; 39,9)	(5; 10; 20; 25; 40)

A8 Modellierung der Ankünfte von Cores und Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten

Abbildung A8.1 stellt die Histogramme für die drei untersuchten Stückzahlsszenarien hinsichtlich der Core- und Nachfrage-Ankünfte dar. Entsprechend der idealtypischen Stückzahlsszenarien aus Abbildung 6.1 sind die konvergierenden, gleichlaufenden und divergierenden Stückzahlverläufe zu erkennen.

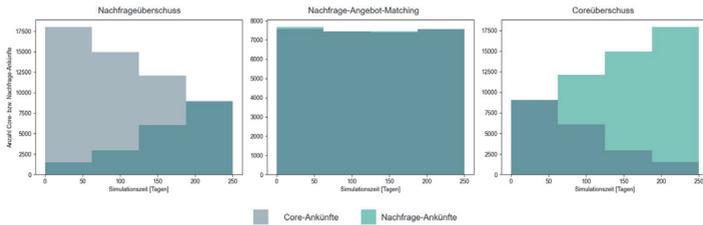


Abbildung A8.1: Histogram der Core- und Nachfrage-Ankünfte in den drei Szenarien Nachfrageüberschuss, Nachfrage-Angebot-Matching und Coreüberschuss.

Tabelle A8.1 stellt die zu den Histogrammen zugehörigen Parameter der Exponentialverteilung λ_{CO} und $\lambda_{D_{PRD}}$ zur Modellierung der Core- bzw. Nachfrage-Ankünfte dar. Dabei wird die gesamte Simulationszeit in diskrete Zeitintervalle eingeteilt, wobei jedes Zeitintervall einen individuellen Parameter verwendet. So wird bspw. im Szenario des Nachfrageüberschusses zur Modellierung der Core-Ankünfte die Simulationszeit von 250 Tagen in fünf Zeitintervalle eingeteilt, wobei in den ersten 50 Tagen $\lambda_{CO} = 0,05$, in den Tagen 51-100 $\lambda_{CO} = 0,1$, etc. und abschließend in den Tagen 201-250 $\lambda_{CO} = 0,3$ gilt.

Tabelle A8.1: Verwendete Parameter der Exponentialverteilung zur Modellierung der Core- und Nachfrage-Ankünfte.

	Nachfrageüberschuss	Nachfrage-Angebot-Matching	Coreüberschuss
Ankunftsrate der Cores λ_{CO}	0,05; 0,1; 0,2; 0,3	0,25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6
Ankunftsrate der Nachfrage $\lambda_{D_{PRD}}$	0,6; 0,5; 0,4; 0,3	0,25	0,3; 0,2; 0,1; 0,05

A9 Verteilung der Läufe der simulationsbasierten Optimierung auf die verschiedenen Szenarien

Tabelle A9.1 stellt die Verteilung der simulationsbasierten Optimierungsläufe auf die unterschiedlichen Steuerfaktoren dar. Wie zu erkennen, stellen die Läufe mit variierendem Informationsvektor \vec{i} (vl) mit 630 der insgesamt 810 untersuchten Läufe den Schwerpunkt der Untersuchung dar. Anhand einer gleichmäßigen Aufteilung auf die drei untersuchten Stückzahlsszenarien *szs* werden die unterschiedlichen Grade des Informationsaustauschs *ia* sowie die verschiedenen Bestellpolitiken untersucht. Hinsichtlich der Ausprägungen der restlichen Steuerfaktoren (vgl. Tabelle 6.4) wird jeweils ein Referenzszenario identifiziert und untersucht, während in den weiteren Läufe eine zufällige Ziehung erfolgt. Hinsichtlich der Benchmark-Läufe (BL) werden lediglich 10 Läufe je Stückzahlsszenario *szs* untersucht, da lediglich ein vollständiger Informationsaustausch *ia* mit 100 % Werkstattanbindung *wka* relevant ist und dementsprechend untersucht wird. Hinsichtlich der restlichen Steuerfaktoren wird analog ein Referenzszenario sowie ein Worst-Case-Szenario untersucht, um die Leistung der echtzeitfähigen Bestellpolitiken *bp* im Vergleich zum Benchmark des *Wagner-Whitin*-Modells zu analysieren. Abschließend werden im Rahmen des konstanten Informationsvektors \vec{i} (kl) 50 Läufe je Stückzahlsszenario analysiert, wobei die Untersuchung erneut auf einen vollständigen Informationsaustausch *ia* mit 100 % Werkstattanbindung *wka* fokussiert wird.

Tabelle A9.1: Verteilung der Läufe der simulationsbasierten Optimierung auf die verschiedenen Szenarien.

