

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

Marco Robert Wurster

**Planung und Steuerung agiler hybrider
Demontagesysteme im Remanufacturing**

Band 288

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
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Marco Robert Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 288

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Marco Robert Wurster, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 18.09.2024

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9726-9
PDF-ISBN 978-3-8440-9826-6
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783844098266>

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, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. 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 mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. 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

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Zunächst gilt mein besonderer Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Übernahme des Hauptreferats, die wissenschaftliche und persönliche Betreuung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. Marcel Utz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) des KIT danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes am KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Schweden. Hier gilt mein besonderer Dank Prof. Lihui Wang sowie dem ganzen Department of Production Engineering für die ausgezeichnete Gastfreundschaft und den wissenschaftlichen Austausch.

Mein großer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des wbk für die inspirierende Arbeitsatmosphäre und den außergewöhnlichen Zusammenhalt während und außerhalb der Arbeit. Für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanke ich mich insbesondere bei Finn Bail, Patrizia Gartner, Felix Klenk, Jan-Philipp Kaiser, Magnus Kandler und Marvin May sowie zusätzlich für das Korrekturlesen und die vielen fachlichen Diskussionen bei Sebastian Behrendt und Alex Frey. Mein besonderer Dank und Respekt gilt weiterhin allen Studierenden, die durch ihr Engagement und ihre Kreativität einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Schwester, bei meiner Freundin Caroline und bei meinen Eltern für die Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während meiner Promotion bedanken.

Karlsruhe, September 2024

Marco Wurster

Kurzfassung

Das Remanufacturing von Gebrauchsgüterprodukten bietet ein hohes ökologisches und ökonomisches Potential. Ein Prozessschritt, der die Wettbewerbsfähigkeit dabei maßgeblich beeinflusst, ist die Demontage. Sie ist durch eine hohe Unsicherheit, ineffiziente Prozesse und manuelle Arbeit geprägt. Agile hybride Demontagesysteme bieten hier eine Lösung. Sie kombinieren eine manuelle und automatisierte Verrichtung in einem dynamischen, arbeitsteiligen Betrieb. Eine lose Verkettung der Stationen im System erlaubt einen flexiblen Materialfluss und eine individuelle Produktbehandlung. Die Systemkapazität kann durch Rekonfiguration, d.h. durch Hinzufügen, Entfernen oder Ersetzen von Stationen, angepasst werden. Der Mensch wird, wo möglich und sinnvoll, gezielt durch flexibel automatisierte Demontageressourcen entlastet. Agile hybride Demontagesysteme versprechen eine deutliche Produktivitätssteigerung. Aufgrund der zusätzlichen Freiheitsgrade sind sie jedoch mit einer hohen Komplexität verbunden, die die Systemorganisation vor Herausforderungen stellt.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren für die Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme. Dafür wird zunächst eine Systemrepräsentation etabliert. Um eine hohe Abbildungsgüte der spezifischen Unsicherheiten und Komplexitäten zu ermöglichen, wird ein fähigkeitsorientiertes Referenzmodell mit einer differenzierten Produkt-, Ressourcen- und Operationssicht definiert. Darauf aufbauend wird eine von der Planung entkoppelte, echtzeitfähige Systemsteuerung entwickelt. Diese umfasst ein Conwip-Auftragsfreigabeverfahren sowie ein dezentral gesteuertes, prioritätsregelbasiertes Auftragsallokationsverfahren. Durch die gezielte Kombination von Prioritätsregeln und die automatisierte Gewichtung mittels metaheuristischer Optimierungsverfahren erreicht die Steuerung eine hohe Systemleistung bei hoher Adaptivität. Zusätzlich wird ein vorausschauendes, auf linearer Programmierung basierendes Kapazitätsplanungsverfahren entwickelt und mit einer Planungsheuristik verglichen. Durch die Berücksichtigung der Qualitätszustände der Gebrauchsgüterprodukte wird die Planungsunsicherheit reduziert und im mehrperiodigen Betrieb ein systematischer Kapazitätsausgleich ermöglicht. Die entwickelten Verfahren werden im Rahmen umfangreicher Simulationsstudien getestet und schließlich anhand eines industriellen Anwendungsfalls validiert. Hierbei zeigt sich ihr Potential zur Steigerung der Systemproduktivität und zur Entlastung des Menschen.

Abstract

The Remanufacturing of used products promises great ecological and economic potential. Disassembling the used products is the most important process step and, simultaneously, a major obstacle to the competitiveness of remanufacturing today, since it is prone to high uncertainty, inefficient processes, and manual labor. Agile hybrid disassembly systems address this challenge by combining partial automation of disassembly processes with dynamic operations. Such a system allows for a flexible material flow and individual treatment of all products through loosely linked stations. Its capacity can be adjusted through reconfiguration, i.e. addition, removal, or substitution of stations. Where possible and economically feasible, human operators are unburdened by flexibly automated disassembly resources. Agile hybrid disassembly systems promise significant productivity gains. However, their complexity is high due to the large number of additional degrees of freedom, which is a major organizational challenge for the system.

This work aims to develop methods for planning and controlling of agile hybrid disassembly systems. To achieve this goal, a system representation is first developed. A capability-oriented reference model is defined to accurately represent the uncertainties and complexities in the hybrid system, incorporating differentiated product-, resource, and operational views. Subsequently, a real-time control method decoupled from planning is developed based on a Conwip order release mechanism and a decentralized priority rule-based order allocation approach. By combining multiple rules and automatically weighting them using metaheuristic optimization methods, the control system achieves high system performance while remaining highly adaptive. In addition, a method for multi-period capacity planning based on linear programming is developed and compared with a heuristic alternative. It reduces planning uncertainty by considering the quality status of the used products and balances the system capacity in a cost-minimizing way. The approach is extensively tested through simulation studies and, eventually, validated based on an industrial product case, demonstrating its potential to increase productivity and reduce human workload.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen	8
2.1 Produktionssystemplanung	8
2.1.1 Handlungsfelder der Produktionsplanung und -steuerung	8
2.1.2 Kapazitätsterminierung	9
2.1.3 Auftragsfreigabe	12
2.1.4 Ablaufplanung	12
2.1.5 Lösungsverfahren der Produktionsplanung und -steuerung	13
2.2 Grundlagen des Remanufacturings	14
2.2.1 Abgrenzung und Treiber	14
2.2.2 Charakteristische Herausforderungen	16
2.2.3 Charakteristische Prozesskette	16
2.2.4 Branchenüberblick	18
2.2.5 Akteure im Remanufacturing von Automobilkomponenten	19
2.3 Grundlagen hybrider Demontagesysteme	20
2.3.1 Einführung und Grundbegriffe der Demontage	21
2.3.2 Herausforderungen der Demontage	22
2.3.3 Organisation von Demontagesystemen	24
2.3.4 Flexible roboterbasierte Demontageautomatisierung	29
3 Stand der Forschung und Technik	35
3.1 Anforderungen an Modellierung und Lösungsmethodik	35
3.2 Ansätze zur Demontageplanung bei Unsicherheit und Komplexität	36
3.3 Ansätze zu Qualitätsklassensystemen in der Demontageplanung	40
3.4 Ansätze zur reaktiven Demontageplanung und -steuerung	44

3.5	Ansätze zur Kapazitätsplanung und rekonfigurierbaren Produktionssystemen im Remanufacturing	47
3.6	Bewertung des Forschungsdefizits und Ableitung von Forschungsfragen	50
4	Überblick über den Lösungsansatz	55
4.1	Eingrenzung des Zielsystems	55
4.1.1	Abgrenzung der Stationstypen im Demontagesystem	55
4.1.2	Einbettung in ein transparentes Rückwärtslogistiknetzwerk	59
4.1.3	Ergänzende Annahmen	60
4.2	Beschreibung des Vorgehens	61
5	Methodik zur Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme	63
5.1	Beschreibung eines Referenzmodells	63
5.1.1	Modelleinführung	63
5.1.2	Ressourcensicht	64
5.1.3	Produktsicht	65
5.1.4	Operationssicht	69
5.2	Modellierung des agilen Demontagesystems	71
5.2.1	Systemarchitektur und -komponenten	71
5.2.2	Zustände und Betriebsmodi	74
5.3	Modellierung der Zielgrößen	77
5.3.1	Zeit- und kapazitätsbezogene Zielgrößen	78
5.3.2	Kostenbezogene Zielgrößen	79
5.4	Verfahren für die Systemsteuerung	81
5.4.1	Charakterisierung der Steuerungsaufgaben	81
5.4.2	Verfahren für die Auftragsfreigabe	83
5.4.3	Verfahren für die Auftragsallokation	85
5.5	Adaption der Auftragsallokation	91
5.6	Verfahren für die Systemrekonfiguration	92
5.6.1	Taktik und Ablauf der Kapazitätsplanung	92
5.6.2	Analytisch-heuristische Kapazitätsdeckungsrechnung	95
5.6.3	Exaktes Kostenoptimierungsverfahren	99
5.7	Prototypische Implementierung	106
6	Simulationsbasierte Untersuchung	110
6.1	Spezifikation der Anwendungsfälle	111
6.1.1	Definition der Produkttypen	111
6.1.2	Spezifikation der Ressourcen- bzw. Stationstypen	112

6.1.3	Spezifikation der Demontageoperationen	113
6.1.4	Spezifikation der Systemstruktur- und Logistik	115
6.1.5	Definition einperiodiger Anwendungsfälle	117
6.1.6	Definition mehrperiodiger Anwendungsfälle	117
6.2	Untersuchung der Auftragsfreigabe	118
6.2.1	Logistische Kennlinienanalyse	118
6.2.2	Qualitative Analyse der Auftragsbelegungspläne	121
6.2.3	Zwischenfazit	121
6.3	Untersuchung des Auftragsallokationsverfahrens	123
6.3.1	Bewertung der Regeleffektivität	123
6.3.2	Lösungsraumanalyse bei dreifacher Regelkombination	127
6.3.3	Sensitivitätsanalyse bei schrittweiser Anwendungsfallvariation	129
6.3.4	Zwischenfazit	130
6.4	Untersuchung der Parametrierungsverfahren	132
6.4.1	Auswahl der Hyperparameter	132
6.4.2	Konvergenzverhalten bei Variation der Regelanzahl	133
6.4.3	Zwischenfazit	135
6.5	Untersuchung der Kapazitätsplanung und Systemrekonfiguration	135
6.5.1	Einfluss der Roboterstrategie	136
6.5.2	Vergleich der Planungsverfahren	138
6.5.3	Zwischenfazit	144
6.6	Integrierte Untersuchung der DPS-Verfahren	145
6.6.1	Einfluss der DPS-Handlungsfelder	145
6.6.2	Zwischenfazit	148
6.7	Zwischenfazit zum Lösungsansatz	148
6.8	Validierung am Anwendungsfall der Lichtmaschinendemontage	150
6.8.1	Modellierung des Demontagesystems	151
6.8.2	Validierung und Szenarioanalyse	151
6.8.3	Zwischenfazit	160
7	Diskussion und Ausblick	161
7.1	Diskussion	161
7.2	Ausblick	165
8	Zusammenfassung	167
	Liste eigener Veröffentlichungen	169
	Literaturverzeichnis	171

Abbildungsverzeichnis	196
Tabellenverzeichnis	202
Anhang	XV
A1 Funktionsweise der metaheuristischen Optimierungsverfahren	XV
A2 Spezifikation der Demontageoperationen	XIX
A3 Untersuchung des Transportsystems	XXII
A4 Definition der einperiodigen Anwendungsfälle	XXV
A5 Beschreibung der mehrperiodigen Produktionsprogramme	XXVI
A6 Ergänzende Ergebnisse der Prioritätsregeluntersuchung	XXVIII
A7 Beschreibung der Hyperparameterstudien	XXXV
A8 Ergänzende Ergebnisse zum Vergleich der Kapazitätsplanungsverfahren .	XL
A9 Validierung: Modellierung der Gebrauchtprodukte	XLII
A10 Validierung: Modellierung der Demontageressourcen	XLVI
A11 Validierung: Modellierung der Demontageoperationen	XLVII
A12 Validierung: Berechnung der Stationskostensätze	XLIX
A13 Validierung: Fähigkeiten und Kosteneffizienz der Stationstypen	LI

Abkürzungsverzeichnis

Akronym	Bedeutung
ABC	Artificial Bee Colony (Optimierungsalgorithmus)
AMA	Adaptive multikriterielle Auftragsallokation
AHDS	Agiles hybrides Demontagesystem
AS	Automatisierte Station
BV	Beta-Verteilung
CIP	Components-in-Progress
Conwip	Constant work in progress
DemAufg	Demontageaufgabe
DemOp	Demontageoperation
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLB	Disassembly Line Balancing
DPN	Demontage-Petri-Netz
DPS	Demontageplanung und -steuerung
DV	Demontagevorrichtung
EOL	End-of-Life
EU	Europäische Union
FA	Fehlerinduzierte Aufgabenallokation
FCFS	First-Come-First-Served
FRS	Flexible Roboterstation
GE	Geldeinheit
GEW	Größte Erfahrung und Fähigkeit
GK	Gewichtungskonfiguration (des Multi-Prioritätsregelverfahrens)
HEW	Höchste Erfolgswahrscheinlichkeit
HPK	Hyperparameterkonfiguration
KOZ	Kürzeste Operationszeit
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MPV	Multi-Prioritätsregelverfahren
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MS	Manuelle Station
NAW	Niedrigste Ausschusswahrscheinlichkeit
NEE	Niedrigste erwartete Ermüdung
NPA	Niedrigste Pufferauslastung
NRA	Niedrigster Rüstaufwand

Akronym	Bedeutung
NST	Niedrigste Stationskosten
NTA	Niedrigster Transportaufwand
OEM	Original Equipment Manufacturer
OER	Original Equipment Remanufacturer
OIP	Orders-in-Progress
PP	Produktionsprogramm
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSO	Particle Swarm Optimization
QK	Qualitätsklasse
RA	Reguläre Aufgabenallokation
RDS	Reconfigurable Disassembly System
RK	Regelkombination
RKK	Rekonfigurationskosten
RMA	Robuste multikriterielle Auftragsallokation
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
SA	Simulated Annealing
UA	Unikriterielle Auftragsallokation
VDI	Verein deutscher Ingenieure e.V.
WIP	Work-In-Progress
ZA	Zufällige Auftragsallokation
ZE	Zeiteinheit

Formelverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Demontageaufgabe	-
A	Menge aller Demontageaufgaben	-
A_v	Menge der potentiell durchzuführenden Demontageaufgaben von Produktvariante v	-
$A_{v,q}$	Menge der potentiell durchzuführenden Demontageaufgaben von Produktvariante v in Qualitätsklasse q	-
ap	Ausgangspuffer	-
$B(\alpha, \beta)$	Betafunktion	-
$\mathcal{B}(p_{erfolg})$	Bernoulli-Verteilung der Erfolgswahrscheinlichkeit	-
b^k	Gesamter Auftragsbestand in Periode k nach Produktionsprogramm	Stück
$b_{v,q}^k$	Auftragsbestand für Produktvariante v mit Qualitätsklasse q in Periode k gemäß Produktionsprogramm	Stück
$b_{v,q}^{k,rück}$	Geplanter Auftragsrückstand für Produktvariante v in Qualitätsklasse q am Ende von Periode k	Stück
$b^{k,vrzig}$	Gesamter Auftragsverzug am Ende von Periode k	Stück
$b_{v,q}^{k,vrzig}$	Auftragsverzug für Produktvariante v in Qualitätsklasse q am Ende von Periode k	Stück
C_{btrb}^k	Gesamtbetriebskosten der Demotageressourcen in Periode k	GE
C_{inv}^k	Investitionskosten in Periode k	GE
C_{reko}^k	Gesamtreakonfigurationskosten in Periode k	GE
C_{vrzig}^k	Gesamtverzugskosten durch Auftragsrückstand in Periode k	GE
C^k	Gesamtkosten in Periode k	GE
C_{ges}^K	Gesamtkosten im Zeitraum der Periodenmenge K	GE
$C_{r,+}^k$	Kosten für die Rekonfiguration der in Periode k im System aufgebauten Ressourcen von Typ r	GE
$C_{r,-}^k$	Kosten für die Rekonfiguration der in Periode k im System abgebauten Ressourcen von Typ r	GE
c_{op}	Kostensatz der ausführenden Station von op , analog $c_{r,btrb}$	$\frac{GE}{min}$
c_{op}^{eff}	Kosteneffizienz der ausführenden Station von op	$\frac{GE}{Ausführung}$
c^{max}	Höchster Stationskostensatz im Vergleich aller Stationstypen	GE
c^{min}	Niedrigster Stationskostensatz im Vergleich aller Stationstypen	GE
$c_{r,btrb}$	Kostensatz (je Zeiteinheit) für den Betrieb von Ressourcen vom Typ r	$\frac{GE}{min}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$c_{r,+}$	Kostensatz für den Aufbau von Ressourcen vom Typ r	$\frac{GE}{Stück}$
$c_{r,-}$	Kostensatz für den Abbau von Ressourcen vom Typ r	$\frac{GE}{Stück}$
c_{vrzg}	Kostensatz für Auftragsverzug je Demontageauftrag	GE
c_{tr}	Transportkapazität	$Stück$
dpn_v	Demontage-Petri-Netz von Produktvariante v beschrieben als Quintupel	-
ep	Eingangspuffer	-
f_X	Dichtefunktion der Zufallsvariablen X	-
$F_{v,q}^{a,r,k}$	Allokationsvariable, die angibt, wie viele Backup-Demontageaufgaben a den Ressourcen des Typs r für eine Produktvariante v in der Qualitätsklasse q in der Periode k zugewiesen werden	$Stück$
F_{OP}^r	Operationsbezogener Fähigkeitsraum als Menge der von Ressourcen vom Typ r durchführbaren Operationen	-
F_A^r	Aufgabenbezogener Fähigkeitsraum als Menge der von Ressourcen vom Typ r zuweisbaren Aufgaben	-
g	Baugruppenkennung	-
k	Produktionsperiode	-
K	Menge konsekutiver Produktionsperioden	-
K^{plan}	Menge konsekutiver Produktionsperioden k im Planungshorizont	-
k_{eff}	Effizienzfaktor zur Manipulation der Ausführungsdauern t_{op} der FRS im Rahmen der Parametrisierung	-
k_{rbst}	Robustheitsfaktor zur Manipulation der Erfolgswahrscheinlichkeiten $per_{folg,op}$ der FRS im Rahmen der Parametrisierung	-
k^{fix}	Festlegungszeitraum im Rahmen einer Rekonfiguration	$Periode$
k_r^{fix}	Festlegungszeitraum für Ressourcen vom Typ r im Rahmen einer Rekonfiguration	$Periode$
k_{cw}	Conwip-Koeffizient	-
$k_{kühl}$	Abkühlfaktor (für das Simulated Annealing)	-
k_{skal}	Skalierungskonstante (Conwip-Verfahren)	-
$KanA$	Menge der gerichteten Kanten zwischen einer Transition und einem Platz eines DPN (Ausgangsfunktion)	-
$KanE$	Menge der gerichteten Kanten zwischen einem Platz und einer Transition eines DPN (Eingangsfunktion)	-
$knop$	Platz im DPN (Produkt, Baugruppe, Einzelkomponente)	-
$knott$	Transition im DPN (Produkt, Baugruppe, Einzelkomponente)	-

Symbol	Beschreibung	Einheit
$KnoP$	Endliche Menge von Plätzen $knop$ eines DPN	-
$KnoT$	Endliche Menge von Transitionen $knot$ eines DPN	-
l	Position im Systemlayout	-
L	Menge der Positionen im Systemlayout	-
LB^k	Layoutbelegung in Periode k	-
\overline{L}_k	Mittlere Leistung	$\frac{\text{Stück}}{\text{min}}$
$Mark$	Markierungsvektor eines DPN	-
$mark$	Position im Markierungsvektor	-
n_{limit}^{abc}	Schwellwert des ABC-Algorithmus	-
n_{pop}	Populationsgröße des PSO- oder des ABC-Algorithmus	-
$n^{k,ausb}$	Systemausbringung in Periode k	Stück
n_r	Bedarf nach Ressource vom Typ r	Stück
n_r^k	Bedarf nach Ressourcen vom Typ r in Periode k	Stück
$n_{r,+}^k$	Anzahl der in Periode k im System aufgebauten Ressourcen von Typ r	Stück
$n_{r,-}^k$	Anzahl der in Periode k im System abgebauten Ressourcen von Typ r	Stück
$n_{ap,ql}$	Anzahl der Aufträge im Ausgangspuffer ap der Quelle ql	Stück
$n_{ap,ql}^{max}$	Auftragskapazitätsgrenze des Ausgangspuffers ap der Quelle ql	Stück
$n_{ep,s}$	Anzahl der Aufträge im Eingangspuffer ep von Station s	Stück
$n_{ep,s}^{max}$	Auftragskapazitätsgrenze des Eingangspuffers ep von Station s	Stück
n_{wip}	Umlaufbestand	Stück
n_{cip}	Komponentenumlaufbestand	Stück
n_{oip}	Auftragsumlaufbestand	Stück
n_{wip}^{max}	Maximaler Umlaufbestand	Stück
n_{cip}^{max}	Maximale Anzahl an Einzelkomponenten im Systemumlauf (sowohl im Verbund als auch bereits demontiert)	Stück
n_{oip}^{max}	Maximale Auftragsanzahl im Systemumlauf	Stück
o	Demontageauftrag	-
o_{hpt}	Hauptauftrag	-
o_{sub}	Subauftrag	-
O_{hpt}	Menge an Hauptaufträgen im Auftragsbestand	-
O_{wip}	Menge an Aufträgen im Systemumlauf	-
op	Demontageoperation	-
\hat{op}	Ausgewählte Demontageoperation mit höchstem Prioritätswert	-

Symbol	Beschreibung	Einheit
$op_{v,q}^{a,r}$	Demontageoperation zur Durchführung von Demontageaufgabe a an Ressourcen vom Typ r für Variante v in Qualitätsklasse q vollständig definiert durch Tripel $(\kappa_{op}, t_{op}, p_{erfolg,op})$	-
Op_{pot}	Aktionsraum der Auftragsallokation, Menge potentieller Demontageoperationen op	-
Pop	Population als die Menge der Agenten eines Schwarms (für die PSO) bzw. einer Kolonie (für die ABC-Optimierung)	-
$p_{erfolg,op}$	Erfolgswahrscheinlichkeit einer Demontageoperation op	-
$p_{erfolg,mnpl}$	Manipulierter Wert der Erfolgswahrscheinlichkeit	-
$p_{erfolg,ursp}$	Ursprünglicher Wert der Erfolgswahrscheinlichkeit	-
$p_{v,q}^{a,r}$	Erfolgswahrscheinlichkeit von Aufgabe a an Ressourcen vom Typ r bei vorliegender Qualitätsklasse q (explizite Notation von $p_{erfolg,op}$)	-
$\hat{p}_{v,q}^{a,r}$	Erwartete Erfolgswahrscheinlichkeit von Aufgabe a an Ressourcen vom Typ r bei vorliegender Qualitätsklasse q	-
q	Qualitätsklasse	-
Q_v	Menge aller Qualitätsklassen q der Produktvariante v	-
ql	Quelle	-
r	Ressourcentyp	-
R	Menge aller Ressourcentypen $r \in R$, die für Demontageaufgaben zur Verfügung stehen	-
R_{DV}	Vollständige Menge aller Demontagevorrichtungstypen DVx	-
R_s	Menge einer Station s zugewiesenen Ressourcentypen	-
s	Station	-
S	Menge aller Stationen	-
S_{AS}	Menge der automatisierten Stationen	-
S_{FRS}	Menge der flexiblen Roboterstationen	-
S_{MS}	Menge der manuellen Stationen	-
st	Stationstyp	-
ST	Menge der Stationstypen	-
sn	Senke	-
$t_{auslauf}$	Dauer des Auslaufzeitraums	min
$t_{v,q}^{a,min}$	Minimale Ausführungsdauer einer Demontageaufgabe a für Variante v in Qualitätsklasse q	min