Experimente	# Läufe	# Replikationen	# Läufe gesamt
1. Konstanter Informationsvektor (kl)	410	10	4.100
101 Σ Condemnatus	620	10	6.300
102 Σ Condemnatus	210	10	2.100
103 Σ Condemnatus	30	10	300
104 Σ Condemnatus	30	10	300
105 Σ Condemnatus	30	10	300
106 Σ Condemnatus	30	10	300
107 Σ Condemnatus	30	10	300
108 Σ Condemnatus	30	10	300
109 Σ Condemnatus	30	10	300
110 Σ Condemnatus	30	10	300
111 Σ Condemnatus	30	10	300
112 Σ Condemnatus	30	10	300
113 Σ Condemnatus	30	10	300
114 Σ Condemnatus	30	10	300
115 Σ Condemnatus	30	10	300
116 Σ Condemnatus	30	10	300
117 Σ Condemnatus	30	10	300
118 Σ Condemnatus	30	10	300
119 Σ Condemnatus	30	10	300
120 Σ Condemnatus	30	10	300
121 Σ Condemnatus	30	10	300
122 Σ Condemnatus	30	10	300
123 Σ Condemnatus	30	10	300
124 Σ Condemnatus	30	10	300
125 Σ Condemnatus	30	10	300
126 Σ Condemnatus	30	10	300
127 Σ Condemnatus	30	10	300
128 Σ Condemnatus	30	10	300
129 Σ Condemnatus	30	10	300
130 Σ Condemnatus	30	10	300
131 Σ Condemnatus	30	10	300
132 Σ Condemnatus	30	10	300
133 Σ Condemnatus	30	10	300
134 Σ Condemnatus	30	10	300
135 Σ Condemnatus	30	10	300
136 Σ Condemnatus	30	10	300
137 Σ Condemnatus	30	10	300
138 Σ Condemnatus	30	10	300
139 Σ Condemnatus	30	10	300
140 Σ Condemnatus	30	10	300
141 Σ Condemnatus	30	10	300
142 Σ Condemnatus	30	10	300
143 Σ Condemnatus	30	10	300
144 Σ Condemnatus	30	10	300
145 Σ Condemnatus	30	10	300
146 Σ Condemnatus	30	10	300
147 Σ Condemnatus	30	10	300
148 Σ Condemnatus	30	10	300
149 Σ Condemnatus	30	10	300
150 Σ Condemnatus	30	10	300
151 Σ Condemnatus	30	10	300
152 Σ Condemnatus	30	10	300
153 Σ Condemnatus	30	10	300
154 Σ Condemnatus	30	10	300
155 Σ Condemnatus	30	10	300
156 Σ Condemnatus	30	10	300
157 Σ Condemnatus	30	10	300
158 Σ Condemnatus	30	10	300
159 Σ Condemnatus	30	10	300
160 Σ Condemnatus	30	10	300
161 Σ Condemnatus	30	10	300
162 Σ Condemnatus	30	10	300
163 Σ Condemnatus	30	10	300
164 Σ Condemnatus	30	10	300
165 Σ Condemnatus	30	10	300
166 Σ Condemnatus	30	10	300
167 Σ Condemnatus	30	10	300
168 Σ Condemnatus	30	10	300
169 Σ Condemnatus	30	10	300
170 Σ Condemnatus	30	10	300
171 Σ Condemnatus	30	10	300
172 Σ Condemnatus	30	10	300
173 Σ Condemnatus	30	10	300
174 Σ Condemnatus	30	10	300
175 Σ Condemnatus	30	10	300
176 Σ Condemnatus	30	10	300
177 Σ Condemnatus	30	10	300
178 Σ Condemnatus	30	10	300
179 Σ Condemnatus	30	10	300
180 Σ Condemnatus	30	10	300
181 Σ Condemnatus	30	10	300
182 Σ Condemnatus	30	10	300
183 Σ Condemnatus	30	10	300
184 Σ Condemnatus	30	10	300
185 Σ Condemnatus	30	10	300
186 Σ Condemnatus	30	10	300
187 Σ Condemnatus	30	10	300
188 Σ Condemnatus	30	10	300
189 Σ Condemnatus	30	10	300
190 Σ Condemnatus	30	10	300
191 Σ Condemnatus	30	10	300
192 Σ Condemnatus	30	10	300
193 Σ Condemnatus	30	10	300
194 Σ Condemnatus	30	10	300
195 Σ Condemnatus	30	10	300
196 Σ Condemnatus	30	10	300
197 Σ Condemnatus	30	10	300
198 Σ Condemnatus	30	10	300
199 Σ Condemnatus	30	10	300
200 Σ Condemnatus	30	10	300
201 Σ Condemnatus	30	10	300
202 Σ Condemnatus	30	10	300
203 Σ Condemnatus	30	10	300
204 Σ Condemnatus	30	10	300
205 Σ Condemnatus	30	10	300
206 Σ Condemnatus	30	10	300
207 Σ Condemnatus	30	10	300
208 Σ Condemnatus	30	10	300
209 Σ Condemnatus	30	10	300
210 Σ Condemnatus	30	10	300