Symbol	Beschreibung	Einheit
$t_{v,q}^{a,r}$	Ausführungsdauer einer Demontageaufgabe a an Ressourcen vom Typ r bei vorliegender Variante v in Qualitätsklasse q (explizite Notation von t_{op})	<i>min</i>
$\hat{t}_{v,q}^{a,r}$	Erwartete Ausführungsdauer einer Demontageaufgabe a an Ressourcen vom Typ r bei vorliegender Variante v in Qualitätsklasse q	<i>min</i>
$\overline{t_{DLZ}}$	Mittlere Auftragsdurchlaufzeit	<i>min</i>
t_k	Dauer von Periode k	<i>min</i>
$t_{r,belegt}^k$	Kapazitätsbedarf nach Ressourcen vom Typ r in Periode k	<i>min</i>
t^{max}	Maximale Ausführungsdauer	<i>min</i>
t^{min}	Minimale Ausführungsdauer	<i>min</i>
t^{modus}	Wahrscheinlichste Ausführungsdauer (Modus der Beta-Verteilung)	<i>min</i>
t_{op}	Erwartete Ausführungsdauer von Demontageoperation op	<i>min</i>
t_{mnpl}^x	Manipulierte Parameterwerte der Ausführungsdauer t^{min} , t^{modus} und t^{max}	<i>min</i>
t_{ursp}^x	Ursprüngliche Parameterwerte der Ausführungsdauer t^{min} , t^{modus} und t^{max}	<i>min</i>
$t_{s,eff}^k$	Kumulierte Bearbeitungszeit einer Station s in Periode k	<i>min</i>
t_{zyk}	Fertigstellungszeit bzw. Zykluszeit (engl. Makespan) des Demontage-systems	<i>min</i>
tr	Transportressource	-
TR	Menge der Transportressourcen	-
T	Temperatur (für das Simulated Annealing)	-
T_{start}^k	Startzeitpunkt von Periode k	-
T_{ende}^k	Endzeitpunkt von Periode k	-
$T_{auslauf}^k$	Startzeitpunkt des Auslaufmodus in Periode k	-
T_{ende}^o	Auftragsfertigstellungszeitpunkt von Demontageauftrag o	-
T_{start}^o	Auftragsfreigabezeitpunkt von Demontageauftrag o	-
u	Kapazitätsauslastung	-
u_s^k	Auslastung von Station s in Periode k	-
u_{st}^k	Mittlere Auslastung aller Stationen vom Stationstyp st in Periode k	-
u_S^k	Mittlere Auslastung aller Stationen bzw. mittlere Systemauslastung in Periode k	-
$U(x, y)$	Gleichverteilung im Intervall (x, y)	-

Symbol	Beschreibung	Einheit
v	Produktvariante	-
V	Menge aller Produktvarianten	-
v_{tr}	Transportgeschwindigkeit	$\frac{m}{min}$
w_π	Gewichtung von Prioritätsregel π	-
X	Zufallsgröße	-
$X_{v,q}^{a,r,k}$	Allokationsvariable, die angibt, wie viele Demontageaufgaben a den Ressourcen des Typs r für eine Produktvariante v in der Qualitätsklasse q in der Periode k zugewiesen werden	Stück
α	Formparameter der Beta-Verteilung	-
β	Formparameter der Beta-Verteilung	-
γ_{FRS}^{limit}	Koeffizient zur FRS-Limitierung in der MILP-Kapazitätsplanung	-
ϵ	Reaktionszeit der Ressourcenrekonfiguration	Periode
ϵ_r	Reaktionszeit für den Aufbau von Ressourcen vom Typ r	Periode
$\hat{\eta}_{v,q}^a$	Häufigkeitsschätzung von Aufgabe a bei vorliegender Qualitätsklasse q mit $\hat{\eta}_{v,q}^a \in [0,1]$	-
$\kappa_{v,q}^{a,r}$	Fähigkeitsindikator und explizite Notation von κ_{op} mit $\kappa_{v,q}^{a,r} = 1$, falls Ressourcen vom Typ r befähigt zur Ausführung von a bei vorliegender Qualitätsklasse q , ansonsten $\kappa_{v,q}^{a,r} = 0$	-
λ	MS-Allokationsanteil für RS-befähigte Demontageaufgaben	-
λ^{min}	MS-Allokationsanteil für RS-befähigte Demontageaufgaben mit Kostenminimum	-
μ	Gewichtungsfaktor Trägheitskomponente (für PSO)	-
$\nu(op)$	Prioritätswert einer Demontageoperation op	-
$\nu_{\pi,op}$	Regelspezifischer Prioritätswert einer Demontageoperation op	-
$\xi_{rr'}$	Indikator der Ausweichstrategie: $\xi_{rr'} \geq 1$ falls Scheitern an Ressource vom Typ r' und Zuweisung zu Ressourcen vom Typ r	-
τ	Zusammengefasster Beschleunigungsfaktor (für PSO)	-
τ_1	Gewichtungsfaktor der Kognitivkomponente (für PSO)	-
τ_2	Gewichtungsfaktor der Sozialkomponente (für PSO)	-
π	Prioritätsregel	-
Π	Menge aller Prioritätsregeln	-
$\mathbf{b}_{v,k}^{Q_v}$	Vektor des Auftragsbestand für alle Qualitätsklassen Q_v einer Produktvariante v in Periode k	-

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\mathbf{D}^{L \times L}$	Quadratische Transportdistanzmatrix für alle Positionen des Layouts L	-
$f(\mathbf{w})$	Ausprägung der Zielkennzahl nach simulationsbasierter Evaluation	-
$\mathbf{FA}_{v,a}^{R \times Q_v}$	Matrix der fehlerinduzierten Allokation der Demontageaufgabe a einer Produktvariante v für alle Ressourcentypen R über alle Qualitätsklassen Q_v	-
$N(\mathbf{w})$	Nachbarschaftsfunktion (im Simulated Annealing)	-
\mathbf{n}_k^R	Ressourcenbedarfsvektor	-
$\hat{\mathbf{P}}_{v,a}^{R \times Q_v}$	Matrix der erwarteten Erfolgswahrscheinlichkeiten der Demontageaufgabe a einer Produktvariante v für alle Ressourcentypen R über alle Qualitätsklassen Q_v	-
$\mathbf{RA}_{v,a}^{R \times Q_v}$	Matrix der regulären Allokation der Demontageaufgabe a einer Produktvariante v für alle Ressourcentypen R über alle Qualitätsklassen Q_v	-
$\mathbf{t}_{k,belegt}^R$	Ressourcenspezifischer Kapazitätsbedarfsvektor in Periode k	-
$\hat{\mathbf{T}}_{v,a}^{R \times Q_v}$	Matrix der erwarteten Ausführungsdauern der Demontageaufgabe a einer Produktvariante v für alle Ressourcentypen R über alle Qualitätsklassen Q_v	-
\mathbf{w}	Gewichtungsvektor	-
\mathbf{w}_{best}	Gewichtungsvektor mit höchstem gefundenen Evaluationsergebnis für das Simulated Annealing	-
\mathbf{w}_{neu}	Nächster zur Evaluation ausgewählter Gewichtungsvektor für das Simulated Annealing	-
\mathbf{w}_i	Einzelner Gewichtungsvektor als Agent (Partikel i für PSO bzw. Biene i für die ABC-Optimierung) als Teil einer Population Pop	-
$\dot{\mathbf{w}}_i$	Partikelgeschwindigkeit (für PSO)	-
$\mathbf{w}_{best,i}$	Bester gefundener Gewichtungsvektor des Partikels mit Index i	-
$\mathbf{w}_{best}^{global}$	Bester gefundener Gewichtungsvektor aller Partikel der Population Pop	-
$\mathbf{w}_{neu,i}$	Nächster zur Evaluation ausgewählter Gewichtungsvektor eines Partikels i in der PSO	-
$\mathbf{w}_{eval,i}$	Nächster zur Evaluation ausgewählter Gewichtungsvektor eines Agenten für die ABC-Optimierung	-
$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{v,a}^{Q_v}$	Schätzvektor der Häufigkeit von Aufgabe a einer Produktvariante v für alle Qualitätsklassen Q_v	-

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\Theta_{v,a}^{R \times Q_v}$	Allokationsstrategiematrix der Demontageaufgabe a einer Produktvariante v für alle Ressourcentypen R über alle Qualitätsklassen Q_v	-
$\Xi^{R \times R}$	Quadratische Backup-Allokationsmatrix für alle Ressourcentypen R	-

1 Einleitung

Seit 1950 hat sich die Weltbevölkerung mehr als verdreifacht (United Nations 2022a, S. 3). Im November 2022 wurde die Marke von acht Milliarden Menschen auf der Erde überschritten. Ein weiterer Zuwachs der Weltbevölkerung auf 8,5 Milliarden Menschen bis 2030 sowie eine Verdopplung der globalen Mittelschicht auf drei Milliarden Menschen wird prognostiziert (World Economic Forum 2014, S. 3; United Nations 2022a, S. 3). Mit wachsender Bevölkerung und wachsendem Wohlstand steigt die weltweite Nachfrage nach natürlichen Ressourcen (Dobbs & Oppenheim et al. 2011, S. 5 ff.). Zwischen den Jahren 2000 und 2019 stieg der globale Verbrauch bereits um über 65 Prozent auf 95,1 Milliarden Tonnen im Jahr 2019 (United Nations 2022b, S. 19). Eine Möglichkeit zur Entkopplung des globalen Wohlstands vom Ressourcenverbrauch ist die Abkehr von der linearen Quellen-Senken-Wirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft (Scheel & Aguiñaga et al. 2020). Mit ihrem regenerativen Charakter verfolgt diese das Ziel, den Wert von Produkten, Komponenten und Materialien auf höchstem Niveau zu bewahren (Ellen MacArthur Foundation 2015, S. 5).

Eine Methode der Kreislaufwirtschaft stellt die Refabrikation (engl. Remanufacturing) dar, wobei Gebrauchtprodukte¹ nach einer Nutzungsphase aufgearbeitet und in ihren Ursprungszustand zurückversetzt werden, um sie bei vollwertigem Garantieverprechen einem weiteren Nutzungszyklus zuzuführen (Parker & Riley et al. 2015, S. 4; Lange 2017, S. 11 f.). Das Remanufacturing verspricht erhebliche ökonomische und ökologische Vorteile durch Material- und Energieeinsparungen sowie geringere CO₂-Emissionen (Lange 2017, S. 21 ff.). Verglichen mit der Produktion eines Neuprodukts lassen sich beispielhaft durch das Remanufacturing von Startermotoren für Kraftfahrzeuge 88 % des Material-, 56 % des Energie- und 53 % des CO₂-Bedarfs einsparen (Bartel 2015, S. 7 zitiert nach Lange 2017, S. 22). Das Marktpotential für das Remanufacturing ist groß, dennoch ist die Remanufacturing-Intensität, d.h. der Anteil von Neuprodukten zu Remanufacturing-Produkten, noch schwach ausgeprägt. 2015 betrug diese in Europa im Mittel lediglich 1,9 % (Parker & Riley et al. 2015, S. 42).

1.1 Motivation

Die Demontage von Gebrauchtprodukten stellt einen wichtigen Prozessschritt und Erfolgsfaktor im Remanufacturing dar (Liu & Liu et al. 2019, S. 4027). Heute übersteigen die hohen Demontagekosten jedoch häufig den rückgewonnenen Wert von aufgearbeiteten Produkten und verhindern die Aufarbeitung aus wirtschaftlicher Sicht (Duflou & Seliger et al. 2008, S. 585; Vongbunyong & Chen 2015, S. 9). Die geringe Effizienz der industriellen Demontage ist maßgeblich für die geringe Leistung von Remanufacturing-Systemen verantwortlich (Hrdina

¹ Diese werden im Remanufacturing auch als *Cores* bezeichnet (Sundin 2019, S. 41; DIN SPEC 91472 2023, S. 8)

& Zülch 2017, S. 325; Andersen & Brunoe et al. 2022, S. 7; Duflou & Seliger et al. 2008, S. 588 f.). So unterscheidet sich die Demontage aus technischer und prozessstruktureller Sicht maßgeblich von der linearen Montage (Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 719; Vongbunyong & Chen 2015, S. 10 f.). Aus dem probabilistischen Rücklauf von Gebrauchtpunkten resultiert eine große Variantenvielfalt bei kleinen Losgrößen und volatilen Stückzahlen (Guide 2000, S. 472). Die ungewissen Produktzustände der Gebrauchtpunkte führen zu schlecht vorhersehbaren, wechselhaften Demontageprozessen mit schwankender Prozessdauer und ungewissem Ausgang (Guide 2000, S. 476; Huber 2001, S. 47; Vongbunyong & Chen 2015, S. 10 f.). Eine deterministische Vorausplanung der Demontageabläufe ist nicht möglich (Huber 2001, S. 90; Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720). Produktionskapazitäten sind mangels Planbarkeit häufig über- oder unterdimensioniert (Andersen & Brunoe et al. 2022, S. 7 f.). Eine fehlende oder schlecht abgestimmte Planung führt zu einem hohen Maß an Verschwendung in der Demontage und im Remanufacturing (Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2014, S. 3230). Neben der Planungsebene inhäriert die Demontage auch auf prozesstechnischer Ebene einen erhöhten Flexibilitätsbedarf (Ullerich & Buscher 2013, S. 6210). Konventionelle Automatisierungslösungen sind dafür zu starr (Hrdina & Zülch 2017, S. 325 f.; Foo & Kara et al. 2022, S. 296; Laili & Li et al. 2021, S. 1). Bis heute dominiert daher manuelle Arbeit die Demontage, sowohl in der Prozessausführung als auch in der Prozessplanung (Inderfurth & Langella 2006; Ullerich 2014, S. 3; Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2014, S. 3231). Dies führt zu hohen operativen Kosten (Vongbunyong & Chen 2015, S. 6), weshalb insbesondere an Hochlohnstandorten hohe Personalkosten die Wettbewerbsfähigkeit der Refabrikation hemmen (Andersen & Brunoe et al. 2022, S. 7).

Es sind die benannten Unsicherheiten und Komplexitäten sowie die damit verbundenen hohen Kosten, die viele produzierende Unternehmen noch immer vom Einstieg in die Produktaufarbeitung abhalten und aktive Remanufacturing-Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Gleichzeitig existiert, angetrieben durch die Digitalisierung, eine Vielzahl von Ansätzen in Industrie und Forschung, die eine Effizienzsteigerung der Demontage und eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Remanufacturings anstreben. Diese befähigenden Trends haben meist gemeinsam, dass sie entweder auf die **Reduktion** und/oder die **Beherrschung** von **Unsicherheit** abzielen. Vier für diese Arbeit relevante Trends können wie folgt zusammengefasst werden:

1. **Flexible Automatisierung:** Autonome bzw. lernfähige Demontageroboter entlasten Demontagemitarbeiter und reduzieren gleichzeitig die Abhängigkeit vom Mensch. Sowohl durch das Lernen vom Menschen, als auch durch autonomes Lernen können die Robotersysteme auf unvorhergesehene Situationen, wie z.B. unbekannte Produktzustände reagieren. Sie leiten ihre Demontagestrategie selbstständig ab, sammeln wie

der Mensch Erfahrung und optimieren die eigenen Fähigkeiten (Foo & Kara et al. 2022, S. 297 ff.; World Economic Forum & Accenture Strategy 2019, S. 15; Vongbunyong & Vongseela et al. 2017, S. 282; Poschmann & Brüggemann et al. 2020, S. 10). Aus der Entwicklung adaptiv-robotischer Systeme, die für die Durchführung nicht-repetitiver Aufgaben befähigt sind, ergeben sich neue Möglichkeiten zur Automatisierung von Demontage- bzw. Remanufacturing-Prozessen (Sundin 2019, S. 42 f.).

2. **Mensch-Roboter Symbiose in hybriden Demontagesystemen:** Der Einsatz flexibler Automatisierungslösungen verspricht die Senkung der Demontagebetriebskosten (Vongbunyong & Chen 2015, S. 27). Der Mensch bleibt jedoch weiterhin die flexibelste und reaktionsfähigste Ressource in der Produktion und lässt sich in absehbarer Zeit nicht vollständig ersetzen (Vongbunyong & Chen 2015, S. 27; Parsa & Saadat 2021, S. 12). **Hybride Demontagesysteme**, welche die Fertigkeiten des Menschen mit der anhaltenden Leistungsfähigkeit und Eignung von Robotern für repetitive Aufgaben kombinieren, ermöglichen eine ökonomisch sinnvolle Demontage und gelten als Kompromisslösung mit den höchsten Erfolgchancen (Ciupek 2006, S. 69; Kim & Harms et al. 2007, S. 198; Foo & Kara et al. 2021, S. 168).
3. **Agile Produktionssysteme:** Demontagesysteme müssen hochflexibel sein, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen (Ciupek 2006, S. 9; Kim & Harms et al. 2007, S. 198). Analog zur Linearproduktion bieten modular aufgebaute rekonfigurierbare Produktionssysteme die Möglichkeit einer Leistungssteigerung im Demontagebetrieb (Andersen & Brunoe et al. 2022, S. 17). Konzepte wie das der Matrixproduktion (Greschke 2016) stellen Ausweich- und Ausgleichsmöglichkeiten im Fall von Engpässen und Störungen bereit, was aufgrund der Störanfälligkeit der roboterbasierten Demontage (Laili & Wang et al. 2022, S. 22) insbesondere im hybriden System von großem Vorteil ist (Kim & Harms et al. 2007, S. 198).
4. **Produktzentrierung und Transparenz:** Produktinformationen zu den Gebrauchsgütern spielen eine wichtige Rolle im Remanufacturing und in der Demontage. Die Sammlung und Speicherung von Produktdaten während des Nutzungszyklus, z.B. mittels digitalem Produktpass (World Business Council for Sustainable Development & Boston Consulting Group 2023), verbessert analog zur Produktbefundung das Produktverständnis. Außerdem ermöglicht sie die Ableitung relevanter Zustandsinformationen für Gebrauchskomponenten (Charnley & Tiwari et al. 2019, S. 13 f.; Kerin & Pham et al. 2022). Die Automatisierung der Produktbefundung (Nwankpa & Eze et al. 2021, S. 102; Khan & Mineo et al. 2021, S. 50 f.; Schlüter & Lickert et al. 2021, S. 302; Kaiser & Lang et al. 2022, S. 379) erhöht wiederum deren Effizienz und ermöglicht einen verstärkten Einsatz. Verfahren der künstlichen Intelligenz befähigen dabei zur Verarbeitung großer

Datensätze sowie zur Beherrschung der entstehenden Komplexität (Ellen MacArthur Foundation 2019, S. 31 f.). Mit gezielter Nutzung der Produktinformation ist ein differenzierter Umgang mit Gebrauchsgütern in der Produktionsplanung und -steuerung möglich (s. z.B. Ullerich & Buscher 2013; Colledani & Battaia 2016; Gallina & Gal et al. 2023). Die maßgeblich der Produktseite entstammende Unsicherheit kann effektiv reduziert werden. Fundiertere Planungsentscheidungen werden möglich und Effizienzsteigerungen rücken in greifbare Nähe (Colledani & Battaia 2016, S. 44; Charnley & Tiwari et al. 2019, S. 13 f.).

1.2 Problemstellung

Ansätze zur Automatisierung von Demontageprozessen gewinnen an technischer Reife und könnten sich in den nächsten Jahren, eingebettet in hybriden Systemen, in der Industrie etablieren (Poschmann & Brüggemann et al. 2020, S. 342; World Economic Forum & Accenture Strategy 2019, S. 15). Mit der prozesstechnischen Beherrschung flexibler Roboter in hybriden Demontagesystemen ergeben sich jedoch auch völlig neue Problemstellungen planerischer Art. Für einen wettbewerbsfähigen Betrieb stellt sich die Frage nach einer effizienten Organisation.

Im Rahmen dieser Arbeit stehen **Agile Hybride Demontagesysteme (AHDS)** im Fokus. Diese sind - in idealisierter Form - im höchsten Maße anpassungs- und reaktionsfähig und erlauben somit einen effizienten Betrieb unter Unsicherheit im Umgang mit Gebrauchsgütern im Remanufacturing (Lanza & Asfour et al. 2022). Inhärent umfasst das hier betrachtete AHDS die vier im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Trends. Abbildung 1.1 beschreibt das System mit seinen Kerneigenschaften. Charakteristisch für das System ist der modulare Aufbau (Trend 3) mit lose verketteten, taktfreien in Matrixstruktur angeordneten Stationen. Dieser Aufbau schafft Flexibilität im Materialfluss, erlaubt Produktdivergenz und ermöglicht eine individuelle Behandlung und Routenführung für alle Produkte. Störungen an einer Station können problemlos umfahren und Engpässe reduziert oder vermieden werden. Durch Rekonfiguration des Systems kann auf hoch-volatile Produktionsprogramme mittels funktionellen und mengenmäßigen Kapazitätsanpassungen reagiert werden. Das hybride System (Trend 2) vereint manuelle und automatisierte Demontageressourcen unterschiedlichen Typs:

1. **Manuelle Demontagestationen (MS):** Durch den Mensch geführte Demontage an manuellen Arbeitsplätzen, multifunktionell und analog zum Status Quo im Remanufacturing.
2. **Flexible Roboterstationen (FRS):** Entscheidungs- und Problemlösungskompetenz erlaubt den Betrieb von flexiblen Demontagerobotern unter Unsicherheit (Trend 1). Die

probabilistische Prozessausführung unterliegt einem **Scheiterrisiko** abhängig vom Produktzustand mit dem Mensch als Ausweichoption (Kim & Harms et al. 2007, S. 195).

- 3. **Automatisierte Stationen (AS)** mit starr-automatisierten Demontagevorrichtungen: Hohe Produktivität bei eingeschränktem Anwendungsspektrum und **deterministischer** Prozessausführung.