211 Σ Condemnatus	30	10	300
212 Σ Condemnatus	30	10	300
213 Σ Condemnatus	30	10	300
214 Σ Condemnatus	30	10	300
215 Σ Condemnatus	30	10	300
216 Σ Condemnatus	30	10	300
217 Σ Condemnatus	30	10	300
218 Σ Condemnatus	30	10	300
219 Σ Condemnatus	30	10	300
220 Σ Condemnatus	30	10	300
221 Σ Condemnatus	30	10	300
222 Σ Condemnatus	30	10	300
223 Σ Condemnatus	30	10	300
224 Σ Condemnatus	30	10	300
225 Σ Condemnatus	30	10	300
226 Σ Condemnatus	30	10	300
227 Σ Condemnatus	30	10	300
228 Σ Condemnatus	30	10	300
229 Σ Condemnatus	30	10	300
230 Σ Condemnatus	30	10	300
231 Σ Condemnatus	30	10	300
232 Σ Condemnatus	30	10	300
233 Σ Condemnatus	30	10	300
234 Σ Condemnatus	30	10	300
235 Σ Condemnatus	30	10	300
236 Σ Condemnatus	30	10	300
237 Σ Condemnatus	30	10	300
238 Σ Condemnatus	30	10	300
239 Σ Condemnatus	30	10	300
240 Σ Condemnatus	30	10	300
241 Σ Condemnatus	30	10	300
242 Σ Condemnatus	30	10	300
243 Σ Condemnatus	30	10	300
244 Σ Condemnatus	30	10	300
245 Σ Condemnatus	30	10	300
246 Σ Condemnatus	30	10	300
247 Σ Condemnatus	30	10	300
248 Σ Condemnatus	30	10	300
249 Σ Condemnatus	30	10	300
250 Σ Condemnatus	30	10	300
251 Σ Condemnatus	30	10	300
252 Σ Condemnatus	30	10	300
253 Σ Condemnatus	30	10	300
254 Σ Condemnatus	30	10	300
255 Σ Condemnatus	30	10	300
256 Σ Condemnatus	30	10	300
257 Σ Condemnatus	30	10	300
258 Σ Condemnatus	30	10	300
259 Σ Condemnatus	30	10	300
260 Σ Condemnatus	30	10	300
261 Σ Condemnatus	30	10	300
262 Σ Condemnatus	30	10	300
263 Σ Condemnatus	30	10	300
264 Σ Condemnatus	30	10	300
265 Σ Condemnatus	30	10	300
266 Σ Condemnatus	30	10	300
267 Σ Condemnatus	30	10	300
268 Σ Condemnatus	30	10	300
269 Σ Condemnatus	30	10	300
270 Σ Condemnatus	30	10	300
271 Σ Condemnatus	30	10	300
272 Σ Condemnatus	30	10	300
273 Σ Condemnatus	30	10	300
274 Σ Condemnatus	30	10	300
275 Σ Condemnatus	30	10	300
276 Σ Condemnatus	30	10	300
277 Σ Condemnatus	30	10	300
278 Σ Condemnatus	30	10	300
279 Σ Condemnatus	30	10	300
280 Σ Condemnatus	30	10	300
281 Σ Condemnatus	30	10	300
282 Σ Condemnatus	30	10	300
283 Σ Condemnatus	30	10	300
284 Σ Condemnatus	30	10	300
285 Σ Condemnatus	30	10	300
286 Σ Condemnatus	30	10	300
287 Σ Condemnatus	30	10	300
288 Σ Condemnatus	30	10	300
289 Σ Condemnatus	30	10	300
290 Σ Condemnatus	30	10	300
291 Σ Condemnatus	30	10	300
292 Σ Condemnatus	30	10	300
293 Σ Condemnatus	30	10	300
294 Σ Condemnatus	30	10	300
295 Σ Condemnatus	30	10	300
296 Σ Condemnatus	30	10	300
297 Σ Condemnatus	30	10	300
298 Σ Condemnatus	30	10	300
299 Σ Condemnatus	30	10	300
300 Σ Condemnatus	30	10	300
301 Σ Condemnatus	30	10	300
302 Σ Condemnatus	30	10	300
303 Σ Condemnatus	30	10	300
304 Σ Condemnatus	30	10	300
305 Σ Condemnatus	30	10	300
306 Σ Condemnatus	30	10	300
307 Σ Condemnatus	30	10	300
308 Σ Condemnatus	30	10	300
309 Σ Condemnatus	30	10	300
310 Σ Condemnatus	30	10	300
311 Σ Condemnatus	30	10	300
312 Σ Condemnatus	30	10	300
313 Σ Condemnatus	30	10	300
314 Σ Condemnatus	30	10	300
315 Σ Condemnatus	30	10	300
316 Σ Condemnatus	30	10	300
317 Σ Condemnatus	30	10	300
318 Σ Condemnatus	30	10	300
319 Σ Condemnatus	30	10	300
320 Σ Condemnatus	30	10	300
321 Σ Condemnatus	30	10	300
322 Σ Condemnatus	30	10	300
323 Σ Condemnatus	30	10	300
324 $\Sigma</$			