Anders als die in der Industrie oft aufzufindenden Einzelarbeitsplätze, zeichnet sich das betrachtete System durch Arbeitsteilung und einen auftragsbasierten Betrieb aus. Hierbei wird von einer durchgängigen Vernetzung der Shopfloor-Ebene sowie von Transparenz und Informationstransfer entlang der Rückwärtslogistik (Klenk 2023) ausgegangen (Trend 4). Sowohl vor als auch nach der Auftragsfreigabe stehen damit für jeden Auftrag demontage-relevante Zustandsinformationen zur Verfügung und können in der Planung, System- und Prozesssteuerung genutzt werden.

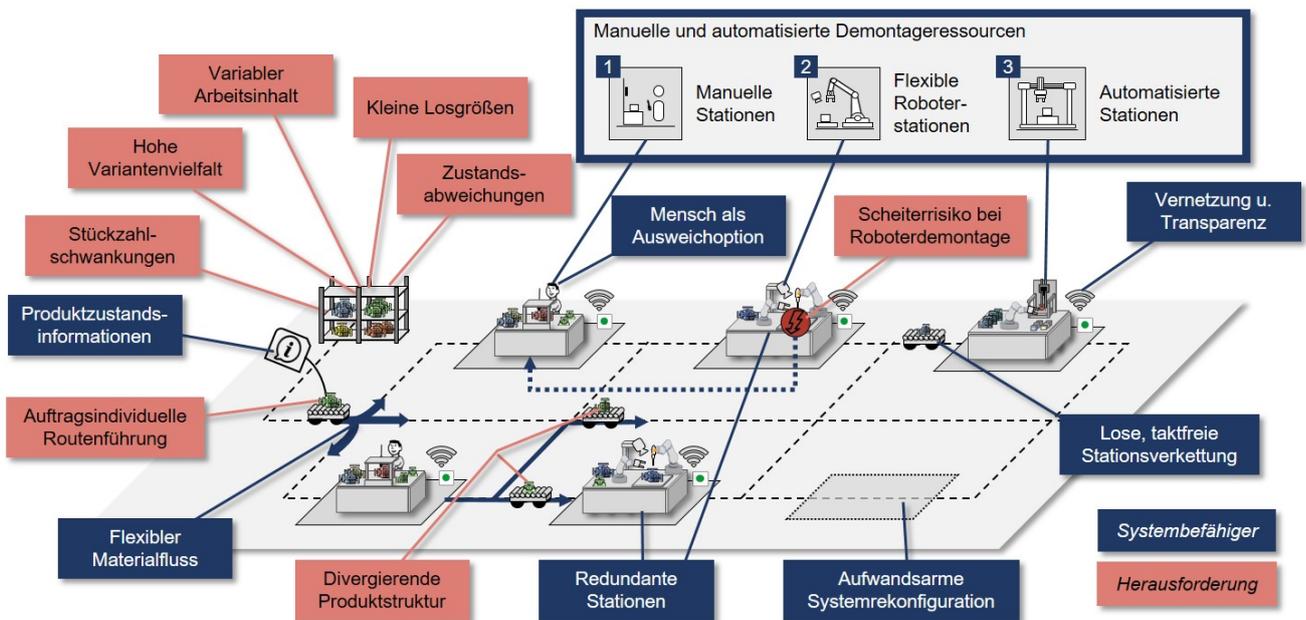


Abbildung 1.1: Eigenschaften **Agiler Hybrider Demontage-Systeme (AHDS)**

Aufgrund der Unsicherheit und Störanfälligkeit erfordert die Demontage grundsätzlich einen dynamisch-reaktiven Umgang mit Gebrauchsgüterprodukten (Hrdina & Zülch 2017, S. 317). In manuellen Systemen wird diese Dynamik bislang mittels großzügiger Planungspuffer sowie der menschlichen Problemlösungskompetenz gewährleistet. Effizienzeinbußen werden billigend in Kauf genommen. Mit der Integration robotischer und automatisierter Demotageressourcen kann ein solcher intuitiver Systembetrieb jedoch nicht mehr gewährleistet werden. Eine gezielte Arbeitsteilung hinsichtlich der Fähigkeiten und Stärken von Mensch und Roboter gewinnt an Bedeutung. Für einen leistungsoptimierten Systembetrieb bedarf es einer situativ-optimierten Aufgabenzuweisung unter Abwägung des Produktzustands, des Scheiterrisikos sowie der

freien Ressourcenkapazität. Das zu Grunde liegende Entscheidungsproblem tritt im AHDS dabei sowohl während des Systembetriebs als Teil der Routenführung als auch mittelfristig im Rahmen der Ressourcenauswahl und Rekonfiguration des Demontagesystems auf.

Die Realisierung eines effizienten, leistungsmaximierenden Systembetriebs, in dem die beschriebenen Freiheitsgrade des AHDS optimal für den Umgang mit der operativen Unsicherheit genutzt werden, stellt die Ablauforganisation vor eine große Herausforderung. Es bedarf geeigneter Verfahren, welche im dynamischen und komplexen Umfeld Entscheidungen sowohl schnell, informiert als auch mit der entsprechenden Voraussicht treffen.

1.3 Zielsetzung

Das ausgewiesene Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Untersuchung von Planungs- und Steuerungsverfahren für einen effizienten Einsatz agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing. Planung und Steuerung unterliegen hierbei disjunkten Handlungsfeldern und Zeithorizonten und werden separiert betrachtet². Als Voraussetzung für die Entwicklung der zwei Teilsysteme soll eine geeignete Repräsentation für Produkte, Ressourcen und Demontageprozesse entwickelt und in ein generisches und ausführbares Simulationsmodell für AHDS überführt werden. Durch die Berücksichtigung der charakteristischen Komplexitäten soll eine systematische Reduktion der operativen Unsicherheit herbeigeführt und somit ein performanter Systembetrieb ermöglicht werden.

Es ergeben sich die folgenden drei aufeinander aufbauenden **Teilziele** (vgl. Abbildung 1.2):

1. **Systemrepräsentation:** Modellierung des agilen hybriden Demontagesystems unter Berücksichtigung der charakteristischen Komplexität und Unsicherheit.
2. **Systembetrieb:** Entwicklung einer robusten und adaptiven Systemsteuerung.
3. **Systemadaption:** Entwicklung einer zustandsorientierten Kapazitätsplanung für die Systemauslegung und periodische Optimierung durch Systemrekonfiguration.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf industrietauglichen Verfahren, die für Unternehmen aus betriebsorganisatorischer Perspektive einen graduellen niederschweligen Einstieg in die hybride Demontage mit scheiteranfälligen flexiblen Roboterstationen und starr-automatisierten Stationen erlauben.

² Hierbei folgt diese Arbeit der auf Demontagesysteme bezogenen Definition nach Spur & Axmann et al. (1997, S. 21), wobei Demontageplanung beschrieben wird als die „Schaffung eines Systems mit dem erforderlichen Arbeitspotential“ und Demontagesteuerung als die „Koordination und Regelung des Ablaufes im Demontagesystem“.

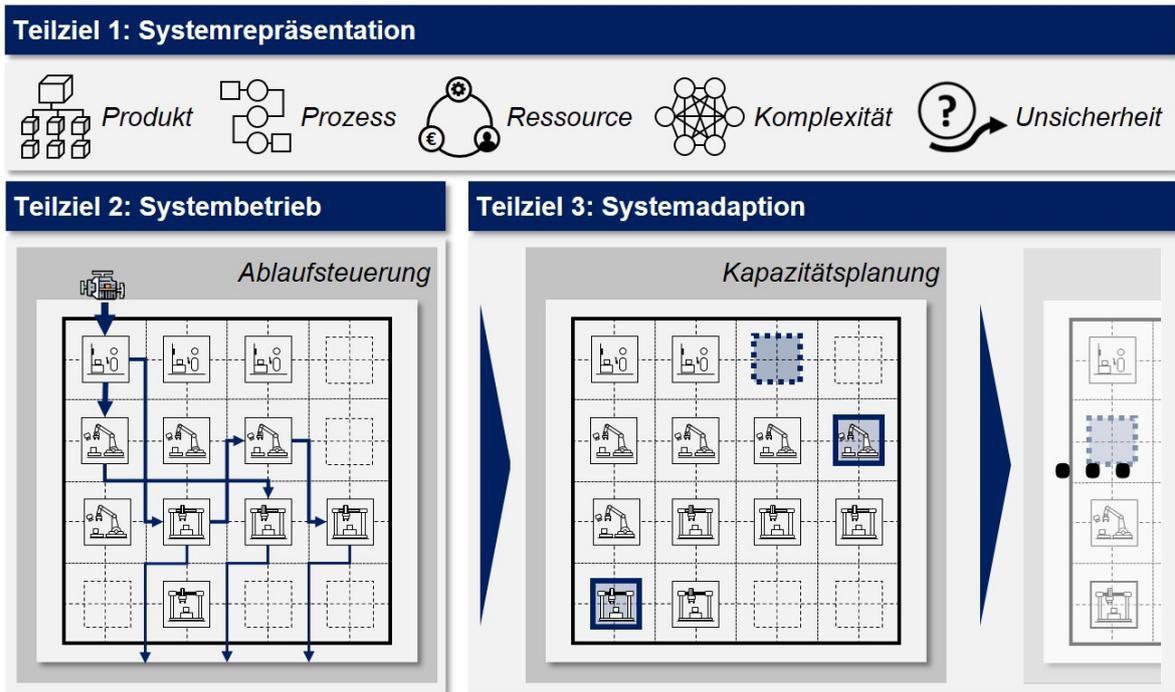


Abbildung 1.2: Überblick über die drei Teilziele der Forschungsarbeit

1.4 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit gelegt. Dabei werden insbesondere die domänenspezifischen Herausforderungen und Komplexitäten ausdetailliert. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Anforderungen an den Forschungsansatz aufgestellt und genutzt um den aktuellen Stand der Forschung zu durchleuchten. Anschließend wird das Forschungsdefizit abgeleitet und letztlich die Zielsetzung mit forschungsleitenden Fragestellungen konkretisiert. In Kapitel 4 wird der Lösungsansatz und das Zielsystem zunächst grob skizziert, bevor die Teilsysteme anschließend in Kapitel 5 ausgearbeitet werden. In Kapitel 6 erfolgt die simulationsbasierte Erprobung der Teilsysteme sowie eine Validierung anhand eines industriellen Anwendungsfalls. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die zuvor definierten Forschungsfragen und einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten in Kapitel 7 sowie einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

2 Grundlagen

Ziel dieses Kapitels ist die Vermittlung der für das Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen. Hierzu wird in Unterkapitel 2.1 zunächst die Produktionssystemplanung mit den für diese Arbeit relevanten Handlungsfeldern vorgestellt. In einem zweiten Schritt wird in Unterkapitel 2.2 das Remanufacturing als Methode der Kreislaufwirtschaft sowie die damit einhergehenden Herausforderungen beleuchtet. Dann werden in Unterkapitel 2.3 die Grundlagen für die Entwicklung hybrider Demontagesysteme vermittelt, wobei die Demontageplanung- und -steuerung (DPS) sowie der aktuelle Entwicklungsstand zur roboterbasierten Demontage berücksichtigt wird.

2.1 Produktionssystemplanung

In diesem Unterkapitel werden zunächst die relevanten Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) vermittelt. Nach einer kurzen Einordnung der PPS-Aufgaben werden die Kapazitätsterminierung, Auftragsfreigabe und Ablaufplanung genauer beleuchtet.

2.1.1 Handlungsfelder der Produktionsplanung und -steuerung

Der PPS obliegt die Aufgabe der effizienten Gestaltung des Produktionsablaufs (Hackstein 1989, S. 1). Gemäß dem ganzheitlichen *Aachener PPS-Modell* sind die Kernaufgaben der Produktionsplanung die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung, die Eigenfertigungsplanung und die Fremdbezugsplanung (Schuh 2006, S. 20). Die Aufgabenbeschreibung im Aachener-Modell erfolgt in abstrahierender allgemeingültiger Form (Schuh 2006, S. 11 f.). In Anlehnung an Hackstein (1989, S. 3 ff.) bringt Acker (2011) die Aufgaben der PPS wiederum in eine Reihenfolge und grenzt Planungs- und Steuerungsaufgaben voneinander ab. Diese spezifische Sicht von PPS-Systemen ist im Detaillierungsgrad für die vorliegende Arbeit besonders gut geeignet und wird daher im Folgenden genauer erläutert.

Acker (2011, S. 9 ff.) unterteilt (angelehnt an Hackstein 1989) das Vorgehen der PPS in sieben sukzessive Teilaufgaben, vgl. Abbildung 2.1. Vier der Aufgaben sind der Produktionsplanung zugeordnet. In der **Produktionsprogrammplanung** wird aufbauend auf Absatzprognosen und bereits eingegangenen Aufträgen, die Menge sowie der Zeitpunkt der zu produzierenden Produkte bestimmt. In der **Materialbedarfsplanung** werden dann, aufbauend auf den Stücklisten der zu produzierenden Produkte sowie ggf. bereits vorhandener Lagerbestände, die erforderlichen Komponentenbedarfe für die Durchführung der Fremdbezugs- bzw. Eigenfertigungsplanung abgeleitet. Als nächstes werden im Rahmen der **Durchlaufterminierung** die Start- und Endtermine der Aufträge bzw. Auftraglose festgelegt. Im Zuge dessen wird der Kapazitätsbedarf ermittelt. Bei Diskrepanzen wird im Rahmen einer Kapazitätsabstimmung



Abbildung 2.1: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (nach Acker 2011 in Anlehnung an Hackstein 1989)

entweder die Produktionskapazität angepasst oder es werden Produktionsaufträge zeitlich umverteilt. Diese **Kapazitätsterminierung** markiert die letzte Planungsaufgabe. Mit der **Auftragsfreigabe** beginnt die eigentliche Ausführung der Produktion und das Aufgabenfeld der Produktionssteuerung. In der **Ablaufplanung** wird die Reihenfolge der Auftragsabarbeitung sowie die Zuweisung auf die verschiedenen Produktiveinheiten der Produktion vorgenommen. Letztendlich wird der Fortschritt in der Produktion kontinuierlich überwacht (**Kontrolle des Auftragsfortschritts**), um im Falle von Abweichungen vom Sollzustand Maßnahmen einleiten zu können.

Die *Kapazitätsterminierung*, *Auftragsfreigabe* sowie die *Ablaufplanung* (jeweils hervorgehoben in Abbildung 2.1) sind von besonderer Relevanz für Systembetrieb und -adaption und stehen in dieser Arbeit im Fokus. Es folgt entsprechend eine detaillierte Ausführung. Die Durchlaufterminierung der Aufträge wird in dieser Arbeit als gegeben und nicht beeinflussbar angenommen.

2.1.2 Kapazitätsterminierung

Die Kapazität beschreibt das Leistungsvermögen einer wirtschaftlichen oder technischen Einheit innerhalb einer bestimmten Zeitperiode. Es wird die qualitative von der quantitativen Kapazität unterschieden. Die qualitative Kapazität beschreibt die Art und Güte des Leistungsvermögens (*Welche Produkte können verarbeitet werden?*). Die quantitative Kapazität beschreibt wiederum das mengenmäßige Leistungsvermögen (*Wieviele Produkte können verarbeitet werden?*). (Müller 2013, S. 266)

Bereits in der Produktionsprogrammplanung wird über den geforderten Plan-Abgang eines Produktionssystems der erforderliche Kapazitätsbedarf festgelegt (Lödding 2016, S. 109). Im

Rahmen der Kapazitätsbedarfsrechnung, alternativ auch Belastungsrechnung (Wiendahl & Begemann et al. 2018, S. 145), wird für eine Planungsperiode der Kapazitätsbedarf je Ressource ermittelt. Hierzu wird für jeden Produktionsauftrag der je Mengeneinheit verursachte ressourcenspezifische Kapazitätsbedarf ermittelt und mit der Stückzahl multipliziert (Lödding 2016, S. 112). Der Kapazitätsbedarf je Einheit je Verrichtungsschritt wird in sogenannten Kapazitätslisten geführt. Diese basieren auf bestehenden erzeugnisspezifischen Erfahrungsbzw. Messwerten. Falls diese nicht vorhanden sind, können auch Referenzwerte vergleichbarer Produkte herangezogen werden (Lödding 2016, S. 109). Der Gesamtkapazitätsbedarf je Ressource für eine Periode, auch Kapazitätsbedarfplan genannt (Schuh 2006, S. 48), ergibt sich aus der Summe der auftragsspezifischen Ressourcenkapazitäten.

Weicht der Kapazitätsbedarf vom Kapazitätsangebot ab, sind Anpassungen vorzunehmen. Dies ist Aufgabe der *Kapazitätsabstimmung*, wobei entweder die Auftragslast an die Systemkapazität (Kapazitätsanpassung) oder die Systemkapazität an die Auftragslast (Kapazitätsabgleich) angeglichen werden kann (Schuh 2006, S. 48; Lödding 2016, S. 112 f.). Im ersten Fall werden Aufträge in nachfolgende Planungsperioden verschoben oder vorgezogen. Alternativ können Aufträge an Fremdfirmen ausgelagert werden. In schwerwiegenden Fällen kann auch das Produktionsprogramm geändert werden. Wird generell die Auftragslast modifiziert, spricht man von einer Ausnutzung der Belastungsflexibilität (Lödding 2016, S. 112). Demgegenüber steht als zweite Option die Ausnutzung der Kapazitätsflexibilität. Diese beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, seine Kapazitäten schnell und kostengünstig sowie in möglichst großem Ausmaß verändern zu können (Lödding 2016, S. 537). Lödding (2016, S. 539 ff.) nennt und unterteilt dabei:

1. Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel¹

- Veränderung der Anzahl der Betriebsmittel
- Veränderung der Betriebsmittelintensität
- Fremdvergabe von Arbeitsvorgängen
- Verschieben von Wartungsarbeiten
- Verlagerung von alternativen Betriebsmitteln

¹ In dieser Arbeit wird zusammenfassend insbesondere der Begriff Ressource, kurz für Produktions- oder Demontageressource, verwendet unter dem im weiteren Sinne sowohl die Mitarbeiter als auch die Betriebsmittel zusammengefasst werden.

2. Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter:

- Arbeitszeitflexibilität
- Flexibilität in der Arbeitsgeschwindigkeit
- Einstellung und Entlassung von Mitarbeitern
- Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern.

Die Kapazitätsflexibilität beschreibt den Umfang, in dem Produktionssysteme ihre Kapazität anpassen können. Das Ausmaß und die Reaktionszeit für Anpassungen müssen dabei in der Kapazitätsabstimmung berücksichtigt werden. Sogenannte Kapazitätshüllkurven verbildlichen die Kapazitätsflexibilität eines Produktionssystems, vgl. Abbildung 2.2.

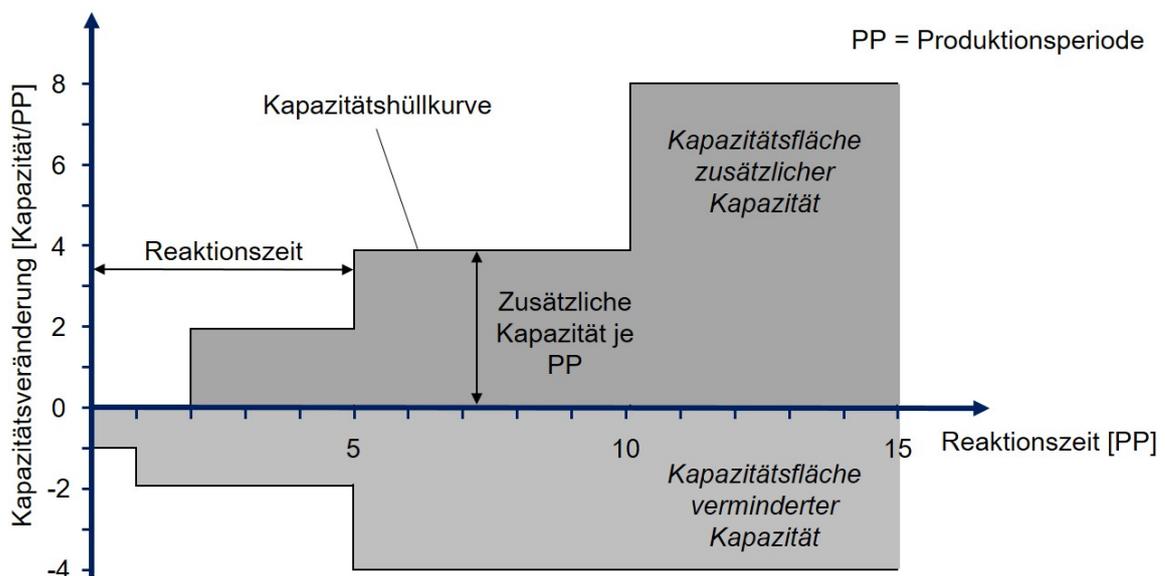


Abbildung 2.2: Kapazitätshüllkurven zur Verdeutlichung der zeitlichen und mengenmäßigen Kapazitätsflexibilität (eigene Darstellung in Anlehnung an Breithaupt 2001, S. 77)

Lödding (2016, S. 531) grenzt die Kapazitätsplanung - die Vorausermittlung einer Systemkapazität basierend auf einem vorgegebenen Produktionsprogramm - von der Kapazitätssteuerung - die kurzfristige Entscheidung über den tatsächlichen Einsatz der Ressourcen - ab. Im Rahmen dieser Arbeit verschimmt damit das Einsatzfeld der Kapazitätsterminierung. Trotz prädiktiv-reaktiven Charakters baut das Handlungsfeld in erster Linie auf einem vorgegebenen Produktionsprogramm auf. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird daher ausschließlich der Begriff **Kapazitätsplanung** verwendet.

2.1.3 Auftragsfreigabe

Nach Lödding (2016) bestimmt die Auftragsfreigabe den Zugang zur Produktion. Das Hauptziel dabei ist die Regelung der Systembelastung durch Beschleunigung oder Verzögerung von Aufträgen, wobei der Umlaufbestand, die Auftragsdurchlaufzeiten sowie die Auslastung der Ressourcen im System beeinflusst wird. Typische Auftragsfreigabeverfahren sind exemplarisch die *Terminbasierte Auftragsfreigabe*, die *Belastungsorientierte Auftragsfreigabe*, die *Conwip*- oder die *Polca-Auftragsfreigabe*. (Lödding 2016, S. 15).

2.1.4 Ablaufplanung

Der Begriff der Ablaufplanung wird in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet. Der Aufgabenumfang variiert nach Definition verschiedener Autoren. Acker (2011, S. 11) verwendet den Begriff analog zur Maschinenbelegungsplanung, wobei zu bestimmen ist, wann welcher Auftrag auf welcher Maschine bearbeitet werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit werden nicht explizit Maschinen, sondern Stationen bzw. allgemeiner Ressourcen allokiert. Die begrifflichen Alternativen Ressourcen- oder Stationsbelegungsplanung bzw. kurz Ressourcen- und Stationsallokation sind entsprechend besser geeignet und werden nachfolgend genutzt.