A10 Weitere Auswertungen der Steuerfaktoren

Im Folgenden werden beispielhaft die Auswirkungen der Variation weiterer Steuerfaktoren auf ausgewählte Kennzahlen untersucht. Abbildung A10.1 zeigt die Auswirkungen der Variation des Ziellagerbestands S_{kom} auf die Liefertreue LT . Da der Ziellagerbestand nur für die (s,S)- und (t,S)-Politiken relevant ist, werden auch nur diese in der Abbildung dargestellt. Entsprechend der in Tabelle 5.3 dargestellten Variation der Steuerfaktoren werden dabei die drei Ausprägungen $\frac{S_{kom}}{2}$, S_{kom} und $2 \cdot S_{kom}$ untersucht, jeweils ausgehend von dem initialen, komponentenspezifischen Ziellagerbestand S_{kom} . Für die (s,S)-Politik ist dabei im Nachfrageüberschuss und im Nachfrage-Angebot-Matching eine steigende Liefertreue mit ansteigendem Ziellagerbestand zu beobachten. Durch die kontinuierliche Bestandsüberprüfung und dem Auslösen einer Bestellung bei Unterschreitung des Meldebestands s_{kom} wird somit durch einen höheren Ziellagerbestand S_{kom} die Liefertreue positiv beeinflusst. Lediglich im Coreüberschuss, d. h. dem Stückzahlzenario, in dem mehr Cores als Nachfrage vorhanden sind, erreicht der initialen Ziellagerbestand S_{kom} die besten Werte hinsichtlich der Liefertreue. Für die (t,S)-Politik erreicht sowohl im Nachfrageüberschuss als auch im Nachfrage-Angebot-Matching die Verwendung des initialen Ziellagerbestands S_{kom} die schlechtesten Werte hinsichtlich der Liefertreue. Sowohl eine Halbierung, als auch eine Verdopplung zeigen dabei positive Effekte, wobei die besten Werte in letzterem Fall eintreten. Im Coreüberschuss führt hingegen die Halbierung des Ziellagerbestands von der ursprünglichen Menge zu den besten Werten bzgl. der Liefertreue.

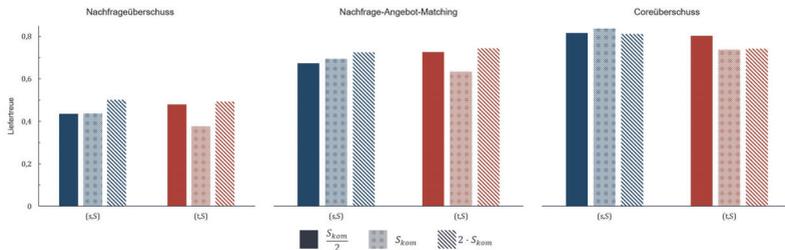


Abbildung A10.1: Auswirkungen der Variation des Ziellagerbestands S_{kom} auf die Liefertreue LT .

Abbildung A10.2 zeigt die Auswirkungen der Variation des Meldebestands s_{kom} auf die Beschaffungskosten $C_{beschaffung}$. Analog zur vorherigen Untersuchung ist der Meldebestand nur für die (s,S)- und (s,q)-Politiken relevant und wird daher nur für diese dargestellt. Entsprechend der in Tabelle 5.3 dargestellten Variation der Steuerfaktoren werden dabei die drei Ausprägungen $\frac{s_{kom}}{2}$, s_{kom} und $2 \cdot s_{kom}$ untersucht, jeweils ausgehend von dem initialen,

komponentenspezifischen Meldebestand s_{kom} . Für die (s,S)-Politik ist, umgekehrt zur Variation des Ziellagerbestands, im Nachfrageüberschuss und im Nachfrage-Angebot-Matching ein möglichst kleiner Meldebestand besser geeignet, um eine Reduktion der Beschaffungskosten zu erreichen. Im Coreüberschuss hingegen ist ein möglichst großer Meldebestand von Vorteil für die Beschaffungskosten, was sich analog zur Beobachtung der Variation des Ziellagerbestands erklären lässt. Für die (s,q)-Politik führt im Nachfrageüberschuss sowie im Coreüberschuss der initiale Meldebestand s_{kom} bereits zu einer sehr guten Lösung, wodurch darauf geschlossen werden kann, dass dieser bereits geeignet gewählt wurde. Im Nachfrage-Angebot-Matching hingegen führt ein möglichst großer Meldebestand zu den minimalen Beschaffungskosten. In diesem Fall ist also ein größerer Sicherheitsbestand von Vorteil, da weiterhin hohe Unsicherheiten hinsichtlich des Rückflusses von Cores sowie der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten besteht.