Die Ablaufplanung kann nach Zelewski & Hohmann et al. (2008, S. 429 ff.) zitiert nach Acker (2011, S. 12) in drei Teilaufgaben unterteilt werden:

- **Bearbeitungsplanung:** Hier wird die Bearbeitungsreihenfolge der individuellen Verrichtungsschritte in Abhängigkeit von den technologisch vorgegebenen Relationsbeziehungen eines Erzeugnisses festgelegt. Je nach Anwendungsfall erfolgt außerdem die Zuordnung zu einer Station. Damit resultiert die *Stationsfolge* für jeden Auftrag aus der Bearbeitungsplanung.
- **Reihenfolgeplanung:** Hier wird die *Auftragsfolge*, d.h. die Reihenfolge, in der die Aufträge die einzelnen Stationen ablaufen, festgelegt.
- **Terminplanung:** In der Terminplanung werden den Operationen, die in den vorherigen Schritten definiert wurden, im Rahmen einer Feinterminierung (engl. Scheduling) Start- und Endzeitpunkte auf den Stationen zugewiesen.

Häufig können die Begriffe der Planung und Steuerung nicht präzise getrennt werden. Insbesondere in agilen Produktionssystemen verschwimmen Planung und Steuerung zunehmend (Göppert & Schukat et al. 2021, S. 5). In der vorliegenden Arbeit ist das Aufgabenfeld der Ablaufplanung jedoch eindeutig nach der Auftragsfreigabe verortet. Folgend wird daher der Begriff **Ablaufsteuerung** verwendet.

2.1.5 Lösungsverfahren der Produktionsplanung und -steuerung

Aus den Handlungsfeldern der Produktionsplanung und -steuerung gehen jeweils individuelle Entscheidungsprobleme hervor. Für die Entscheidungsfindung oder die Entscheidungsunterstützung kommen dabei quantitative Lösungsverfahren zum Einsatz. Hierbei existiert eine Vielzahl verschiedener Verfahren, deren individuelle Eignung vom PPS-Handlungsfeld, der Domäne und dem generellen Anforderungsprofil abhängt.

Exemplarisch für die Ablaufsteuerung, aber auch mit Gültigkeit für andere Handlungsfelder, unterteilt Acker (2011, S. 92) in exakte und heuristische Verfahren.

Bei **exakten Verfahren** handelt es sich um sogenannte Enumerationsverfahren. Sie ermöglichen die Erstellung optimaler Belegungspläne. Sie kommen vorrangig im Scheduling zum Einsatz, sind hier aufgrund des exponentiell wachsenden Rechenaufwands jedoch auf kleine Probleminstanzen beschränkt. Des Weiteren ist eine Lösungsevaluation erforderlich, die nur anhand vollständiger Ablaufpläne effektiv erfolgen kann.

Heuristische Verfahren treffen regelbasierte nicht willkürliche Entscheidungen ohne die Möglichkeit eines Konvergenzbeweises (Streim 1975, S. 149). Insbesondere problemspezifische Heuristiken ermöglichen so die Ermittlung von sehr guten bis optimalen Lösungen in vertretbarer Zeit (Acker 2011, S. 103). Im Rahmen der Ablaufsteuerung kann außerdem die Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden. Der Nachteil problemspezifischer Heuristiken ist die mangelnde Anpassungsfähigkeit bei sich ändernden Anforderungen. Das Gegenstück zur problemspezifischen Heuristik stellen die neutralen universell einsetzbaren **Metaheuristiken** dar, welche mithilfe allgemeingültiger Lösungsprinzipien theoretisch auf beliebige Problemstellungen angewandt werden können (Acker 2011, S. 110).

Als dritte Verfahrensklassen rückt mit ansteigender Rechenleistung und Datenverfügbarkeit die Klasse der **lernenden Verfahren** in den Fokus (Kuhnle 2020, S. 21), wie z.B. das Reinforcement Learning (Sutton & Barto 2020). Entscheidungsagenten erhalten hier ein Feedback für ihre Entscheidungen, durch das sie sich und die Güte der eigenen Entscheidungen kontinuierlich verbessern. Lernverfahren können damit ggf. besser generalisieren als z.B. statische regelbasierte Verfahren. Es muss jedoch ein Lernprozess in Kauf genommen werden. Dieser kann fehlschlagen.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus insbesondere auf industrietauglichen heuristischen bzw. metaheuristischen Verfahren. Für die Kapazitätsplanung kommt ergänzend ein exaktes Optimierungsverfahren zum Einsatz.

2.2 Grundlagen des Remanufacturings

Das Ziel dieses Unterkapitels ist eine Einführung in die Grundlagen des Remanufacturings. Zunächst erfolgt eine Abgrenzung von anderen Methoden der Kreislaufwirtschaft sowie eine Auseinandersetzung mit den Treibern. Nach der Darlegung der charakteristischen Herausforderungen und der spezifischen Prozessschritte schließt dieses Unterkapitel mit einem Branchenüberblick sowie den typischen Akteuren im Automobil-Sektor.

2.2.1 Abgrenzung und Treiber

Auf Deutsch wird das Remanufacturing auch als Instandsetzung, Serieninstandsetzung oder Refabrikation bezeichnet (Parker & Riley et al. 2015, S. 9). Die *Automotive Parts Remanufacturing Association* (APRA) sowie weitere Vereinigungen im Automobil-Umfeld² definieren das Remanufacturing als den Prozess der industriellen, standardisierten Serieninstandsetzung von Gebrauchtsprodukten zu Erzeugnissen mit dem Qualitätsversprechen von Neuprodukten³.

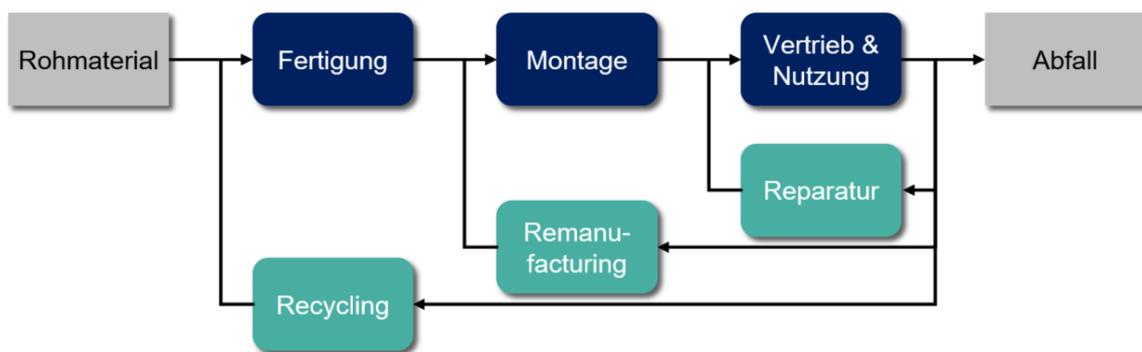


Abbildung 2.3: Methoden der Kreislaufwirtschaft und Abgrenzung des Remanufacturings (in Anlehnung an Parker & Riley et al. 2015, S. 11 und King & Burgess et al. 2006, S. 260)

Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Abgrenzung des Remanufacturings von anderen Methoden der Kreislaufwirtschaft. Gebrauchtsprodukte werden dazu demontiert, um die Komponenten anschließend einem Aufarbeitungsprozess⁴ oder Austauschprozess zu unterziehen. Anders als beim Recycling bleibt dabei die ursprüngliche Form der Einzelkomponenten, aus

² <https://clepa.eu/mediaroom/remanufacturing-associations-agree-international-industry-definition/>

³ Die DIN SPEC 91472 hält fest: „Das Produkt eines Remanufacturing-Prozesses ist ein Neuprodukt“ (DIN SPEC 91472 2023, S. 11).

⁴ Nach der VDI-Richtlinie 2243 ist die Aufarbeitung definiert als: „Behandlung zur Verwendung, in der Regel fertigungstechnisch“. Damit ist die Aufarbeitung nicht zu verwechseln mit der Aufbereitung. Diese ist wiederum definiert als die „Behandlung zur Verwertung, in der Regel prozesstechnisch“. (VDI 2243 2002)

welchen sich das aufgearbeitete Produkt zusammensetzt sowie die für den Urform- und Verarbeitungsprozess aufgewendete Wertschöpfung und Energie erhalten. Durch die Aufarbeitung aller Komponenten in einen Wie-Neu-Zustand, inklusive kosmetischer Operationen, grenzt sich das Remanufacturing andererseits von der rein fehlerorientierten Reparatur ab (Guide 2000, S. 468). Aufgrund der größtmöglichen Erhaltung der in die Neuproduktion geflossenen Mittel sowie der hohen Qualität der aufgearbeiteten Produkte, gilt das Remanufacturing als Schlüsselstrategie für die Kreislaufwirtschaft (Parker & Riley et al. 2015, S. 11).

Basierend auf Befragungen von Remanufacturing-Unternehmen unterteilt Östlin (2008) die Treiber für das Remanufacturing in drei Gruppen:

- **Profit:** Remanufacturing-Produkte bieten aufgrund des geringeren Kosteneinsatzes einen Kostenvorteil gegenüber Neuprodukten für Hersteller und Kunden. Sie ermöglichen neue Geschäftsmodelle und den Eintritt in neue Marktsegmente. Außerdem ermöglicht das Remanufacturing, insbesondere bei kleinen Stückzahlen, eine wirtschaftlichere Bereitstellung von Ersatzteilen und die damit häufig verbundene Erfüllung bestehender Lieferverpflichtungen. (Östlin 2008, S. 61 ff.)
- **Unternehmensstrategie:** Unter diesen Punkt fallen Aspekte, die keinen unmittelbaren Profit abwerfen, sondern den Stand eines Unternehmens langfristig stärken. So ist es in manchen Fällen erstrebenswert für OEMs, Gebrauchtsprodukte im Aftermarket aufzukaufen, um unabhängigen Wettbewerbern den Zugang zum Markt zu erschweren. Damit einher geht auch der Schutz der eigenen Marke durch Prävention einer unsachgemäßen Aufarbeitung sowie der Verbreitung mangelhafter Remanufacturing-Erzeugnisse. Des Weiteren liefern Produktrückläufer Informationen über die Langzeitleistung sowie potentielle Ausfallursachen eines Produkts und damit wertvolles Feedback für die Produktentwicklung und die Verbesserung zukünftiger Produktgenerationen. (Östlin 2008, S. 63 ff.)
- **Umweltaspekte:** Für viele Produkte ist die Verlängerung des Lebenszyklus aus Umweltaspekten sinnvoll. Politische Institutionen verschiedener Ebenen, z.B. die Europäische Union, fördern durch entsprechende Gesetzgebungen zirkuläre Methoden wie das Remanufacturing bzw. stellen erhöhte Auflagen an den Umgang mit Gebrauchtsprodukten wie z.B. für Elektro- und Elektronikaltgeräte. Die Wettbewerbsfähigkeit verschiebt sich zugunsten zirkulärer Methoden. Nicht zuletzt ergibt sich für Unternehmen die Möglichkeit durch Remanufacturing ein nachhaltiges „grünes“ Image aufzubauen und zu pflegen. (Östlin 2008, S. 65 ff.)

Mit zunehmender Relevanz auf landespolitischer Ebene in Zeiten globaler Krisen und Spannungen (z.B. Ukraine-Krieg, Covid-19-Pandemie, China-Konflikt) stellt **Unabhängigkeit** einen

weiteren ergänzenden Treiber dar. So reduzieren Unternehmen durch Remanufacturing den Bedarf nach Rohmaterialien und Bauteilen sowie die damit verbundene Abhängigkeit von Zulieferunternehmen und -ländern (Prendeville & Bocken 2017, S. 269; Lange 2017, S. 9; Paul & Thevenin et al. 2021, S. 789).

2.2.2 Charakteristische Herausforderungen

Das Remanufacturing ist von Unsicherheit und einer Reihe charakteristischer Komplexitäten geprägt, welche in der Produktion von Neuprodukten nicht im gleichen Maße auftreten. Einige der Charakteristiken wurden bereits implizit genannt. Guide (2000, S. 469) fasst die Komplexitäten wie folgt zusammen:

1. Unsicherheit über Zeitpunkt und Anzahl der Produktrückläufer
2. Bedarf nach einem Ausgleich von Rückläuferangebot und Nachfrage
3. **Erfordernis der Produktdemontage**
4. Unsicherheit über die Regenerationsfähigkeit individueller Komponenten
5. Erfordernis eines Rückwärtslogistik-Netzwerks
6. Abstimmungsbedarf durch Material/-Komponentenbindung⁵
7. Unsicherheit durch stochastische Routenführungen und Prozesszeiten

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Kern mit Komplexität Nr. 3, der Demontage. Des Weiteren finden Nr. 1, Nr. 2, Nr. 5 und Nr. 7 im weiteren Verlauf Berücksichtigung. Die Komplexitäten Nr. 4 und 6 stehen nicht im Fokus dieser Arbeit.

2.2.3 Charakteristische Prozesskette

Das Remanufacturing zeichnet sich durch eine Reihe charakteristischer meist standardisierter Prozesse aus. In Anlehnung an Sundin (2004, S. 61) sind die generischen Prozessschritte die *Inspektion, Demontage, Reinigung, Lagerung, Komponentenaufarbeitung, Remontage* und *Endprüfung*. Parker & Riley et al. (2015, S. 5) ergänzen die *Dokumentation* und *Sammlung* der Gebrauchtprodukte und unterscheiden zusätzlich die *Komponentenaufarbeitung* vom *Komponentenaustausch*. Die Sequenz ist abhängig vom aufzuarbeiteten Produkt. In verschiedenen Branchen und Remanufacturing-Unternehmen sind daher meist auch unterschiedlich ausgeprägte Prozessketten zu finden (Sundin 2004, S. 59; Lange 2017, S. 45 ff.).

Im Rahmen dieser Arbeit steht das Remanufacturing von Gebrauchtprodukten der Automobilzuliefererindustrie im Fokus. Die Serieninstandsetzung hat hier eine lange Historie und stellt

⁵ Die in manchen Branchen übliche Kundenforderung nach einer 1-zu-1-Rückgabe desselben Altprodukts nach der Aufarbeitung inklusive seiner Komponenten resultiert in einem erhöhten Koordinationsaufwand bei meist kurzen Soll-Durchlaufzeiten.

auch heute noch einen der bedeutendsten und umsatzstärksten Remanufacturing-Sektoren in der EU dar (Steinhilper 2001, S. 485; Parker & Riley et al. 2015, S. 1). Abbildung 2.4 zeigt eine typische Prozesskette im Remanufacturing. Diese orientiert sich an der Aufarbeitung der etablierten Remanufacturing-Produkte Anlassermotor und Lichtmaschine (Matsumoto & Chinen et al. 2017a, S. 967). Zwischen allen Prozessschritten erfolgt in der Regel eine Entkopplung durch Lagerung oder Zwischenpufferung der Gebrauchtsprodukte und Komponenten. Das Lager- und Entkopplungskonzept ist jedoch meist individuell für jeden Anwendungsfall und wird in Abbildung 2.4 vernachlässigt. Die einzelnen Schritte, welche die Gebrauchtsprodukte durchlaufen, werden nachfolgend genauer charakterisiert:

1. **Sammlung:** Hierunter fallen alle logistischen Prozesse, welche die systematische Rückführung der Gebrauchtsprodukte zum Remanufacturer zum Ziel haben. Abhängig vom Aufbau der Rückwärtslogistikkette sind verschiedenste Akteure beteiligt (vgl. Abschnitt 2.2.4).
2. **Inspektion:** In diesem Prozessschritt wird der Zustand von Produkt und Produktkomponenten erfasst. Eine eindeutige allgemeingültige Verortung der Inspektion ist nur schwer vorzunehmen. Meist wird nicht nur einmal inspiziert (Andrew-Munot & Ibrahim 2013, S. 490 f.). Die Inspektion ist stattdessen oft ein wiederkehrender Prozess mit unterschiedlichem Fokus und Detaillierungsgrad, wobei z.B. die Produkt- von der Komponenteninspektion unterschieden werden kann (Errington & Childe 2013, S. 11).

Die **Produktinspektion** findet vor der Demontage statt. Das Ziel ist dabei die Klassifikation der Gebrauchtsprodukte nach der Eignung für die Wiederverwendung, Remanufacturing, Recycling oder Entsorgung. Dieser Schritt wird daher auch **Sortierung** genannt (Priyono & Ijomah et al. 2016, S. 900). Die Klassifikation nach Eignung für das Remanufacturing erfolgt oft anhand sogenannter Akzeptanzkriterien, die vom Remanufacturing-Betrieb ausgegeben werden⁶. Vereinzelt finden bereits sogenannte **Qualitätsklassensysteme** Anwendung, welche eine zustandsspezifische Unterteilung der Gebrauchtsprodukte ermöglichen. Unterteilt wird dabei z.B. nach Abnutzungsgrad und Remanufacturing-Aufwand (van Wassenhove & Zikopoulos 2010, S. 5268 f.). Der Vorgang der Produktklassifikation wird auch **Quality Grading** bzw. **Grading** genannt (Ferguson & Guide et al. 2009; van Wassenhove & Zikopoulos 2010, S. 5264 f.). Generell ist die Sortierung von Gebrauchtsprodukten eine wichtige Maßnahme, um die Unsicherheit im Remanufacturing zu reduzieren (Priyono & Ijomah et al. 2016, S. 911)⁷.

⁶ Unstrittig ist der Einfluss, den der Produktzustand auf die Prozesse der Demontage hat (Ridley & Ijomah 2015, S. 2). Eine umfangreiche, im Automobilsektor durchgeführte Studie, weist z.B. die Korrelation zwischen dem Umfang der Inspektion sowie der damit einhergehenden Produktzustandskenntnis und abnehmenden Prozesszeiten für die nachgelagerten Prozessschritte in manuellen Systemen nach (Ridley & Ijomah 2015).

Eine vollständige bzw. effektive **Komponenteninspektion** kann erst nach erfolgreicher Demontage und Reinigung erfolgen. Dabei wird abschließend die Tauglichkeit der Komponenten für die Wiederverwendung festgelegt und ggf. die Art des individuellen Aufarbeitungsprozesses spezifiziert.

3. **Demontage:** In der Demontage werden die Gebrauchtprodukte systematisch in Komponenten und Einzelteile zerlegt. Sie steht im Fokus dieser Arbeit und wird in Unterkapitel 2.3 gesondert betrachtet.
4. **Reinigung:** Die Reinigung der Gebrauchtprodukte erfolgt in der Regel nach Demontage auf Komponentenebene. Hierzu werden die Komponenten nach geometrischen Eigenschaften und Art der Verschmutzung sortiert und dann meist chargenweise in mechanischen und chemischen Prozessen gereinigt. Anders als bei der Reparatur erfolgt im Remanufacturing eine Komplettreinigung aller Oberflächen, um geforderte Qualitätskriterien zu erfüllen (Liu & Zhang et al. 2013, S. 644). Das Reinigen wird dem Fertigungsverfahren Trennen zugeordnet (DIN 8580 2022) und ist in allgemeiner Form in der DIN-Norm 8592 definiert (DIN 8591 2003).
5. **Aufarbeitung / Austausch:** Das Ziel der Aufarbeitung ist die Wiederherstellung der ursprünglichen Komponentenspezifikation. Besonders im Fokus steht die Reduktion von Defekten sowie potentieller verschleißfördernder Merkmale, welche die Produktfunktion einschränken oder bedrohen. Die Aufarbeitungsprozesse lassen sich unterteilen in additive, subtraktive sowie veredelnde Prozesse der Oberflächenbearbeitung, Prozesse zur Manipulation der Materialeigenschaften oder Prozesse zur Manipulation von Verbindungselementen (Kin & Ong et al. 2014, S. 190 f.).
6. **Remontage und Endprüfung:** Die Remontage und Endprüfung unterscheiden sich nicht maßgeblich vom analogen Prozess in der Neuproduktion. In manchen Fällen, z.B. bei hoher Komponentenaustauschrate, erfolgt die Remontage und Endprüfung in Symbiose mit Neuprodukten in der Originalteil-Montagelinie.

2.2.4 Branchenüberblick

Das Remanufacturing eignet sich insbesondere für kapitalintensive, werthaltige Produkte mit langen Produktlebenszyklen (Parker & Riley et al. 2015, S. 6; Yang & M. R. et al. 2018, S. 2).

⁷ Für die Ermittlung der Produktzustände werden dabei nicht nur Inspektionsdaten sondern auch Lebenszyklusdaten ausgewertet. In diesem Zuge präsentieren Raihanian Mashhadi & Behdad (2017) einen Ansatz zur Bestimmung der Qualitätsklasse für Computersysteme basierend auf Daten aus der Produktnutzungsphase. Ein weiteres Teilgebiet der Inspektionsplanung stellt die Automatisierung der Sortier-, Grading- und Inspektionsprozessen dar (Schlüter & Lickert et al. 2021; Nwankpa & Ijomah et al. 2021; Kaiser & Lang et al. 2022), die in Fusion mit den Ergebnissen der Lebenszyklusdatenauswertung eine Steigerung von Effektivität und Effizienz in der Produktbefundung bewirken.

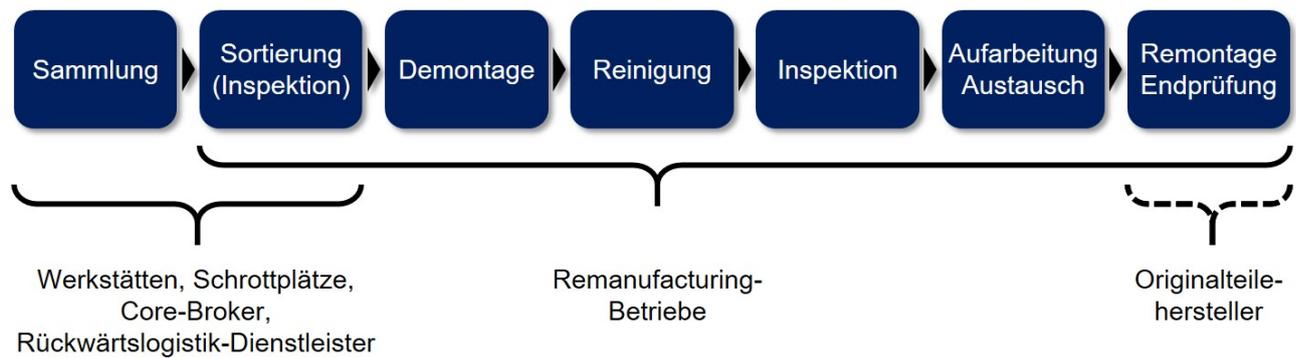


Abbildung 2.4: Charakteristische Prozesskette und Akteure im Remanufacturing in der Automobilindustrie (angelehnt an Matsumoto & Ijomah 2013, S. 397 ff.)

Ob das Remanufacturing jedoch umsetzbar, ökonomisch sinnvoll und erfolgreich ist, hängt von verschiedenen weiteren Faktoren ab. Zu erfüllende Bedingungen in Anlehnung an Yang & M. R. et al. 2018, S. 2 und Andreu 1995 zitiert nach Matsumoto & Ijomah 2013, S. 394 sind:

- **Verfügbarkeit:** Gebrauchte Produkte sind nach ihrem Nutzungszyklus verfügbar und können rückgeführt werden.
- **Technologische Reife:** Es existieren Technologien für die Inspektion, Demontage und Aufarbeitung der Gebrauchte Produkte.
- **Know-How im Unternehmen:** Das Remanufacturing-Unternehmen verfügt über ausreichend prozesstechnische Expertise.
- **Technologiezyklen:** Die Länge der technologischen Innovationszyklen ist größer als der Nutzungszyklus der Produkte.
- **Gesetzesvorgaben:** Die Gesetzeslage und sonstige externe Rahmenbedingungen lassen ein Remanufacturing zu.

Branchen, in denen das Remanufacturing bereits etabliert ist, sind neben der Automobilindustrie z.B. die Luftfahrt, die Schwerlast- und Nutzfahrzeugindustrie, elektrische und elektronische Geräte oder die Möbelindustrie (Tolio & Bernard et al. 2017, S. 587). In Bereichen wie der Elektromobilität, konkret dem Ersatzteilmarkt für Elektroautos, erwarten Experten in den kommenden Jahren zudem ein starkes Nachfragewachstum nach Remanufacturing-Komponenten (Casper & Sundin 2021, S. 131).

2.2.5 Akteure im Remanufacturing von Automobilkomponenten

Den wichtigsten Kernakteur und das Zentrum der direkten Wertschöpfung stellen die **Remanufacturing-Betriebe** dar. Diese können unterteilt werden in (1) OER (Original Equip-

ment Remanufacturer), das sind OEM (Original Equipment Manufacturer) welche die Refabrikation der eigenen Produkte selbst durchführen, (2) Vertrags-Remanufacturer mit direkter Beauftragung durch die OEM und (3) unabhängige Remanufacturer (Parker & Riley et al. 2015, S. 30; Kalverkamp & Raabe 2018, S. 119 ff.). In einer Studie von 2015 mit 206 befragten Unternehmen durch Parker & Riley et al. (2015) gaben 36 % der Unternehmen an, selbst OER zu sein (Parker & Riley et al. 2015, S. 30 ff.). Mit 46 % waren fast die Hälfte unabhängige Remanufacturer und lediglich 4 % waren direkt beauftragte Dienstleister. Die Verfügbarkeit der Gebrauchtpunkte ist heute meist beschränkt. In Branchen wie der Automobilindustrie konkurrieren häufig verschiedene Remanufacturing-Betriebe um dieselben Gebrauchtpunkte (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 123 f.). An dieser Stelle spielt die **Rückwärtslogistik** sowie die Beziehung zwischen Kunde und Remanufacturer eine wichtige Rolle (Östlin 2008, S. 81). Je enger die Kundenbeziehung ist, desto einfacher gestaltet sich auch die Rückführung. Liegt keine direkte Kundenbeziehung vor, wie dies häufig in der Automobilindustrie zwischen Automobilzulieferer und Fahrzeughalter der Fall ist, gestaltet sich die Akquise der Gebrauchtpunkte schwieriger. Fahrzeugkomponenten werden hier in der Regel in **Werkstätten** oder auf **Schrottplätzen** ausgebaut. Liegen keine direkten Rückführverträge vor, kommen häufig spezialisierte Zwischenhändler, sogenannte **Core-Broker** bzw. **Core-Händler** ins Spiel, welche die Gebrauchtpunkte aufkaufen und gebündelt an die Remanufacturer weiterverkaufen (Kalverkamp & Raabe 2018, S. 150 f.). Diese sogenannte Rückkauf-Beziehung ist die am weitesten verbreitete Variante im Automobilsektor (Östlin 2008, S. 88).

Neben erhöhten Rückkaufpreisen stellt oft der Informationsverlust beim Ausbau von Automobilkomponenten in Werkstätten ein Problem dar. Daher kommt der Sortierung (s. Abschnitt 2.2.3) eine wichtige Rolle zu. Sie wird in manchen Fällen direkt vom Remanufacturer durchgeführt. In anderen Fällen erfolgt sie schon vorab in sogenannten **Sortierzentren** noch vor Übergabe an den Remanufacturer, wodurch sich die Planungsgrundlage für die Demontage verbessert (Priyono & Ijomah et al. 2016, S. 917). Sortierzentren sind dabei ein wichtiges Bindeglied in der Logistikkette im Automobilbereich und werden direkt vom Remanufacturing-Betrieb oder von auf die Rückwärtslogistik spezialisierten Dienstleistern betrieben. Abbildung 2.4 verortet die beschriebenen Akteure in der Remanufacturing-Prozesskette.

2.3 Grundlagen hybrider Demontagesysteme

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Einführung in das Gebiet der Demontagesysteme beginnend mit einer Erläuterung der Grundbegriffe. Daraufhin folgt eine Auseinandersetzung mit den charakteristischen Unsicherheiten und Komplexitäten. Abschließend wird die roboterbaute Demontage motiviert und der aktuelle Status Quo anhand aktueller Anwendungsfälle umrissen.

2.3.1 Einführung und Grundbegriffe der Demontage

Nach der VDI-Norm 2243 beschreibt die Demontage die „*Gesamtheit aller Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und/oder formlosem Stoff durch Trennen dienen*“ (VDI 2243 2002, S. 35). Nach der DIN-Norm 8580 umfasst das *Trennen* wiederum Prozesse zur Aufhebung des Zusammenhalts von Körpern, wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen gemindert wird (DIN 8580 2022). Insgesamt ist das *Trennen* jedoch nicht mit dem Demontieren gleichzusetzen. Die Demontage umfasst zusätzlich zu den Trennprozessen, die meist der Subkategorie *Zerlegen* zugeordnet werden können (DIN 8580 2022), Handhabungs-, Kontroll- und Sonderoperationen (Seliger 2018, S. 1503).

Es wird zwischen der destruktiven und nicht-destruktiven Demontage unterschieden. Werden die Komponenten bei der Demontage nicht zerstört, spricht man von einer **nicht-destruktiven Demontage**. Diese ist nicht selten mit einem erhöhten Aufwand verbunden, aber für wert-haltige Kernkomponenten wie Gehäuseteile im Remanufacturing meist alternativlos. Im Gegensatz dazu stehen die **destruktiven Demontageprozesse**, bei denen einzelne oder mehrere Komponenten zerstört werden. Die destruktive Demontage ist meist robuster, inhärent flexibler und mit einem geringeren technischen Aufwand verbunden. Weiterhin ist die destruktive Demontage generell kosteneffizienter als die nicht-destruktive Demontage, jedoch häufig auf das Recycling der Materialien beschränkt. (Vongbunyong & Chen 2015, S. 20 f.)

Die Demontage von Gebrauchtsprodukten im Remanufacturing erfolgt im Rahmen eines **Demontagesystems**. Angelehnt an Spur & Axmann et al. (1997) setzt sich ein Demontagesystem aus den folgenden Komponenten zusammen (Spur & Axmann et al. 1997, S. 21):

- **Demontageobjekt:** Produkt, Baugruppe, Teil mit konkreter Aufgabenstellung (in dieser Arbeit werden Demontageobjekte stets als Demontageauftrag gehandhabt).
- **Demontageressource:** Potentialfaktor mit Arbeitsvermögen zur Ausführung eines Demontagevorgangs. Spur & Axmann et al. (1997, S. 21) unterscheidet zwischen Demontagepersonal (hier analog zum Mensch bzw. Mitarbeiter) und Demontage(betriebs-)mitteln (hier technische bzw. automatisierte Ressourcen).
- **Demontageprozess:** Gegliederte Abfolge von Demontageoperationen zur Verrichtung der übergeordneten Demontageaufgabe.
- **Demontageplanung:** Schaffung eines Systems mit dem erforderlichen Arbeitspotential.
- **Demontagesteuerung:** Koordination und Regelung des Ablaufes im Demontagesystem.

In einem **hybriden (d.h. teilautomatisierten) Demontagesystem** arbeiten Menschen (engl. human operator) an manuellen Arbeitsstationen in Kooperation mit automatisierten Arbeitsstationen an der Ausführung physischer Demontageoperationen am Demontageobjekt (Vongbunyong & Chen 2015, S. 50).

Ein oder mehrere Demontagesysteme können Teil einer sogenannten Demontagefabrik sein. Huber (2001) beschreibt diese im erweiterten Sinne als Fabriken, die nach erwerbswirtschaftlichen Prinzipien Gebrauchtsprodukte demontieren und gewonnene Sekundärrohstoffe bzw. -produkte veräußern, mit dem Ziel der Gewinnmaximierung. Die Aufgaben sind dabei die Organisation, Planung und Steuerung der Demontageprozesse sowie deren Durchführung inklusive der Ergänzungsprozesse und logistischen Funktionen (Huber 2001, S. 40). Mit Abschluss der Demontage werden die gewonnenen Komponenten im Remanufacturing weiterverarbeitet. Das Demontagesystem erfüllt eine *Produzentenfunktion*. Die Demontage kann jedoch auch die Entsorgung der Komponenten oder das Recycling z.B. durch eine höhere Sortenreinheit der Komponenten vereinfachen. In diesem Fall erfüllt das Demontagesystem eine *Service-Funktion* (Huber 2001, S. 40).

2.3.2 Herausforderungen der Demontage

Die Demontage kann nicht einfach als die Umkehrung der Montage angesehen werden (Vongbunyong & Chen 2015, S. 10). Eine Reihe verschiedener Komplexitätstreiber und Unsicherheitsfaktoren grenzen sie eindeutig von der Montage ab. Im Folgenden sind diese aufgelistet, dabei orientiert sich die Auflistung an Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720 f., Huber 2001, S. 90 f. und Ciupek 2006, S. 9:

1. **Produktzustandsabweichungen:** Der Zustand von Gebrauchtsprodukten zeichnet sich durch verschiedene Formen der Degradation aus. Die Degradation weicht von Produktinstanz zu Produktinstanz stark ab und ist abhängig von der individuellen Produktnutzungsphase. Dazu zählt die individuelle Nutzungsdauer, die Nutzungsintensität oder äußere Einflüsse wie z.B. Witterungsbedingungen während der Nutzung. Kim & Ciupek et al. (2006) unterscheiden zwischen neun Arten der Produktdegradation: Alterung, Bruch, Korrosion, Kriecheffekte, Verformung, Ermüdung, Bauteilverlust/-dislokation, Verschmutzung und Verschleiß. Im Gegensatz zu den Edukten der Montage, deren Bauteilspezifikationen nur in einem vergleichsweise engen und bekannten Toleranzbereich Schwankungen unterliegen, sind die durch Degradation induzierten Merkmalsausprägungen von Gebrauchtsprodukten individuell (Kim & Ciupek et al. 2006, S. 268).
2. **Unbekannte Produktzustände:** Der Zustand der Gebrauchtsprodukte ist im Vorfeld der Demontage meist nicht bekannt (Huber 2001, S. 92 f.; Hrdina & Zülch 2017, S. 326). Trotz des Einflusses der Produktzustände findet eine Differenzierung in der Planung

- der Demontage über harte Kriterien, wie z.B. die Aufarbeitbarkeit im Remanufacturing, hinaus, nicht statt. Informationen zur Herstellungsphase oder zum Nutzungszyklus sind häufig nicht zugänglich oder werden nicht genutzt (Colledani & Battaia 2016, S. 42).
3. **Kleine Losgrößen:** Um den anhaltenden Bedarf nach Ersatzteilen auch nach Ende der Herstellungsphase zu decken, sind die Aufarbeitungs- oder Verwertungs-Zyklen von Gebrauchsgüterprodukten häufig um ein Vielfaches länger als die Produktionszyklen der Neuprodukte. Gleichzeitig verteilen sich die Produktrückläufer über einen längeren Zeitraum. Die Folge sind kleinere Losgrößen je Produktvariante.
 4. **Große Variantenvielfalt:** Die Nutzungszyklen verschiedener Produktgenerationen und Produktfamilien überschneiden sich. Um bei kleinen Losgrößen dennoch eine wettbewerbsfähige Auslastung der Demontagesysteme zu erreichen, müssen meist verschiedenste Produktvarianten im selben System verarbeitet werden (Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720). Häufig beschränkt sich die Variantenvielfalt dabei nicht nur auf einen Hersteller, sondern integriert die Produkte verschiedener Hersteller (Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720; Lee & Behdad et al. 2022, S. 1). Damit wird die Produktdiversität um eine weitere Dimension gesteigert.
 5. **Volatile und unbekannte Stückzahlverläufe:** Die Art, der Zeitpunkt und die Menge von Produktrückläufern unterliegen Schwankungen und sind schwer prognostizierbar, s. Herausforderung 1 in Abschnitt 2.2.2. Das Ende eines Nutzungszyklus eines Gebrauchsgüterprodukts wird meist über den Funktionsausfall des Produkts selbst oder dem, dem Produkt übergeordneten System eingeleitet. Neben technischen Funktionsausfällen, welche die Weiternutzung der Produkte unmittelbar verhindern, können jedoch auch andere Gründe technologischer, organisatorischer oder sozialer Natur vorliegen. Im Endeffekt ist die Dauer der Produktnutzungszyklen mehrheitlich probabilistisch verteilt.
 6. **Fehlende Berücksichtigung der Demontage in der Produktgestaltung:** Die demontagegerechte Produktgestaltung wird in der Produktentwicklung meist noch immer vernachlässigt oder als zu teuer aufgefasst. Operationen in der Demontage sind deshalb in der Ausführung häufig komplizierter, als sie unter Beachtung adäquater Gestaltungsrichtlinien in der Produktentwicklung sein könnten. Sie sind dann meist nur manuell durchführbar, während eine robuste Automatisierung eher der destruktiven Demontage vorbehalten bleibt (Dufloy & Seliger et al. 2008, S. 588).
 7. **Divergenz der Produktstruktur:** In der Montage fließen Komponenten (Edukte) zusammen und werden in einer Reihe von Verrichtungsschritten zusammengesetzt. Der Materialfluss konvergiert. In der Demontage ist das Gegenteil der Fall, der Materialfluss

divergiert (Ullerich 2014, S. 3). Subbaugruppen, die eine individuelle Behandlung erfordern, können separat weiterverarbeitet werden. Der Divergenzgrad steigt mit der Anzahl der Komponenten und Subbaugruppen, insbesondere bei Produkten ohne Plattformstruktur.

Die geschilderten Eigenschaften wirken sich negativ auf den Betrieb und die Effizienz von Demontagesystemen aus. Auf **Prozessebene** beeinflusst die Heterogenität des Gebrauchtspektrums die Demontageoperationen erheblich (Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720). Darunter fallen der Demontageumfang, der -ablauf, die -dauer⁸ sowie die -effektivität. Auszuführende Demontageaufgaben sind nicht deterministisch. Häufig sind Störungen die Folge. Die Störungsanfälligkeit, aber auch die Variantenvielfalt erfordern eine hohe Flexibilität auf Prozessebene. Die ohnehin umständlichen Demontageoperationen können aufgrund der Zustandsabweichungen nur schwer oder nicht standardisiert werden und erfordern Adaptivität und Geschicklichkeit in der Durchführung.

Die Unsicherheit und Störanfälligkeit prägt neben der Prozess- auch die **Systemplanungsebene**. Die ungewissen Produktzustände oder schlicht deren Vernachlässigung in der Planung führen zu uninformierten Entscheidungen bei ungewissem Ergebnis (Colledani & Battaia 2016, S. 42). Adäquate produktzustandsorientierte Maßnahmen werden nicht frühzeitig antizipiert. Sie zeichnen sich erst während der Demontage ab und müssen reaktiv ergriffen werden. Mangels Standardisierbarkeit erfolgt die Planung stattdessen häufig basierend auf groben Erwartungswerten (Laili & Wang et al. 2022, S. 79). Dabei kommt es zu Abweichungen der Ist-Werten von den Soll-Werten (Huber 2001, S. 93). Produktionspläne in der Demontage sind deshalb meist ineffektiv (Wiendahl & Seliger et al. 1999, S. 720). Pläne mit großzügigen Puffern führen wiederum vermehrt zu Stillstandszeiten der Produktionsressourcen. Der Betrieb von Demontagesystemen erfordert folglich eine **reaktive Steuerungskomponente** (Hrdina & Zülch 2017, S. 326 f.).

2.3.3 Organisation von Demontagesystemen

2.3.3.1 Flexibilitätsanforderungen

Basierend auf den Herausforderungen der Produktdemontage müssen Demontagesysteme spezifische Anforderungen erfüllen um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Insbesondere müssen sie ein Höchstmaß an Flexibilität aufweisen (Ciupek 2006, S. 9). Seliger & Uhlmann et al. (2000) unterteilen die Flexibilität dabei in verschiedene zu erfüllende Flexibilitätsarten (Seliger & Uhlmann et al. 2000 zitiert nach Ciupek 2006, S. 9):

⁸ Die Schwankungen der Prozesszeiten in der Demontage unterliegen einem Variationskoeffizient von bis zu 5 (Guide 2000, S. 473). Zum Vergleich, im Bereich der Montage dienen um den Faktor zehn kleinere Variationskoeffizienten als Planungsgrundlage (Altekin & Akkan 2012, S. 4956).

- **Ablauflexibilität:** Die Fähigkeit die Reihenfolge der Verrichtungsschritte sowie die Routenführung der Demontageobjekte zu variieren
- **Variantenflexibilität:** Die Fähigkeit verschiedene Produktvarianten in beliebiger Reihenfolge demontieren zu können.
- **Zustandsflexibilität:** Die Fähigkeit Demontageobjekte in unterschiedlichen Anlieferungszuständen demontieren zu können.
- **Produktmengenflexibilität:** Die Fähigkeit Demontageobjekte in unterschiedlichen Stückzahlen wirtschaftlich demontieren zu können.
- **Umbauflexibilität:** Die Fähigkeit auf veränderte Anforderungen mit einer räumlichen Neuordnung der Demontageressourcen reagieren zu können.

2.3.3.2 Aufbauorganisation von Demontagesystemen

Die Organisationsform beschreibt die räumliche und zeitliche Zusammenfassung der Demontageressourcen in einem Demontagesystem und beeinflusst maßgeblich die Produktivität und Flexibilität (Hentschel 1996, S. 36). Analog zur Linearproduktion kann die Organisationsform von Demontagesystemen nach dem Verrichtungsprinzip oder dem Objektprinzip unterschieden werden (Hentschel 1996, S. 37). Nach dem Verrichtungsprinzip werden Demontageressourcen gleicher Funktion bzw. Technologie räumlich (in Werkstätten) zusammengefasst. So zusammengefasste Systeme profitieren von einer hohen Flexibilität. Das Objektprinzip kann weiter in das Zellen- bzw. Inselprinzip und Flussprinzip unterteilt werden. Beim Inselprinzip erfolgt eine räumliche Zusammenfassung sich ergänzender Demontageressourcen. Analog dazu ist das Flussprinzip, allerdings sind hier die Demontageressourcen in der Reihenfolge des Demontageprozesses ausgerichtet und ermöglichen so einen klaren und effizienten Materialfluss. Die Organisationsform spiegelt sich in verschiedenen Anordnungsstrukturen bzw. dem Layout eines Demontagesystems wider.

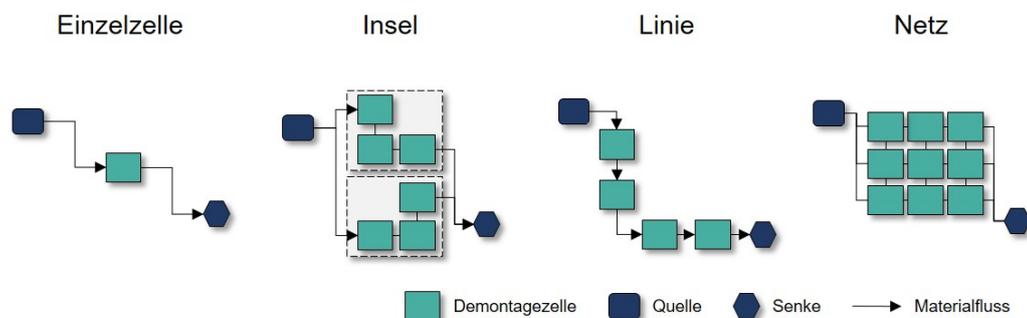


Abbildung 2.5: Anordnungsstruktur der vier Grundformen für Demontagesysteme: Einzelzelle, Linie, Insel und Netz nach Ciupek 2006, S. 68.

Ciupek (2006) beschreibt vier Grundformen für Demontagesysteme mit variierender Anordnungsstruktur (Ciupek 2006, S. 69):

- **Demontagezellen** beschreiben manuelle oder mechanisierte Einzelarbeitsplätze (Ciupek 2006, S. 69). Die Demontage erfolgt vollständig an einem Ort und kann vom Mitarbeiter frei eingeteilt werden. Die Demontagezelle ermöglicht damit eine hohe Varianten- und Zustandsflexibilität und ist sinnvoll bei kleinen Stückzahlen.
- **Demontageinseln** entstehen durch Aggregation von Demontageressourcen für eine Produktvariante bzw. eine Produktfamilie nach dem Inselprinzip, bei Verzicht auf eine richtungsorientierte Verkettung.
- **Demontagelinien** beschreiben gemäß dem Flussprinzip angeordnete Demontageressourcen mit gerichtetem Materialfluss bei höherer Produktivität und verringertem Transportaufwand.
- **Demontagenetze** stellen eine Kombination aus sich ergänzenden und ersetzenden Demontageressourcen (Ciupek 2006, S. 70), hier Demontageplätzen bzw. Stationen, dar. In Demontagenetzen können sowohl viele Varianten als auch große Stückzahlen verarbeitet werden. Sie vereinen Ablauf-, Produktvarianten- und Produktzustandsflexibilität mit einem erhöhten Durchsatz. Ihr größter Nachteil ist der erhöhte Transportaufwand.

Die Layouts dieser Grundformen sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Eine Bewertung der Grundformen liefert außerdem Tabelle 2.1. Ein Teil der Bewertungskriterien entspricht dabei den in Abschnitt 2.3.3.1 beschriebenen Flexibilitätsarten.