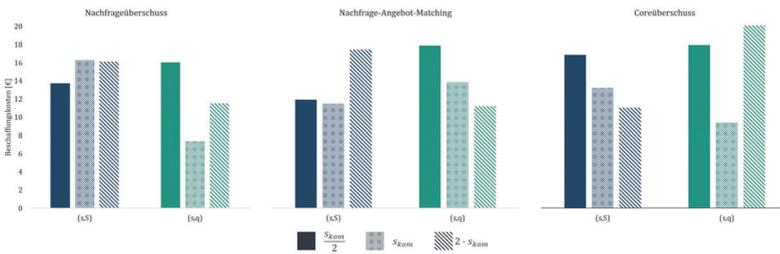


Abbildung A10.2: Auswirkungen der Variation des Meldebestands s_{kom} auf die Beschaffungskosten $C_{beschaffung}$.

Abbildung A10.3 zeigt die Auswirkungen der Variation der komponentenspezifischen Informationssensitivität IS_{kom} auf die Liefertreue LT . Entsprechend der in Tabelle 5.3 dargestellten Variation der Steuerfaktoren werden dabei die drei Ausprägungen $0, 8 \cdot IS_{kom}$, IS_{kom} und $1, 2 \cdot IS_{kom}$ untersucht, jeweils ausgehend von der initialen, komponentenspezifischen Informationssensitivität IS_{kom} . Aus Gründen der Vereinfachung wird lediglich der Mittelwert über alle untersuchten Bestellpolitiken dargestellt. Insgesamt lässt sich dabei festhalten, dass eine Variation der Informationssensitivität nur geringfügige Auswirkungen auf die Liefertreue hat. Grundsätzlich lässt sich dabei festhalten, dass eine geringere Informationssensitivität zu einer höheren Liefertreue führt, was sich über Formel 5.1 erklären lässt: Durch eine Über- bzw. Unterschätzung der realen Regenerationsraten $R_{real,kom}$ in der Berechnung der dynamischen Regenerationsrate $R_{dyn,kom}$ erfolgt somit auch eine Anpassung der Bestellmenge bzw. -zeitpunkte, wodurch sich die Veränderungen in der Liefertreue ergeben. Lediglich im Nachfrageüberschuss scheint eine höhere Informationssensitivität zu einer verbesserten

Liefertreue zu führen. Hier wird also durch eine Unterschätzung der realen Regenerationsrate mehr bzw. häufiger bestellt, wodurch eine bessere Liefertreue erreicht werden kann.

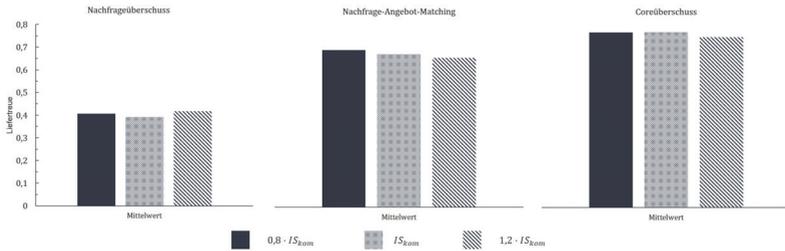


Abbildung A10.3: Auswirkungen der Variation der Informationssensitivität $I_{S_{kom}}$ auf die Liefertreue LT .

Abbildung A10.4 zeigt die Auswirkungen der Variation der komponentenspezifischen statischen Regenerationsrate $R_{stat,kom}$ auf die Liefertreue LT . Entsprechend der in Tabelle 5.3 dargestellten Variation der Steuerfaktoren werden dabei die drei Ausprägungen $0,8 \cdot R_{stat,kom}$, $R_{stat,kom}$ und $1,2 \cdot R_{stat,kom}$ untersucht, jeweils ausgehend von der initialen, komponentenspezifischen statischen Regenerationsrate $R_{stat,kom}$. Dabei ist prinzipiell zu erkennen, dass in allen drei Stückzahlenszenarien eine Reduktion der statischen Regenerationsrate, d. h. $0,8 \cdot R_{stat,kom}$, zu den höchsten Werten bzgl. der Liefertreue führt. Ausnahme hiervon ist lediglich die SM-Heuristik im Nachfrage- und Coreüberschuss sowie die (t,S)-Politik im Coreüberschuss. In diesen Fällen führt die ursprüngliche statische Regenerationsrate $R_{stat,kom}$ zu den besten Werten. Insgesamt lässt sich somit auch hier festhalten, dass eine Variation der statischen Regenerationsraten nur geringfügige Auswirkungen auf die Liefertreue hat, wobei eine geringere statische Regenerationsrate, d. h. eine Überschätzung der notwendigen Bestellmenge, positive Effekte zu haben scheint.