Tabelle 2.1: Bewertung der Anordnungsprinzipien nach Ciupek 2006, S. 69 (●: geeignet, ◐: bedingt geeignet, ○: ungeeignet)

	Ablauf- flexibilität	Varianten- flexibilität	Zustands- flexibilität	Mengen- flexibilität	Kurze Durchlauf- zeiten	Geringer Transport- aufwand	Einmal- demontage	Kleine Stückzahlen	Große Stückzahlen
Einzelzelle	●	●	●	◐	●	◐	●	●	○
Insel	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	◐
Linie	○	○	○	◐	◐	●	○	◐	●
Netz	●	●	●	◐	◐	○	○	◐	●

In der Struktur und den Eigenschaften stimmt die Organisationsform Demontagenetz nach (Ciupek 2006, S. 70) weitestgehend mit dem aus der Neuproduktion motivierten Konzept

der Matrixproduktion nach Greschke (2016) überein, welche die Grundlage der Strukturorganisation der hier betrachteten **agilen Demontagesysteme** bildet. Die namensgebende Eigenschaft der **Agilität** ist in dieser Arbeit dabei stets auf die Fähigkeit eines Produktionssystems bezogen, unter Unsicherheit und in unvorhergesehenen Situationen schnell zu reagieren, Entscheidungen zu treffen sowie sich anzupassen (vgl. z.B. (Göppert & Schukat et al. 2021, S. 5))⁹.

Das Konzept der **Matrixproduktion** ist als alternatives Konzept zur Linienfertigung (Greschke 2020, S. 182) zu verstehen. Die in der Linie räumlich, reihenfolgetechnisch und zeitlich gekoppelten Arbeitsstationen (Greschke 2020, S. 179) werden hierzu getrennt. Ein taktunabhängiges System aus losen und flexibel verkettbaren Stationen entsteht. Der Materialfluss kann z.B. mittels fahrerlosen Transportsystemen realisiert werden. Durch Bewahrung des Flussprinzips der Linienfertigung vereint das Konzept der Matrixproduktion eine hohe Produktivität mit erhöhter Flexibilität (Greschke 2020, S. 363). Um die außerordentliche Eignung des Konzepts für diese Arbeit zu unterstreichen, werden im Folgenden eine Reihe weiterer Vorteile nach Greschke 2020, S. 359 ff. spezifiziert für die Anforderungen hybrider Demontagesysteme aufgeführt:

1. Minimierte Wartezeiten und maximierte Verfügbarkeit
2. Hohe Produktvarianten- und Produktzustandsvielfalt
3. Dynamische Reaktionsfähigkeit: Umgang mit individuellen Produktzuständen und Arbeitsinhalten
4. Skalierbarkeit
5. Störungen ohne Stillstand des Systems vor Ort behebbar
6. Stationen dynamisch ansteuerbar, z.B. Bauteilinspektion oder Rückfalloperationen nach Prozessscheitern
7. Spielraum für redundante, manuelle und automatisierte Stationen und die individuelle Ausführung von Demontageoperationen
8. Psychische Entlastung der Werker durch Taktfreiheit.

Mit der Vielzahl an Freiheitsgraden gehen neben den Vorteilen auch Herausforderungen durch die erhöhte Komplexität einher (Greschke 2020, S. 295). Diese spiegelt sich insbesondere in erhöhten Anforderungen an die Materialflusssteuerung wider, die für die Matrix-Produktion,

⁹ Der Begriff der Agilität wird auch als Klasse der Wandlungsfähigkeit definiert (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 786). Auf einer dem Produktionssystem übergeordneten Betrachtungsebene wird darunter die Fähigkeit eines ganzen Unternehmens verstanden, sich an sich ändernde Marktanforderungen anzupassen (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 786). Diese Definition ist in dieser Arbeit irreführend. Um etwaige Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, wird daher auf die Verwendung des Begriffs der Wandlungsfähigkeit vollständig verzichtet.

anders als mit klassischen Lean-Methoden nur computergestützt und automatisiert erfolgen kann (Greschke 2020, S. 298).

2.3.3.3 Ablauforganisation von Demontagesystemen

Die Demontageplanung und -steuerung (DPS) übernimmt die organisatorischen bzw. dispositiven Aufgaben in der Demontage (Huber 2001, S. 97). Auch die Schritte der DPS sowie deren Sequenz folgen im Wesentlichen der Systematik aus Abbildung 2.1. Dennoch steht der Demontageplaner vor einschlägigen Problemstellungen, welche eine Anpassung konventioneller Planungsmethoden erfordert (Lee & Kang et al. 2001, S. 697). Erschwerend sind dabei die ungewissen Regenerationsraten und die stochastisch-verteilten Prozesszeiten aufgrund der abweichenden Produktzustände (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Die Demontage entspricht nicht einfach der Umkehr der Montage. Dies gilt auch für das Verhältnis der Demontage- zur Produktionsplanung (Ullerich 2014, S. 3). Planungsunterlagen der Produktmontage, wie z.B. Montagevorranggraphen oder Stücklisten (engl. BOM für Bill of Material), falls verfügbar, bilden für die Demontage zumeist keine hinreichende Planungsgrundlage. An erster Stelle der Demontageplanung steht somit die Frage einer geeigneten **Produktrepräsentation**, d.h. die Abbildung der Produktstruktur, der einzelnen Demontag verrichtungsschritte sowie deren Vorrangsbeziehungen aufbauend auf einer Produktanalyse (Vongbunyong & Chen 2015, S. 11 ff.). Für die Produktrepräsentation existieren eine Vielzahl von Ansätzen. Laili & Wang et al. (2022) kategorisieren diese in Matrizen¹⁰, Graphen¹¹ oder eine Mischung aus beidem¹². Des Weiteren unterscheiden sie komponentenbasierte¹³, vorgangsbasierte¹⁴ und kombinierte Ansätze¹⁵.

Charakteristische Entscheidungsprobleme der Demontageplanung werden nachfolgend beschrieben (vgl. Ilgin & Gupta 2010, S. 577 ff. und Ullerich 2014, S. 17 f.):

- Im **Disassembly Sequencing** (dt. Demontagereihenfolgeplanung) erfolgt die Ermittlung der optimalen Demontagesequenz, basierend auf den gültigen Bearbeitungsreihenfolgen, die sich aus der Produktrepräsentation ergeben.
- Das Ziel des **Disassembly-to-Order Planning** ist die Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Gebrauchprodukten zur Deckung einer gegebenen Komponentennachfrage (Ullerich 2014, S. 17 f.)

¹⁰ z.B. *Interferenz-Matrizen* (Huang & Huang 2002)

¹¹ z.B. *AND/OR-Graphen* (Homem de Mello & Sanderson 1990)

¹² z.B. *Komponenten-Verbindungselement-Graphen* (Zhang & Kuo 2011)

¹³ z.B. *Demontagevorrangs-Matrizen* (Gungor & Gupta 2001b)

¹⁴ z.B. *Disassembly constraint-Graphen*, (Li & Khoo et al. 2005)

¹⁵ z.B. *Demontage-Petri-Netze* (Guo & Liu et al. 2016)

- Das **Disassembly Scheduling** (dt. Demontagefeinplanung) ist vergleichbar mit dem Disassembly-to-Order-Planning¹⁶. Während Letzteres jedoch ein rein mengenmäßiges Ergebnis erzeugt, werden im Scheduling auch konkrete Zeiten für die Demontage festgelegt (Ullerich 2014, S. 18). In der Literatur wird das Disassembly Scheduling auch als *reversed material requirement planning* bezeichnet (Lee & Kang et al. 2001, S. 697).
- Analog zur Linearproduktion fokussiert die Austaktung von Demontagelinien (engl. **Disassembly Line Balancing**) die Bündelung und Zuweisung von Demontageaufgaben zu Demontagestationen. Das Ziel dabei ist z.B. die Reduktion der Stationsanzahl oder die Erhöhung der Stationsauslastung.

Alternative Entscheidungsvariablen erweitern das Handlungsfeld der Demontageplanung gegenüber der PPS in der Linearproduktion. Dazu gehört die Bestimmung der **Demontagetiefe** und der **Produktverwertungsmaßnahme**¹⁷. Im Rahmen dieser Arbeit spielen diese Entscheidungsvariablen eine untergeordnete Rolle, die Demontagetiefe wird als stets konstant angenommen.

2.3.4 Flexible roboterbasierte Demontageautomatisierung

Für einen effektiven Umgang mit Unsicherheit benötigen Demontageressourcen die Fähigkeit in unvorhergesehenen Situationen effektive Ausweichmaßnahmen zu finden und zu ergreifen. Ein Mensch mit seinen kognitiven Fähigkeiten ist dazu in der Lage (Seliger 2007, S. 290). Konventionelle automatisierte Anlagen sind jedoch auf klar vorgegebene repetitive Prozesse ausgelegt, womit es ihnen an Flexibilität mangelt (Laili & Li et al. 2021, S. 1). Dabei stellen insbesondere die mehrheitlich im Remanufacturing auftretenden nicht-destruktiven Demontageprozesse eine Herausforderung dar. Für diese gibt es bis heute oft keine ökonomisch sinnvolle automatisierte Lösung (Duflo & Seliger et al. 2008, S. 591). Insbesondere im Remanufacturing basiert die Demontage daher auf manueller Arbeit, was sich v.a. an Hochlohnstandorten in den Kosten niederschlägt und negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirkt (Vongbunyong & Chen 2015, S. 6). Abbildung 2.6 fasst das genannte Dilemma grafisch zusammen. Hierzu wird die Demontage aus Prozesssicht anhand der Kriterien

¹⁶ Diese Problemstellung ist eng vernetzt mit der Materialbedarfsplanung im Remanufacturing, die durch das Spannungsfeld ungewisser Gebrauchtzustände, ungewisser Regenerationsraten und der Beschaffung von Neukomponenten zur ausreichenden Deckung des Komponentenbedarfs auf der einen Seite sowie einer schlanken Lagerhaltung auf der anderen Seite geprägt ist (Inderfurth & Langella 2006).

¹⁷ Nicht immer ist eine vollständige Demontage eines Produkts sinnvoll. Technische Hürden oder ein hoher, wirtschaftlich nicht gerechtfertigter Aufwand für eine vollständige Demontage können eine partielle Demontage begünstigen (Vongbunyong & Chen 2015, S. 19). Des Weiteren muss für Gebrauchtzustände oder einzelne Komponenten die Auswahl einer geeigneten Verwertungsmaßnahme oder deren Entsorgung erfolgen (Lee & Kang et al. 2001, S. 698). Sowohl die Bestimmung der optimalen Demontagetiefe als auch der optimalen Verwertungsmaßnahme hängen vom Zustand der individuellen Demontageaufträge ab und können damit eine Einzelfallentscheidung erfordern.

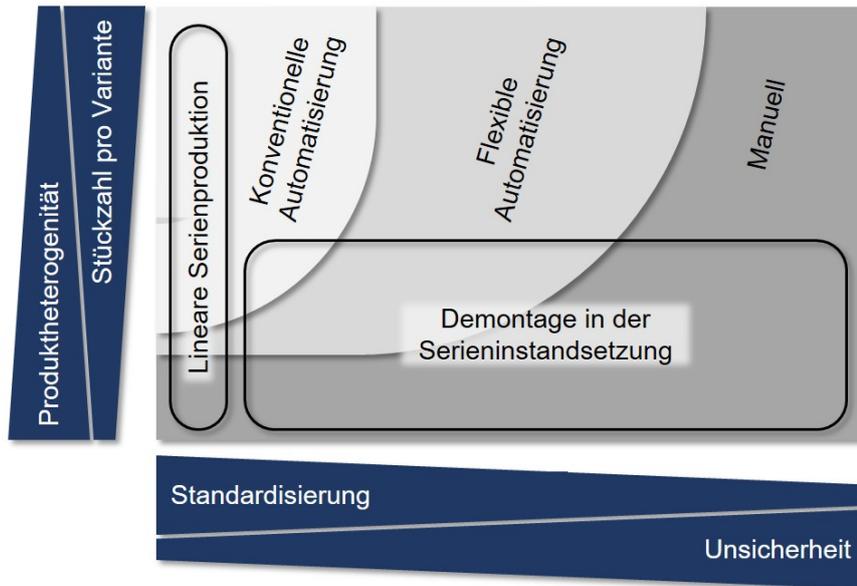


Abbildung 2.6: Qualitative Einordnung der konventionellen Serienproduktion gegenüber der Demontage in der Serieninstandsetzung anhand der Ausprägung der Produktheterogenität, der Stückzahl je Variante, der Prozessstandardisierung und der Prozessunsicherheit - Verortung des Einsatzpotentials manueller, konventioneller und flexibel-automatisierter Ressourcen (Eigene Darstellung)

Standardisierung und Unsicherheit sowie anhand der Variantenvielfalt und Stückzahl verortet und der Fertigung und Montage gegenübergestellt. Es zeigt sich die mangelnde Eignung konventioneller Automatisierungslösungen.

Um dennoch die mangelnde Produktivität der manuellen Demontage zu überwinden, beschäftigt sich die Industrie und Forschung mit einer flexiblen Automatisierung von Demontageprozessen (Wiendahl & Scholz-Reiter et al. 2001, S. 730; Vongbunyong & Chen 2015; Hjorth & Chrysostomou 2022, S. 11). Diese soll auch unter Unsicherheit funktionieren und damit eine Automatisierung von bisher rein-manuell durchgeführten Prozessen ermöglichen. Abbildung 2.6 unterstreicht plakativ das Einsatzpotential solcher Systeme für die Demontage. Eine besondere Rolle für eine flexible Automatisierung spielen Industrieroboter bzw. konkret die Subklasse der kognitiven bzw. autonomen Roboter (Poschmann 2021; Levesque & Lakemeyer 2008, S. 869; Rocca & Rosa et al. 2020, S. 5).

Nach der VDI-Norm 2860 sind Industrieroboter „universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen“ (VDI 2860 1990).

Die kognitiven/autonomen Roboter stellen eine Subklasse herkömmlich-programmierter Roboter dar. Es handelt sich dabei um kognitive technische Systeme (Zaeh & Beetz et al. 2009, S. 359). Eine multisensorische Ausstattung ermöglicht es ihnen, ihre Umgebung wahrzunehmen (Perzeption). Sie greifen auf eine Wissensbasis zurück und können aus Erfahrungen lernen. Im Gegensatz zu herkömmlichen technischen Systemen können Sie nicht nur nach vorgegebenem Schema agieren, sondern auch adäquate Ausweichmaßnahmen in unvorhergesehenen Situationen ergreifen (Reasoning, dt. schlussfolgern). Als kognitives technisches System erlauben Sie einen robusteren, flexibleren und effizienteren Betrieb (Zaeh & Beetz et al. 2009, S. 359). Für kognitive Roboter in der Demontage bedeutete dies insbesondere einen resilienteren Umgang mit Unsicherheiten (Goli & Wang et al. 2022, S. 1). In Kombination mit flexiblen Spann- und Endeffektorwechselsystemen können sie darüber hinaus für die Demontage verschiedener Produktvarianten befähigt werden.

Generell sind für eine flexibel-automatisierte Demontage mehr Komponenten erforderlich als nur ein Roboter mit flexibler Kinematik. Vongbunyong & Chen (2015, S. 27 ff.) definiert angelehnt an Knoth & Brandstotter et al. (2002, S. 291) die erforderlichen Teilsysteme einer **modularen flexiblen Demontagezelle** wie folgt:

1. Demontageroboter
2. Robotergreifer
3. Demontagewerkzeuge
4. Spannvorrichtungen
5. Vision- und Sensorsysteme
6. (Intelligente) Steuerungseinheit
7. Pufferlager
8. Produktdatenbank
9. Transport- und Handhabungssysteme
10. Manuelle Demontagestationen

Wie die Auflistung zeigt, ist hier der Roboter nur eines von vielen Modulen, weswegen für die Entwicklung flexibler Demontageautomatisierungslösungen in der Vergangenheit z.B. auch Begriffe wie flexible, autonome oder intelligente Demontagezellen genutzt wurden (Scholz-Reiter & Scharke et al. 1999; Kopacek & Kopacek 2006). Für eine Auswahl hybrider und vollautomatisierter Demontagesysteme aus der Forschung sei z.B. auf die Übersicht von Vongbunyong & Chen 2015, S. 40 ff. verwiesen.

Um eine klare Abgrenzung von konventionell automatisierten Demontagevorrichtungen zu erreichen, eignen sich in Anlehnung an die flexible Automatisierung, die Bezeichnungen

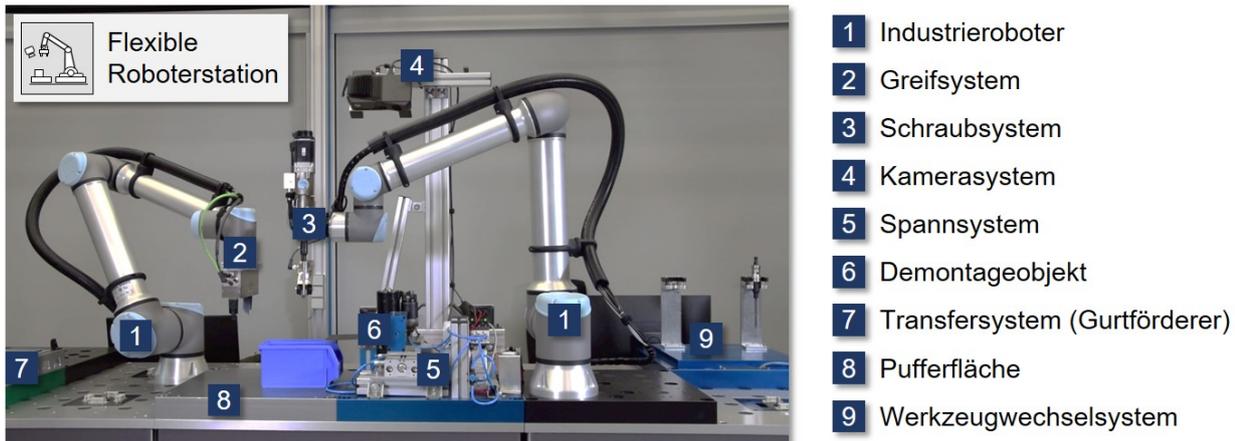


Abbildung 2.7: Prototyp einer flexiblen Roboterstation für die Demontage von Elektrokleinmotoren am Karlsruher Institut für Technologie

flexible (Demontage-)Roboter bzw. flexible Robotersysteme. Anstatt dem Begriff Zelle, der in der Literatur oft zur Beschreibung einer integrierten, abgeschlossenen (teilautomatisierten) Demontageanlage genutzt wird, wird in dieser Arbeit abgrenzend der Begriff **Station** (analog zu engl. work station) verwendet, der die Zugehörigkeit zu einem übergeordneten System implizieren soll. Entsprechend wird nachfolgend ausschließlich der Begriff **flexible Roboterstation** verwendet.

Abbildung 2.7 zeigt eine prototypisch-aufgebaute flexible Roboterstation am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie für die Demontage von Elektrokleinmotoren. Neben zwei Industrierobotern (1) beinhaltet die Station ein flexibles Greifsystem (2), ein adaptives Schraubsystem (3), eine 3D-Farbkamera (4), ein flexibles Spannsystem für verschiedenste Geometrien (5), ein Transfersystem für den An- und Abtransport von Demontageobjekten (7), eine Pufferfläche (8) sowie einer Fläche mit Vorrichtungen für den Werkzeugwechsel (9). In den wesentlichen Teilsystemen stimmen die Komponenten der Station mit der Aufstellung von Vongbunyong & Chen 2015, S. 27 ff. überein.

Obgleich sowohl die Forschung als auch die Industrie das enorme Potential der roboterbasierten Demontage erkannt haben und das Thema große Aufmerksamkeit genießt (Poschmann & Brüggemann et al. 2020; Goli & Wang et al. 2022), konnte bislang noch immer keine flächendeckende industrielle Reife erreicht werden. Je nach angestrebter Flexibilität und Autonomie ist die Befähigung von Robotern für die Demontage ein mehrstufiger Entwicklungsprozess. Laili & Wang et al. (2022) skizzieren drei aufeinander aufbauende **Entwicklungsziele für die roboterbasierte Demontage**:

1. **Robuste Demontage**: Das Ziel dieser initialen Phase ist die Erreichung der industriellen Reife roboterbasierter Demontagesysteme. Im Fokus steht hierbei die Minimierung fehlerinduzierter Stillstandszeiten und damit verbunden die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Sensorgestützte Roboter erlangen die Fähigkeit, effektive Maßnahmen im Umgang mit wechselnden Produktzuständen unter Unsicherheit zu ergreifen. Definiertes Vorwissen bzgl. der Sollzustände und Fehlermöglichkeiten ist erforderlich. Die Variantenflexibilität ist eingeschränkt.
2. **Flexible Demontage**: Das Ziel der zweiten Phase ist die Erhöhung der Variantenflexibilität und damit der Wirtschaftlichkeit bei kleinen Losgrößen. Roboter erlangen dabei die Fähigkeit, Varianten zu erkennen und leiten aufbauend auf den bereits in Phase 1 erlangten Fähigkeiten geeignete Demontageschritte ab. Der Fokus in dieser Phase liegt primär auf der Entwicklung flexibler Spann- und Greifvorrichtungen, Layouts für Demontagezellen sowie geeigneter Demontagewerkzeuge und ist damit auf Hardwareseite zu verorten.
3. **Autonome Demontage**: In der letzten Entwicklungsphase steht die Befähigung der Roboter zum autonomen Handeln, d.h. zur Lösungsfindung ohne konkrete Vorgaben und Vorwissen im Fokus. Die Demontage erfolgt rein reaktiv durch Verständnis und Interpretation mechanischer Strukturen, Identifikation und Lokalisierung von Verbindungselementen sowie darauf aufbauend die Ableitung geeigneter Maßnahmen. (Laili & Wang et al. 2022, S. 24 ff.)

Aufgrund der mangelnden prozesstechnischen Reife und der hohen Unsicherheit in der Prozessausführung von Demontageaufgaben erfordern flexible Roboterstationen besondere organisatorische Aufmerksamkeit. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit daher explizit und separat modelliert. Dabei erhalten sie jeweils konkrete Demontageaufgaben als Arbeitsvorgabe. Unter dieser Annahme sind sie zwischen den Entwicklungszielen 1 und 2 zu verorten. Der mangelnden technischen Reife sowie der probabilistischen Prozessausführung wird durch die auf Fähigkeitsdefizite zurückzuführende Möglichkeit des **Prozessscheiterns** entsprochen.

Im weiteren Verlauf werden die so definierten flexiblen Roboterstationen um **manuelle Stationen** und **automatisierte Stationen** (vgl. Unterkapitel 1.2) **ergänzt** und in ein Modell für hybride Demontagesysteme integriert.

Abbildung 2.8a zeigt exemplarisch eine handgeführte Demontage eines Elektrokleinmotors an einer manuellen Station. Abbildung 2.8b zeigt wiederum eine automatisierte Station mit drei starr-automatisierten Demontagevorrichtungen sowie einem Roboter für Handhabungsaufgaben. Eine detaillierte Beschreibung und Abgrenzung der Demotageressourcen aus betriebsorganisatorischer Sicht erfolgt in den Abschnitten 4.1.1 und 5.1.2.