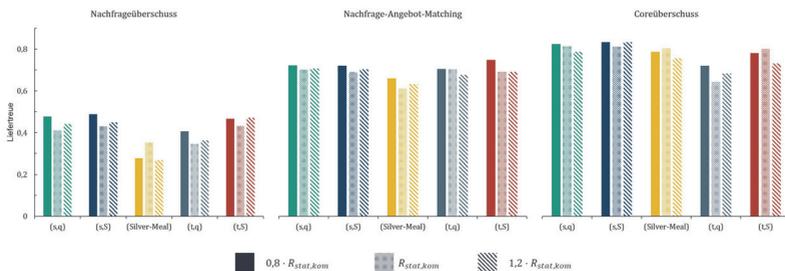


Abbildung A10.4: Auswirkungen der Variation der statischen Regenerationsraten $R_{stat,kom}$ auf die Liefertreue LT .

Abschließend stellt Abbildung A10.5 die Auswirkungen der Variation der Wartezeit der Kunden von aufgearbeiteten Produkten $w_{D_{rpro}}$ auf die Liefertreue LT dar. Entsprechend der in Tabelle 5.3 dargestellten Variation der Steuerfaktoren werden dabei die drei Ausprägungen 4 Tage, 7 Tage und 14 Tage untersucht. Dabei ist ein eindeutiger Trend erkennbar: Je länger die Wartezeit, desto bessere Werte hinsichtlich der Liefertreue können erreicht werden. Durch eine längere Wartezeit ist einerseits eine bessere Nivellierung der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten und somit ein besserer Abgleich mit den zurückfließenden Cores und andererseits eine höhere Toleranz gegenüber bestellten Neukomponenten mit einer längeren Lieferzeit möglich. Somit ist aus Sicht der Liefertreue eine möglichst hohe Wartezeit bzw. Lieferzeitversprechen des fokalen Remanufacturing-Unternehmens anzustreben.

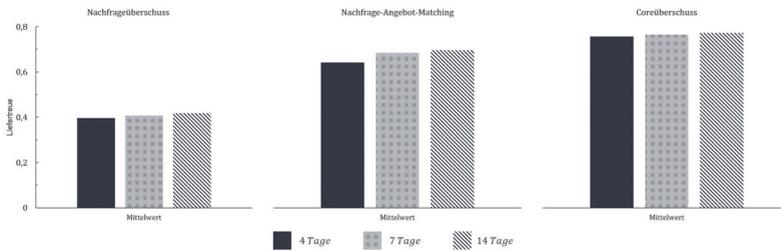


Abbildung A10.5: Auswirkungen der Variation der Wartezeit $w_{D_{rpro}}$ auf die Liefertreue LT .

A11 Ergänzende Informationen zur Nutzwertanalyse und PROMETHEE-Methode

Unbereinigte Darstellung der Handlungsempfehlungen

Abbildung A11.1 zeigt die originale, unbereinigte Darstellung der Handlungsempfehlungen. Im Vergleich zu Abbildung 6.18 ist zu erkennen, dass folgende Fälle bereinigt wurden: Im Nachfrageüberschuss bei einem vollständigen Informationsaustausch und 10 %, 30 % bzw. 100 % Werkstattanbindung wurde jeweils die (s,S)- durch die (t,S)-Politik ersetzt. Im Nachfrage-Angebot-Matching wurde bei vollständigen Informationsaustausch und 20 % bzw. 30 % Werkstattanbindung die (s,q)- durch die (t,S)-Politik ersetzt. Im Coreüberschuss wurde bei vollständiger Werkstattanbindung und 40 % bzw. 60 % Werkstattanbindung die (s,q)- durch die (s,S)-Politik ersetzt. In Summe wurden somit in sieben Fällen die beste Bestellpolitik mit der jeweils zweitbesten ersetzt, wodurch eine Abweichung von 2,53 % entsteht.

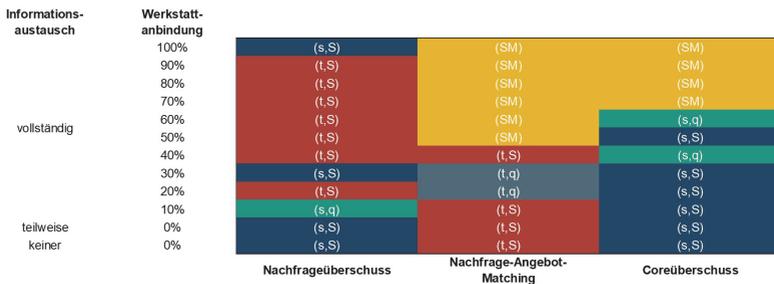


Abbildung A11.1: Originale, unbereinigte Darstellung der Handlungsempfehlungen.