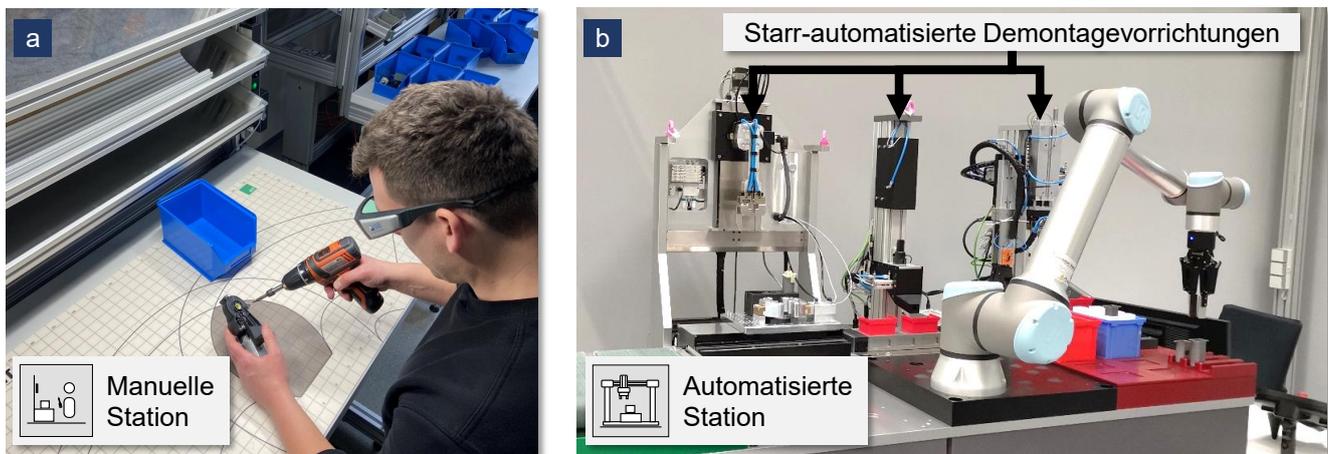


Abbildung 2.8: Manuelle Station (a) und automatisierte Station (b) mit installierten Demontagevorrichtungen in Laborumgebung am Karlsruher Institut für Technologie

3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel werden thematisch-relevante Forschungsarbeiten der letzten Jahrzehnte vorgestellt. Hierzu werden im Unterkapitel 3.1 zunächst, aufbauend auf der Zielsetzung aus Unterkapitel 1.3, die an den Lösungsansatz gestellten Anforderungskriterien identifiziert. Geclustert in vier Themenbereiche, wird die existierende Literatur in den Unterkapiteln 3.2 - 3.5 vorgestellt und anhand der zuvor definierten Anforderungskriterien bewertet. Abschließend werden in Unterkapitel 3.6 das Forschungsdefizit sowie ergänzend forschungsleitende Fragestellungen abgeleitet.

Das Forschungsinteresse an den Problemen der Produktionsplanung im Remanufacturing und der Demontage ist hoch, mit unzähligen Publikation in den letzten Dekaden. Die für diese Arbeit wichtigsten und dem Autor bekannten Arbeiten werden im Folgenden zusammengefasst.

3.1 Anforderungen an Modellierung und Lösungsmethodik

Wie in den vorherigen Kapiteln hergeleitet, erfüllen agile hybride Demontagesysteme (AHDS) aus aufbauorganisatorischer Sicht die Anforderungen für eine wirtschaftliche Demontage. Sie kombinieren Mensch und Roboter und erfüllen strukturell sämtliche Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Produktivität. Um dieses Potential im Betrieb ausschöpfen zu können, bedarf es kompatibler Verfahren der Demontageplanung und -steuerung (DPS). Die Kompatibilitätskriterien werden folgend in vier Anforderungsblöcken definiert:

1. **Handlungsfeld DPS:** Kompatible Forschungsansätze sind in der Kreislaufwirtschaft verortet. Sie präsentieren ein Verfahren der Planung und -steuerung auf **Fabrik- bzw. Systemebene (K1)**. Konkreter bedarf es Ansätzen für den operativen Systembetrieb, einer **adaptiven Steuerung (K2)**, die für verschiedene Systemkonfigurationen und unter Unsicherheit und Komplexität einen effektiven Umgang mit Störungen und so einen robusten (unterbrechungsfreien) Systembetrieb gewährleistet. Weiterhin bedarf es eines taktischen Systemrekonfigurators basierend auf einem **Kapazitätsplanungsverfahren (K3)**. Ein relevanter Ansatz ist mindestens einem der zwei Handlungsfelder zuordenbar.
2. **Systemmodellierung:** Kompatible Forschungsansätze spiegeln die Freiheitsgrade von AHDS in einer vergleichbaren modularen Systemstruktur wider. Als Anordnungsprinzip liegt eine Matrixstruktur mit Stationen in **loser Verkettung (K4)** zu Grunde. Neben manuellen Arbeitsstationen kommen auch automatisierte Demontageressourcen wie etwa flexible Roboter (**(Roboter)-Automatisierung K5**) zum Einsatz und bilden ein

hybrides Demontagesystem (K6). Das betrachtete System ist modular aufgebaut, skalierbar und rekonfigurierbar (**Rekonfigurierbarkeit K7**).

3. **Produkt- und Prozessmodellierung**: Kompatible Forschungsansätze bilden die Komplexität und Unsicherheit in der Demontage hinreichend ab und erlauben somit eine valide Entwicklung und Erprobung von DPS-Verfahren für AHDS, insbesondere hinsichtlich der geforderten Flexibilitätsarten nach Seliger & Uhlmann et al. (2000). Hierzu zählt neben der Mengen- und Umbauflexibilität (beinhaltet in K7) die Ablaufflexibilität (**Variabler Demontageablauf K8**), die Variantenflexibilität (**Produktvielfalt K9**) und die Produktzustandsflexibilität. Der Produktzustand wird analog zu den Stückzahlen und Produktvarianten als Entscheidungskriterium in der DPS berücksichtigt (**Produktzustandsantizipation K10**). Die Produktzustandsvariation spiegelt sich in der Ausführungsdauer (**Kopplung Produktzustand-Demontagedauer K11**) und in der Erfolgswahrscheinlichkeit (**Prozessscheitern K12**) der Demontageoperationen wider.
4. **Evaluation**: Kompatible Forschungsansätze zielen auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Remanufacturings durch eine effizientere Demontage ab. Hierbei fokussieren sie die Optimierung der Systemleistung (**Leistungsoptimierung K13**) durch Steigerung der Systemausbringung sowie die **Entlastung des Menschen (K14)** durch gezielten Übertrag von Demontageaufgaben auf automatisierte Demontageressourcen. Für eine möglichst genaue Abbildung des Demontagebetriebs erfolgt eine **simulative Erprobung (K15)**.

3.2 Ansätze zur Demontageplanung bei Unsicherheit und Komplexität

Mit Beginn der 1990er Jahre stieß die Demontage von Gebrauchsgüterprodukten erstmals auf größeres Interesse in der Industrie und Forschung (Jovane & Alting et al. 1993). In diesem Zuge etablierte sich auch die Demontageplanung und -steuerung als Forschungsfeld, welches aufgrund der mit der Zirkulärwirtschaft verbundenen Komplexität und Unsicherheit anhaltende Popularität genießt. Dabei lassen sich die behandelten Problemstellungen gemäß Abschnitt 2.3.3.3 unterteilen in die Produktrepräsentation, die Demontagesequenzplanung, das Demontage-Line-Balancing (DLB) und das Demontage-Scheduling. Zusammenfassungen früherer DPS- sowie Remanufacturing-spezifischer PPS-Ansätze finden sich z.B. in O'Shea & Grewal et al. 1998; Guide & Jayaraman et al. 1999; Lee & Kang et al. 2001; Tang & Zhou et al. 2002. Für eine Übersicht über aktuellere Ansätze sei z.B. auf folgende Zusammenfassungen verwiesen: Demontagesequenzplanung (Guo & Zhou et al. 2021; Ong & Chang et al. 2021), Demontage-Scheduling (Gagnon & Morgan 2014; Slama & Ben-Ammar et al. 2019), Demontage-Line-Balancing (Deniz & Ozcelik 2019; Laili & Li et al. 2020) oder roboterbasierte Demontage (Poschmann & Brüggemann et al. 2020; Hjorth & Chrysostomou 2022).

Im Folgenden liegt der Fokus auf Planungsansätzen, die sich mit Unsicherheit und Komplexität in der Demontage sowie insbesondere mit dem Prozessscheitern auseinandersetzen. Diese sind in erster Linie prädiktiver Natur. Zunächst erfolgt eine Vorstellung von Demontage-Line-Balancing-Ansätzen (Gungor & Gupta 2001a; Altekin & Akkan 2012; Bentaha & Battaïa et al. 2014; Altekin & Bayındır et al. 2016; Yin & Zhang et al. 2022) gefolgt von Ansätzen der Sequenzplanung und der Allokation von (Demontage-)aufgaben in hybriden oder roboterbasierten Demontagesystemen (Li & Liu et al. 2019; Groß & Gerke et al. 2020; Parsa & Saadat 2021; Belhadj & Aicha et al. 2022; Laili & Li et al. 2021; Laili & Wang et al. 2022; Lee & Behdad et al. 2022).

Gungor & Gupta (2001a) betrachten als erste Autoren das DLB unter Berücksichtigung von scheiternden Prozessen. Im Rahmen einer prädiktiven Planung fokussieren sie eine robuste Aufgabenzuweisung, um den negativen Effekt des Prozessscheiterns zu minimieren. In einem ersten Schritt identifizieren sie bei gegebener Zykluszeit alle zulässigen Konfigurationen für die Aufgabenallokation zu Stationen, welche die Anzahl der Stationen minimieren. Im zweiten Schritt werden für alle Konfigurationen die Wahrscheinlichkeiten für Komplikationen sowie die damit einhergehenden Kosten ermittelt. Abschließend wird die Variante gewählt, welche die Kosten minimiert.

Auch **Altekin & Akkan (2012)** beschäftigen sich mit der Austaktung von Demontagelinien. Sie stellen dabei das Re-Balancing im Fall von scheiternden Prozessen in den Fokus. In diesem Zuge präsentieren sie einen kombinierten Ansatz der sowohl eine prädiktive Austaktung einer Demontagelinie, als auch eine reaktive Modifikation im Fall einer fehlgeschlagenen Operation ermöglicht und auf einem mehrstufigen linearen Optimierungsverfahren basiert. Dabei fokussieren sie in erster Linie die Optimierung des (monetären) Durchsatzes. Die Autoren weisen unter anderem nach, dass scheiternde Prozesse bei rein prädiktiver Planung ohne die Möglichkeit zum Re-Balancing erhebliche Kosten verursachen.

Bentaha & Battaïa et al. (2014) entwickeln ein Modell für die Gestaltung von Demontagelinien unter Unsicherheit, das ebenso auf stochastischer Optimierung beruht. Dabei konzentrieren sie sich auf eine Austaktung unter Berücksichtigung alternativer Demontagesequenzen, variierender Demontagetiefe und schwankender Prozesszeiten bei bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung. Als Ziel weisen sie die Gewinnsteigerung durch Optimierung von Profit und Betriebskosten aus. Nach Validierung auf Benchmark-Problemen der Literatur, zeigt ihr Ansatz vielversprechende Resultate. Defizite im Vergleich mit anderen Ansätzen stellen die fehlende Modellierung scheiternder Prozesse sowie die Berücksichtigung lediglich eines Produktes dar.

In **Altekin & Bayındır et al. 2016** untersuchen die Autoren verschiedene Maßnahmen zur Abhilfe im Falle fehlerbedingt verlängerter Zykluszeiten im DLB. Die betrachteten Behebungsmaßnahmen sind das Stoppen der gesamten Linie am Ende der Taktzeit, das Beenden unvollständiger Operationen, die Beendigung dieser Operationen Off-Line und ein hybrider Ansatz, welcher abhängig von der Demontageaufgabe beide Maßnahmen kombiniert. Neben stochastischen Prozesszeiten verankern die Autoren Kostenmodelle für die verschiedenen Maßnahmen in einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell mit dem Ziel der Profitmaximierung. Im Rahmen einer Erprobung ergeben sich deutliche Vorteile durch den Stopp der Linie sowie durch den hybriden Ansatz gegenüber dem Einsatz von Off-Line Maßnahmen.

Zuletzt wurden zunehmend auch Arbeiten zum DLB für roboterbasierte Systeme veröffentlicht (Liu & Zhou et al. 2018; Fang & Liu et al. 2019; Fang & Ming et al. 2020; Yin & Zhang et al. 2022). Die Mehrheit der DLB-Ansätze, ob für Roboterlinien, hybride oder manuelle Linien, beschränkt sich immer nur auf eine Produktvariante. Unter diesem Gesichtspunkt ist an dieser Stelle insbesondere der Ansatz von **Yin & Zhang et al. (2022)** hervorzuheben. Die Autoren untersuchen die Optimierung einer roboterbasierten Demontagelinie mit multiplen Produktvarianten. Hierzu präsentieren und vergleichen sie ein exaktes Optimierungsverfahren sowie ein heuristisches Verfahren für Anwendungsfälle mit erhöhter Komplexität.

Li & Liu et al. (2019) untersuchen die Demontagesequenzplanung für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) unter dem Gesichtspunkt der menschlichen Ermüdung. Hierzu leiten sie ein Ermüdungsmodell ab, das die Effizienzeinbußen der menschlichen Arbeitskraft beschreibt und im Rahmen der Allokation der Demontageaufgaben Berücksichtigung findet. Unabhängig davon gehen sie von einer losweisen Demontage aus. Das Sequenzierungsproblem lösen sie mittels einer naturinspirierten Metaheuristik mit dem Ziel die Gesamtdauer sowie die menschliche Ermüdung zu minimieren. Dieser sowie alle folgenden MRK-Sequenzplanungsansätze verfolgen indirekt das Ziel, den Menschen durch die selektive Übergabe geeigneter Demontageschritte an Roboter zu entlasten.

Groß & Gerke et al. (2020) fokussieren in ihrem Ansatz das Scheduling in flexiblen Remanufacturing-Systemen. Darunter verstehen sie ein aus lose verketteten Stationen bestehendes System mit flexiblem Materialfluss. Der Materialtransport wird von fahrerlosen Transportsystemen übernommen. Der von den Autoren vorgeschlagene agentenbasierte Scheduling-Ansatz basiert auf Constraint-Programmierung und der metaheuristischen *Large Neighbourhood Search*. Er ermöglicht eine simultane Einplanung von Stationsoperationen und Transportoperationen und grenzt sich damit von bestehenden Scheduling-Ansätzen im Remanufacturing ab. Das Remanufacturing-System basiert im Aufbau auf einer Matrixstruktur. Der Fokus liegt jedoch nicht primär auf Demontageprozessen. Außerdem werden weitere Vereinfachungen angenommen, z.B. sind die Prozesszeiten deterministisch und Prozesse

können nicht scheitern. Die unterschiedlichen Fähigkeiten von manuellen und automatisierten Arbeitstationen werden nicht thematisiert.

Parsa & Saadat (2021) untersuchen die Sequenzplanung und die Allokation von Demontageaufgaben in Demontagesystemen mit Mensch-Roboter-Kollaboration. Ihr Ziel ist die Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Demontage durch eine effiziente Aufgabenverteilung unter Berücksichtigung der Aufarbeitbarkeit individueller Komponenten. Die Aufarbeitbarkeit wird als Einflussfaktor in der Modellierung aus der Fähigkeit zur Reinigung, Reparatur und dem ökonomischen Mehrwert der Demontage zusammengesetzt. Im einem mehrstufigen Optimierungsansatz werden den Demontageoperationen zunächst jeweils ein *Scoring*-Wert in Abhängigkeit von der Schwierigkeit und Komplexität der Durchführung zugewiesen. Unter Berücksichtigung der Demontagevorrangbeziehungen und der ermittelten *Scoring*-Werte erfolgt dann die Zuweisung der Operationen zum Mensch oder Roboter sowie ein Scheduling basierend auf einem genetischen Algorithmus.

Neben Parsa & Saadat (2021) untersuchen auch **Belhadj & Aicha et al. (2022)** auf Prozessebene die Aufgabenallokation und Sequenzplanung für eine hybride Demontagelinie. Mittels CAD-Daten modularisieren sie zunächst die Produktarchitektur und identifizieren Verschleißteile. Im nächsten Schritt werden valide Demontagesequenzen und jeweils die resultierende Gesamtdemontagezeit abgeleitet. Das Ziel der Autoren ist, die Gesamtdemontagedauer zu reduzieren. Die Autoren zeigen, dass die Gesamtdauer durch geeignete Parallelisierung im Vergleich mit einer streng sequentiellen Abarbeitung fast um das zehnfache reduziert werden kann.

Laili & Li et al. (2021) fokussieren die Sequenzplanung von Demontageaufgaben für Robotersysteme. In diesem Zuge untersuchen sie die Möglichkeit des Einsatzes von Backup-Operationen als Absicherungs- und Lösungsmaßnahme im Fall scheiternder Prozesse am Roboter. Zunächst werden hierzu eine Reihe von definierten Backup-Operationen bzw. Umgehungsmaßnahmen durch den Roboter ausgeführt. Helfen diese nicht, wird ein Werker zur Unterstützung herangezogen. Die Autoren zielen mit ihrem Ansatz auf die Steigerung der Robustheit von roboterbasierten bzw. hybriden Demontagesystemen. Ihre Erkenntnisse sind damit im Kontext dieser Arbeit von erhöhter Relevanz. Mit ihrem Ansatz agieren sie jedoch auf Prozessebene. Die Systemleistung sowie die Interaktion und Wechselwirkungen verschiedener Stationen werden nicht betrachtet.

Laili & Wang et al. (2022) erläutern ein ausführliches Vorgehen für die Planung roboterbasierter Demontagesysteme. Ziel ist die Befähigung eines autonomen Systems durch einen effizienten Betrieb. Sie behandeln die Produktrepräsentation, die Komponentendetektion, die Modellierung für die Demontagesequenzplanung sowie das Line Balancing und zeigen

Lösungsansätze für letzteres auf. Von Relevanz ist neben dem bereits aus Laili & Li et al. 2021 bekannten Ansatz für eine roboterbasierte Demontage mit Backup-Operationen insbesondere die vorgestellte Planungsmethode für die Sequenz-Neuplanung im Fall fehlschlagender Prozesse. Der reaktive Ansatz basierend auf einer Metaheuristik, ermöglicht die Aktualisierung bzw. Reparatur eines bestehenden Plans.

Auch **Lee & Behdad et al. (2022)** präsentieren einen Ansatz für die Allokations- und Sequenzplanung von Demontageaufgaben in Demontagesystemen mit Mensch-Roboter-Kollaboration. In erster Linie grenzt sich ihr Sequencing-Ansatz durch die Annahme von drei möglichen Arbeitsgruppen im System mit variierenden Prozesszeiten ab. Diese sind a) Mensch, b) Roboter sowie c) Mensch und Roboter in Kombination. Außerdem relaxieren sie weitere in einschlägigen Arbeiten übliche Annahmen, wie z.B. die Verfügbarkeit von Werkzeugen und die Rüstzeiten beim Übergang zwischen Demontageaufgaben. Ein Optimierungsmodell wird vorgestellt, das eine Minimierung der Gesamtdemontagezeit ermöglicht.

3.3 Ansätze zu Qualitätsklassensystemen in der Demontageplanung

Die folgenden Forschungsansätze verfolgen die Modellierung von Produktzuständen von Gebrauchsgütern und bilden damit die Basis für eine genauere Vorhersage der an die Produktzustände gekoppelten Prozessgrößen wie z.B. Regenerationsraten oder Demontagezeiten. In Abgrenzung zu den Forschungsansätzen aus Unterkapitel 3.2, die durch gezielten Umgang mit Unsicherheit versuchen die Robustheit gegenüber fehlschlagenden Prozessen zu erhöhen, zielen die nachfolgenden Ansätze auf eine Reduktion der durch die Produktzustände induzierten Unsicherheit ab. Damit bezwecken sie die Verbesserung der Informationsgrundlage für die Planung und Entscheidungsfindung und bauen dazu auf einer detaillierteren Produktbefundung auf. Es erfolgt eine Vorstellung von Ansätzen, welche die Antizipation von Produktzuständen für eine genauere Vorhersage der Wiederverwendbarkeit von Gebrauchsgütern nutzen (Huber 2001; Aras & Boyaci et al. 2004; Ferguson & Guide et al. 2009; Teunter & Flapper 2011; Ullerich & Buscher 2013; Sun & Chen et al. 2018; Yanıkoğlu & Denizel 2021). Diese sind mehrheitlich auf einer der Fabrik übergeordneten Planungsebene zu verorten. Eine geringere Anzahl besonders relevanter Ansätze ist wiederum der Fabrikebene zuordenbar und nutzt Qualitätsklassensysteme für eine Optimierung der Demontagesysteme durch eine differenziertere Vorhersage von Demontagezeiten (Riggs & Battaïa et al. 2015; Colledani & Battaïa 2016; Bentaha & Marangé et al. 2023).

In seiner Dissertation untersucht **Huber (2001)** die Planung und Steuerung von marktorientierten Demontagefabriken. Dabei analysiert er die der Demontage inhärenten Herausforderungen, leitet daraus die spezifischen Anforderungen an die PPS ab und stellt ein umfängliches

Konzept für die Demontageplanung und -steuerung vor. Dieses beinhaltet einen Planungsansatz für eine prädiktive und eine reaktive Zeit- und Kapazitätsplanung. Für Letztere geht er von der Erfassung bzw. Beurteilung und der Nutzung von Produktzustandsinformationen aus. Dabei steht die Bewertung der Wiederverwendbarkeit zur Mengen- und Auftragsreihenfolgeplanung im Fokus. Im Rahmen seiner Ausführung stellt er exemplarische Merkmale für die Zustandsbeurteilung auf. Dazu zählen Baujahr, Nutzungsintensität, Funktionstestergebnis, Ausfallursache, Gewichtsabweichungen oder optischer Eindruck mit einschlägigen Ausprägungen, die im Betrieb für jedes Produkt jeweils als Zustandsschlüssel operationalisiert werden. Weiter schlägt er vor, den Zusammenhang zwischen der Wiederverwendbarkeit sowie dem Zustand von Produkten mittels Expertenwissen und unter Zuhilfenahme von Fuzzy-Logik zu beschreiben. Die Ausführungen von Huber sind in vielerlei Hinsicht relevant für diese Arbeit. Neben der einschränkenden Fokussierung auf die Wiederverwendbarkeit von Gebrauchsgüterprodukten, spart der Ansatz die Umsetzung, quantitative Erprobung und Validierung jedoch vollständig aus und geht damit nicht über eine Konzeptstudie hinaus.