Beispielhafte Visualisierung der Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse im Rahmen der PROMETHEE-Methode

Abbildung A11.2 zeigt die Visualisierung der berechneten Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse für alle Bestellpolitiken im Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung. Wie zu erkennen hat die SM-Heuristik in diesem Fall den höchsten Nettofluss, die (t,q)-Politik den geringsten. Zudem kann über diese Darstellung gezeigt werden, dass die untersuchten Bestellpolitiken nicht unvergleichbar sind, da keine parallelen Flüsse zwischen den Ein- und Ausgangsflüssen existieren.

Darstellung der Insensitivitätsintervalle in den untersuchten Stückzahlenszenarien

Abbildung A11.3 zeigt die vollständige Darstellung der aus der PROMETHEE-Methode resultierenden Insensitivitätsintervalle für das Stückzahlenszenario Nachfrageüberschuss und die unterschiedlichen Grade des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung. Wie zu

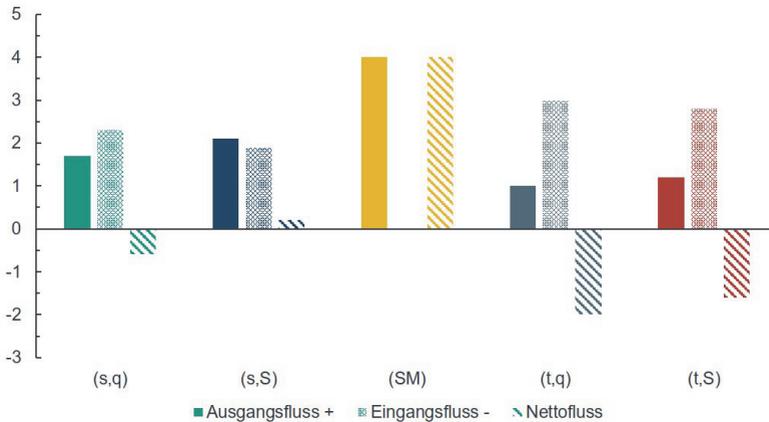


Abbildung A11.2: Visualisierung der berechneten Eingangs-, Ausgangs- und Nettoflüsse für alle Bestellpolitiken im Coreüberschuss bei vollständigem Informationsaustausch mit 100 % Werkstattanbindung.

erkennen ist, kann je nach betrachtetem Fall eine Änderung in den Entscheidungspräferenzen bzw. Gewichtungen der Kennzahlen auch zu einer Veränderung in der am besten geeigneten Bestellpolitik folgen. Hinsichtlich der Kennzahl Gesamtkosten C_{ges} ist die ermittelte Lösung jedoch meistens sehr robust gegenüber Veränderungen. Lediglich bei einem teilweisen Informationsaustausch und bei einem vollständigen Informationsaustausch mit 100 % kommt es bei einer Präferenzänderung auch zu einer Änderung der besten Bestellpolitik, wobei die alternative Lösung in diesem Fall eindeutig ist. Hinsichtlich der CO_2 -Belastung ergibt sich jedoch ein anderes Bild: Hierbei sind in fast jedem Fall des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung Änderungen in der Entscheidung der besten Bestellpolitik bei einer Präferenzänderung zu sehen. Insbesondere bei einem vollständigen Informationsaustausch ist mit steigender Gewichtung der CO_2 -Belastung zu erkennen, dass die SM-Heuristik stärker präferiert wird. Bei keinem bzw. teilweisem Informationsaustausch hingegen ergibt sich ein gemischtes Bild, bei dem sogar zweifache Wechsel der besten Bestellpolitik möglich sind. Die Unterschiede in den absoluten Werten der CO_2 -Belastung je Bestellpolitik sind jedoch in den entsprechenden Fällen nur geringfügig, sodass der organisatorische Aufwand des Wechsels der Bestellpolitik die Vorteile dieser schnell vereiteln dürfte. Hinsichtlich der Liefertreue und der Aufarbeitungsquote wiederum sind die ermittelten Lösungen in den meisten Fällen robust gegenüber Präferenzänderungen.

Abbildung A11.4 stellt die Insensitivitätsintervalle für das Stückzahlscenario Nachfrage-Angebot-Matching in Abhängigkeit des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung dar. Erneut wird insbesondere für die Kennzahlen Gesamtkosten, Liefertreue und Aufarbeitungsquote deutlich, dass die ermittelte Lösung sehr robust gegenüber Änderungen in den Entscheidungspräferenzen ist. Nur in wenigen Fällen, z. B. bei 30 % Werkstattanbindung, kommt es bei Präferenzänderungen auch zu einem Wechsel der besten Bestellpolitik. Analog zum Nachfrageüberschuss weicht die Beobachtung hinsichtlich der CO₂-Belastung dabei etwas ab. In den meisten Fällen hinsichtlich des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung führt eine Änderung der Präferenzen auch zu einer Änderung in der am besten geeigneten Bestellpolitik. Insbesondere eine erhöhte Gewichtung der CO₂-Belastung führt häufig dazu, dass die (s,q)- oder (t,q)-Politik bevorzugt wird, d. h. eines der Bestellpunktverfahren mit kontinuierlicher Bestandsüberwachung. Auch die SM-Heuristik wird in manchen Fällen der Präferenzänderung der CO₂-Belastung bevorzugt.

Abschließend stellt Abbildung A11.5 die Insensitivitätsintervalle für das Stückzahlscenario Coreüberschuss in Abhängigkeit des Informationsaustauschs bzw. der Werkstattanbindung dar. Erneut ist für die Kennzahlen Gesamtkosten, Liefertreue und Aufarbeitungsquote erkenntlich, dass die ermittelte Lösung sehr robust ist und nur in wenigen Fällen bei einer Änderung der Präferenzen auch eine Anpassung der Bestellpolitik notwendig wird. Hinsichtlich der Kennzahl CO₂-Belastung stellt sich das Bild analog zum Nachfrage-Angebot-Matching etwas unterschiedlich dar. So kann es bspw. für einen vollständigen Informationsaustausch mit 60 % Werkstattanbindung sinnvoll sein, bei einer Reduktion der Präferenz der CO₂-Belastung von der (s,q)- auf die (s,S)-Politik zu wechseln, wohingegen ab einer Wichtigkeit von ca. 70 % der CO₂-Belastung die (t,q)-Politik relevant wird. Ähnliche Verläufe lassen sich auch bei anderen Graden der Werkstattanbindung beobachten. Wie bereits angesprochen sind die Unterschiede in den absoluten Werten der CO₂-Belastung jedoch so gering, dass sich ein organisatorischer Aufwand zum Wechsel der Bestellpolitik vermutlich nicht lohnen wird.



Abbildung A11.3: Insensitivitätsintervalle für den Nachfrageüberschuss.



Abbildung A11.4: Insensitivitätsintervalle für das Nachfrage-Angebot-Matching.



Abbildung A11.5: Insensitivitätsintervalle für den Coreüberschuss.

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahleregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuenger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen – Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen
von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügspalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der
Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und
Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter
Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtcher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschalen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Einzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhau

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen
Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Zum Buch

Motiviert durch einen steigenden Ressourcenverbrauch und des damit einhergehenden Erreichen der Grenzen der linearen Take-Make-Use-Dispose-Mentalität sind innovative Produktionsmuster wie die Kreislaufwirtschaft erforderlich. Das Remanufacturing spielt hierin eine zentrale Rolle, wobei die Rückführungslogistik für die Versorgung dessen mit Gebrauchsgütern (sog. Cores) zuständig ist. Trotz erheblicher Einsparpotentiale steht die Umsetzung aufgrund vielfältiger Herausforderungen jedoch erst am Anfang. Hierzu gehören u. a. der effiziente Informationsaustausch mit beteiligten Akteuren in der Rückführungslogistik und die anschließende Nutzung der Informationen, um das Remanufacturing zu optimieren.

Am Beispiel der Materialbedarfsplanung, d. h. der Versorgung des Remanufacturings mit notwendigen Neukomponenten, entwickelt die vorliegende Arbeit eine Methode zur Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Optimierung ebendieser. Neben der Modellierung des Material- und Informationsflusses erfolgt hierzu die Erarbeitung eines Konzepts instanzindividueller, dynamischer Regenerationsraten sowie die Gestaltung echtzeitfähiger Bestellpolitiken, die diese als Input verwenden und je Planungsperiode die Bestellmenge und den -zeitpunkt dynamisch anpassen. Zusätzlich wird das Wagner-Whitin-Verfahren als deterministischer Benchmark-Algorithmus integriert. Mittels Implementierung in einer simulationsbasierten Optimierung zur Identifikation von Wirkzusammenhängen sowie einer Nutzwertanalyse und der PROMETHEE-Methode zur Ableitung anwendungsspezifischer Handlungsempfehlungen erfolgt die Umsetzung der entwickelten Modelle. Die entwickelte Methode wird am Beispiel des Automotive Aftermarkets prototypisch validiert und erprobt. Anhand unterschiedlicher Szenarien wird gezeigt, dass diejenigen Bestellpolitiken mit einer variablen Bestellmenge die besten Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten Kennzahlen liefern. Die mit Hilfe der PROMETHEE-Methode abgeleiteten Insensitivitätsintervalle zeigen außerdem, dass die ermittelten Lösungen größtenteils sehr robust gegenüber Veränderungen in den Entscheidungspräferenzen sind.

ISBN 978-3-8440-9264-6