Aras & Boyaci et al. (2004) unterteilen Gebrauchsgüterprodukte nach hoher und niedriger Qualität und untersuchen den Mehrwert, der sich dadurch für die Entscheidungsfindung in einem Make-to-stock-Remanufacturing-System ergibt. Im Rahmen einer auf einem kontinuierlichen Markov-Ketten-Modell basierenden Studie, erproben sie verschiedene Remanufacturing-Strategien in Abhängigkeit von der Anzahl der Produktrückläufer. Sie zeigen, dass eine Priorisierung der als mit hoher Qualität kategorisierten Produkte mit einer Kostensenkung einhergeht, insbesondere bei steigender Rückläuferquote und starken Unterschieden zwischen den Qualitätsklassen. Der Ansatz ist auf abstrakter Ebene beschrieben und ohne konkreten Anwendungsfall. So gehen die Autoren nicht auf die Demontage als Teilschritt im Remanufacturing ein und vernachlässigen die Kapazitäten der Remanufacturing-Ressourcen.

Unter der Annahme von Produktionsperioden mit einem erhöhten Gebrauchsgüterproduktangebot stellen **Ferguson & Guide et al. (2009)** einen vergleichbaren Ansatz auf. Auch sie streben eine Profitsteigerung durch eine qualitätsbasierte Remanufacturing-Strategie für Gebrauchsgüterprodukte sowie eine zielgerichtete Auswahl der für die Aufarbeitung bestimmten Produkte an. Dabei vergeben sie für jedes Gebrauchsgüterprodukt einen Qualitätswert abhängig vom Produktzustand als positive reelle Zahl auf einer Qualitätsskala zwischen null und eins. Des Weiteren unterteilen sie die Skala in feste Bereiche, welche die Zugehörigkeit zu einer nominalen Qualitätsklasse und damit z.B. auch die Aufarbeitungskosten festlegt. Im Rahmen der Problemstellung optimieren die Autoren die Entscheidung bzgl. des Umgangs mit verfügbaren Gebrauchsgüterprodukten (Aufarbeitung, Ausschachtung bzw. Weiternutzung von Einzelkomponenten sowie direkte Entsorgung). Unter der Hinzunahme limitierter Kapazität bestätigen die Autoren die Erkenntnisse von Aras & Boyaci et al. (2004) und unterstreichen

die Vorteile bzw. die Profitsteigerungen durch eine produktzustandsbasierte Planung im Remanufacturing.

Die Autoren van Wassenhove & Zikopoulos (2010) veröffentlichen ihre Bedenken bzgl. der Zuverlässigkeit der Qualitätszustandserfassung von Gebrauchtpunkten sowie dem damit einhergehenden Mehrwert. **Yanikoğlu & Denizel (2021)** greifen diese Bedenken auf und untersuchen den Einfluss der Unsicherheit in der Einteilung von Produkten in Qualitätsklassen auf die taktische Planung im Remanufacturing. Dazu erweitern sie den Ansatz von Ferguson & Guide et al. (2009), zum einen um unsichere Kosten und zum anderen um unsicheren Kapazitätsbedarf. Des Weiteren belegen sie auch die Sortiervorgänge mit Kosten. Es erfolgt ein simulativer Vergleich des erweiterten mit dem ursprünglichen Ansatz anhand des Anwendungsfalls aus Ferguson & Guide et al. 2009. Yanikoğlu & Denizel (2021) weisen dadurch nach, dass die Sortierung auch unter Unsicherheit noch immer vorteilhaft, jedoch mit beträchtlich geringerem Mehrwert ausfällt.

Sun & Chen et al. (2018) beschäftigen sich analog mit dem Scheduling von in Qualitätsklassen eingeteilten Produktrückläufern. Sie erweitern ihr Modell insbesondere um eine stochastische Verteilung der Anteile jeder Qualitätsklasse. Die Autoren zeigen, dass sich durch die Einlagerung von Produktrückläufern und bedarfsgerechtem Remanufacturing Vorteile gegenüber der Einlagerung von aufgearbeiteten Produkten durch niedrigere Lagerkosten ergeben.

Teunter & Flapper (2011) fokussieren die Beschaffungsplanung im Remanufacturing unter Berücksichtigung unsicherer Gebrauchtpunktzustände und unsicherer Nachfrage. Sie untersuchen verschiedene Produktakquisestrategien mit dem Ziel, die Gesamtkosten zusammengesetzt aus den Beschaffungs-, Aufarbeitungs- und Fehlkosten für eine unbefriedigte Nachfrage zu minimieren. In diesem Zuge führen sie ein Qualitätsklassensystem für Gebrauchtpunkte ein, wobei die Aufarbeitungskosten von der Qualitätsklasse festgelegt wird. Durch Sortierung der Gebrauchtpunkte bei zusätzlichen Sortierkosten wird die Qualitätsklasse eines jeden Gebrauchtpunkts bestimmt. Im Rahmen einer Anwendungsstudie betrachten die Autoren Mobiltelefone mit sechs Qualitätsklassen. Die Autoren zeigen, dass die Vernachlässigung der Zustandsunterschiede eher zu Fehlmengen oder zu einem Überschuss an Gebrauchtpunkten führt. Dies schlägt sich in den Kosten nieder, wobei dieser Effekt mit zunehmender Unsicherheit in der Nachfrage abnimmt.

Ullrich & Buscher (2013) erweitern die reine Core-Akquise zu einem differenzierteren Planungsvorgehen auf Komponentenebene. Dazu betrachten sie variable Komponentenzustände, flexible Demontager Reihenfolgen, flexible Demontagetiefen und End-of-Life-Strategien (EOL) integriert in einem Graph-basierten Prozessplanungsmodell. Die Produktzustände

werden nach Originalität, Funktionsfähigkeit, Beschädigungszustand sowie richtigem oder falschem Materialtyp klassifiziert. Darauf aufbauend erfolgt eine Zuweisung der Komponenten zu einer der drei EOL-Methoden: Entsorgung, Recycling oder Wiedernutzung. Ziel des Ansatzes ist die Profitsteigerung durch die Minimierung der Demontagekosten und die Maximierung der Komponenten bzw. Materialerlöse unter Berücksichtigung limitierter Arbeitszeiten. Unter der Annahme deterministischer Ausführungszeiten wird das Problem als gemischt-ganzzahliges Optimierungsprogramm modelliert und gelöst.

Die bis zu diesem Punkt vorgestellten Arbeiten nutzen Informationen zum Produktzustand auf übergeordneter Planungsebene. In den letzten Jahren sind des Weiteren auch Arbeiten entstanden, welche die Demontagesystemebene fokussieren. Nachstehend werden Ansätze hervorgehoben, welche Produktzustandsinformationen zur Optimierung des Systembetriebs heranziehen. Die folgenden Arbeiten fokussieren das Disassembly Line Balancing (DLB) und könnten auch dem vorherigen Themencluster aus Unterkapitel 3.2 zugeordnet werden.

Riggs & Battaia et al. (2015) erweitern das DLB um die Annahme verschiedener EOL-Zustände von Gebrauchsgüterprodukten. Dabei wirken sich die EOL-Zustände sowohl auf Ausführung, als auch auf die der stochastisch verteilten Dauer zu Grunde liegenden Mittelwerte der einzelnen Demontageaufgaben aus. Aufbauend auf einer Petri-Netz-basierten Modellierung, liegt jeder Zustandsklasse ein individueller Vorranggraph zu Grunde. Somit erlaubt der Ansatz die Berücksichtigung abweichender Produktstrukturen und das Überspringen von Aufgaben für individuelle Zustandsklassen. Zur Lösung des DLB-Problems werden die individuellen Vorranggraphen zunächst in einem stochastischen Vorranggraph zusammengeführt. Letzterer wird dann mit einer generischen Line Balancing Methode gelöst. Im Rahmen der Erprobung ist die Auftretenswahrscheinlichkeit jeder Qualitätsklasse stochastisch verteilt. Verglichen mit einer produktzustandsneutralen Balancing Methode, erzielt der Ansatz einen fast 10 % höheren Durchsatz, verbessert die Stationsauslastung und reduziert effektiv Engpässe.

Analog dazu fokussieren auch **Colledani & Battaia (2016)** die Profitsteigerung von Demontagelinien durch Line Balancing und der Optimierung der Demontagetiefe. Die Autoren berücksichtigen die Produktzustände durch die Einführung eines Qualitätsklassensystems. Analog zu Riggs & Battaia et al. (2015) beeinflusst die Qualitätsklasse die Ausführungsdauer einzelner Tasks. Anders als bei Riggs liegt der Fokus bei den Klassifikationskriterien allerdings auf qualitativen Merkmalen, Abnutzungserscheinungen wie z.B. Kratzern, Korrosion oder Verschmutzung und quantitativen Merkmalen wie Herstellungsdatum oder Gewicht. Der Ansatz wird im Rahmen eines Anwendungsfalls aus der Automobilindustrie validiert. In einem ersten Schritt werden Qualitätsmerkmale mit signifikantem Effekt auf den Demontageprozess identifiziert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen leiten die Autoren sechs Qualitätsklassen

als Basis für ein stochastisches Optimierungsmodell ab. Im Vergleich mit einem zustandsneutralen Ansatz weisen die Autoren das Potential für eine Robustheits- und Effizienzsteigerung der Demontagelinie nach.

Die Forschergruppe um **Bentaha** stellte in mehreren Veröffentlichungen Ansätze für das DLB unter Berücksichtigung von Gebrauchtzuständen vor (Bentaha & Voisin et al. 2019; Bentaha & Voisin et al. 2020; Bentaha & Marangé et al. 2023). Im bis dato jüngsten und detailliertesten Ansatz (Bentaha & Marangé et al. 2023) beschreiben sie ein integriertes Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung effizienter Demontagelinien. Im Gegensatz zu Riggs & Battaïa et al. (2015) und Colledani & Battaïa (2016), welche die Gebrauchtzustände nur auf Produktebene berücksichtigen, unterscheiden Bentaha & Marangé et al. (2023) die Zustände in detaillierterer Form auf Bauteil- und Komponentenebene. Die Ausführungsdauer der Demontageaufgaben unterliegen jeweils Normalverteilungen. In Bentaha & Voisin et al. 2016 wird jeder Komponente ein normalverteilter Zufallswert zugewiesen, der die individuelle Wiederverwendbarkeit widerspiegelt. Bentaha & Marangé et al. (2023) koppeln an diesen Zufallswert direkt die Beschaffungskosten. Die Autoren entwickeln ein nicht-lineares binäres Modell als Kern für die Lösung des definierten Problems. Abschließend validieren sie den Ansatz anhand sieben verschiedener Produkttypen.

3.4 Ansätze zur reaktiven Demontageplanung und -steuerung

Existierend operative ablaforientierte Ansätze stammen häufig aus der Robotik bzw. Automatisierungstechnik und befassen sich mit der Steuerung von Demontagerobotern (Poschmann & Brüggemann et al. 2020; Hjorth & Chrysostomou 2022). Im Gegensatz dazu sind die folgenden Ansätze verstärkt auf Systemebene verortet. Der Fokus liegt weniger auf den technischen Gesichtspunkten der Demontageprozesse, sondern auf der Optimierung der Systemleistung und der Steigerung der Produktivität aus organisatorischer Sicht, wobei die Grenzen in der bestehenden Literatur in diesem Aspekt häufig verschwimmen. Auch die nachfolgenden Ansätze haben Schnittmengen mit den vorherigen zwei Themenclustern. Sie grenzen sich jedoch durch einen reaktiven Handlungsrahmen und einen dynamisch-operativen, der Demontagesteuerung zuordenbaren Charakter ab und sind deshalb im Kontext dieser Arbeit von erhöhter Relevanz.

Geiger & Zussmann et al. (1996) setzen für die Demontageplanung auf einen prädiktiv-reaktiven Ansatz mithilfe von Bayes'schen Netzen. Basierend auf vorab zugänglichen Produktinformationen, z.B. zur Produktstruktur, wird zunächst ein initialer Demontageplan für ein Produkt erstellt. Mit Beginn der Demontage werden dann weitere Informationen zum Produkt und zum tatsächlichen Produktzustand gesammelt und für die reaktive Aktualisierung des Plans genutzt. Der Plan baut dabei auf einem Bayes'schen Netzwerk auf, welches die

Ausprägungen verschiedener Produktzustände und Demontageoperationen mittels Zufallsvariablen miteinander in Relation setzt. Erkenntnisse zum tatsächlichen Produktzustand oder zu bereits durchgeführten Operationen, wie z.B. Erfolg oder Misserfolg, werden verwendet, um die Werte im Netzwerk zu aktualisieren und somit die Eignung aller Folgeoperationen, z.B. die Erfolgswahrscheinlichkeiten zu bewerten. Das Ziel der probabilistischen Planungsmethodik ist die Reduktion der Demontagekosten.

Weitere Arbeiten der Forschergruppe um **Zussmann**, die sich mit der adaptiven Prozessplanung für die Demontage befassen, sind Zussman & Meltser 1997; Zussman & Zhou 1999; Salomonski & Zussman 1999; Zussman & Zhou 2000. Die Arbeiten weisen große Schnittmengen auf und bauen in Teilen aufeinander auf. Ein wesentlicher Unterschied ist der Übergang von AND/OR-Graphen (in Geiger & Zussmann et al. 1996; Zussman & Meltser 1997) zu Petri-Netzen, erstmals eingeführt in Zussman & Zhou 1999, für die Repräsentation der Produktstruktur und der Demontageschritte sowie deren Vorrangsbeziehungen.

Zussman & Zhou (2000) nutzen ebenfalls die Petri-Netz-basierte Repräsentation und berücksichtigen alternative Demontagesequenzen sowie scheiternde Prozesse in Abhängigkeit der Gebrauchtproduktzustände. Außerdem beziehen die Autoren den Wert der individuellen Produktkomponenten und den in Kosten ausgedrückten Aufwand jeder Demontageaufgabe mit ein. Ihr Ziel ist dabei die Ermittlung der optimalen Demontagesequenz (und Demontagetiefe) durch Ermittlung der Sequenz mit dem größten Gesamtwert. Probabilistische Werte wie die Erfolgswahrscheinlichkeiten der Demontageaufgaben basieren auf Erfahrungen und werden kontinuierlich mit gemessenen Ist-Werten aktualisiert. Erfolgsraten, Kosten und Restwerte sind weiterhin direkt in das Petri-Netz integriert und bilden einen ausführbaren Graphen. Damit erlaubt der Ansatz eine Planung und Korrektur der Demontagesequenz in Echtzeit. Die Autoren erproben den Ansatz anhand der roboterbasierten Demontage eines Radios bestehend aus sieben Einzelteilen.

Tang & Zhou et al. (2001) präsentieren und modellieren ein roboterbasiertes flexibles Demontagesystem sowie einen adaptiven Planungs- und Steuerungsansatz. Mit Letzterem streben sie sowohl eine Optimierung der Systemleistung, als auch eine Optimierung des EOL-Werts der zurückgewonnenen Komponenten an. Das System sieht neben verschiedenen lose verketteten Arbeitstationen¹ mit unterschiedlichen Fähigkeiten zur Abarbeitung von Demontageaufgaben auch Einheiten für die Produktinspektion und -sortierung vor. Auch in diesem Ansatz kommen Petri-Netze zum Einsatz. Die Einplanung von Aufträgen erfolgt basierend auf Informationen zum EOL-Wert der Komponenten eines Auftrags sowie der Auslastung der Stationen in einem zweistufigen Ansatz. Damit wird nach Erstinspektion zunächst

¹ Diese bestehen aus mehreren Maschinen die parallel Tasks abarbeiten können, daher entsprechen sie im Deutschen und in dieser Arbeit eher Arbeitsbereichen.

die Demontagetiefe bestimmt und ggf. direkt eine Entsorgung veranlasst. Für alle anderen Aufträge folgt im zweiten Schritt die Zuweisung der individuellen Demontageaufgaben auf die Demontageressourcen unter Berücksichtigung der Echtzeit-Ressourcenkapazität. Diese hat einen entscheidenden Einfluss auf den Systemdurchsatz. Die Validierung erfolgt mithilfe eines Simulationsmodells anhand der Demontage von Computeraltgeräten. Im Vergleich mit der vollständigen Demontage aller Aufträge können die Autoren die Ausbringung signifikant erhöhen. Dabei werden jedoch einige Vereinfachungen angenommen, z.B. unterliegen die Zeiten aller Demontageaufgaben derselben Verteilung, unabhängig vom Produktzustand. Die Möglichkeit des Prozessscheiterns wird vernachlässigt.

Guide & Souza et al. (2005) untersuchen Prioritätsregeln für das Scheduling von Aufträgen in Remanufacturing-Systemen mithilfe von Warteschlangenmodellen. In Anlehnung an den Anwendungsfall der Jet-Turbinen-Refabrikation legen sie den Modellierungsfokus vorrangig auf die Aufarbeitung. Diese besteht aus mehreren Arbeitsstationen, während die Demontage als Einzelprozess mit lediglich einer Warteschlange abgebildet wird. Die Autoren vergleichen die simple *First-come-first-served*-Regel (FCFS) mit Regeln, welche einzelnen Komponenten eine erhöhte Priorität zuweisen. Sie weisen u.a. nach, dass eine differenziertere Priorisierung erst bei einer Systemauslastung $> 65\%$ eine effektive Verbesserung gegenüber FCFS erreicht.

In **Kim & Ciupek et al. 2006** und **Kim & Harms et al. 2007** stellen die Autoren ein Steuerungskonzept für hybride Demontagesysteme vor. Der Steuerungsansatz erstreckt sich von der Planungsebene bis zur Ebene der Zellsteuerung. Im Fokus steht die Demontagesequenzplanung. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Demontagewerkzeugen und der technologischen Realisierbarkeit der Demontageprozesse werden Demontageaufgaben den vorhandenen Produktionsressourcen zugeordnet. Die Steuerung berücksichtigt dabei Produktzustandsinformationen, die einer dem Produkt zugeordneten, sogenannten *Life-Cycle-Unit* entstammen und Informationen zum Produkt bzw. dem Produktlebenszyklus enthalten.

Duta & Henrioud et al. (2007) präsentieren einen Ansatz für die Allokation von Demontageaufgaben auf verfügbare Stationen in einer Demontagelinie. Berücksichtigt werden zum einen die Möglichkeit fehlender Komponenten und zum anderen der Einsatz destruktiver und nicht-destruktiver Demontageprozesse. Wie im Ansatz von Tang & Zhou et al. (2001) steht die Maximierung des EOL-Werts sowie eine hohe Auslastung aller Stationen in der Demontagelinie im Fokus. Anders als zuletzt erfolgt die Lösungsfindung jedoch nicht mehrstufig, sondern in einem integrierten Schritt mithilfe eines stochastischen Algorithmus. Mit einer Rechenzeit im niedrigen Millisekundenbereich zeichnet sich der verwendete stochastische Algorithmus insbesondere durch seine Echtzeitfähigkeit aus.

ElSayed & Kongar et al. (2012) beschreiben einen Ansatz für die Demontagesequenzplanung in einer Roboterzelle. Dabei handelt es sich um einen reaktiven Sequenzgenerator basierend auf einem genetischen Algorithmus. Aufbauend auf einer bekannten Teilstückliste, den segmentierten Bilddaten und den detektierten Komponenten eines integrierten Kamerasystems, erlaubt der Ansatz eine flexible echtzeitfähige Ableitung zuverlässiger Demontagesequenzen. Die Zielfunktion fokussiert die Reduktion der Gesamtdemontagedauer. Als Produktanwendungsfall dient ein ausrangierter Personal Computer.

Hrdina & Zülch (2017) entwickeln eine reaktive Steuerung für manuelle Demontagelinien. Sie gehen von einer bereits leistungsabgestimmten Demontagelinie aus und präsentieren ein adaptiv-dynamisches Verfahren, mit dem auf Störungen reagiert werden kann. Hierzu stellen sie Maßnahmen für die Demontagesteuerung vor, die auf den der Demontage inhärenten Freiheitsgrade aufbauen. Das Steuerungsverfahren wählt unter Berücksichtigung des Arbeitstakts und der genannten Maßnahmen jeweils die Demontagefolge, welche die Stationsauslastung sowie den Demontageerlös maximiert. Das Verfahren wird für ein Demontagesystem mit vier Stationen, drei Produktvarianten und beta-verteilten Demontagezeiten simulativ erprobt. Die Einsteuerung der Varianten erfolgt im zyklischen Wechsel. Im Vergleich mit einer zufälligen Maßnahmenauswahl zeigt das Verfahren eine deutliche Verbesserung in Auslastung und Erlös.

Paschko & Knorn et al. (2023) präsentieren ein Auftragsfreigabeverfahren für eine hybride Remanufacturing-Linie. Dabei berücksichtigen sie die Unsicherheit durch variable, vom Zustand der Gebrauchtsprodukte abhängige Prozesszeiten. Sie entwickeln ein Auftragsfreigabeverfahren basierend auf Reinforcement Learning und vergleichen dieses simulativ mit einem gewöhnlichen Conwip-Verfahren anhand der Zielgrößen Durchsatz, Umlaufbestand und Stationsauslastung. Das Freigabeverfahren nutzt dabei u.a. in Vektorform verpackte Informationen zum Gebrauchtsproduktzustand. Neben der im Kontext dieser Arbeit relevanten Integration der Produktzustände in die Steuerungsentscheidung sowie dem Ziel der Leistungssteigerung, ist der Detaillierungsgrad des Systems limitiert. So wird die Demontage als einer von fünf abgeschlossenen Prozessschritten ohne Arbeitsteilung und weitere Freiheitsgrade betrachtet.

3.5 Ansätze zur Kapazitätsplanung und rekonfigurierbaren Produktionssystemen im Remanufacturing

Zunächst erfolgt eine Vorstellung bestehender Arbeiten zur Kapazitätsplanung im Remanufacturing und der Produktaufarbeitung. Diese beschränken sich i.d.R. nicht nur auf die Demontage, sondern behandeln mehrere Schritte in der Remanufacturing-Prozesskette (Guide & Spencer 1997; Guide & Srivastava et al. 1997; Kim & Jeong et al. 2005; Franke &

Basdere et al. 2006; Georgiadis & Athanasiou 2013; Eickemeyer & Herde et al. 2014; Lee & Doh et al. 2015). Anschließend werden zwei Arbeiten betrachtet, welche sich explizit mit dem Potential rekonfigurierbarer zirkulärer Produktionssystemen auseinandersetzen (Eguia & Lozano et al. 2011; Andersen & Brunoe et al. 2022).

Motiviert von erhöhten Stückzahlschwankungen im Remanufacturing, stellen **Guide & Spencer (1997)** einen Kapazitätsplanungsansatz für die Aufarbeitung von Gebrauchsgütern vor. Ihr Fokus liegt dabei primär auf Engpassressourcen, d.h. Arbeitsstationen mit erfahrungsgemäß zu geringer Kapazität, deren Kapazitätsbedarf aufbauend auf Produktstücklisten ermittelt wird. Dabei berücksichtigt der Ansatz Prozesszeitschwankungen, die Aufarbeitungsrate der Komponenten sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Komponente aufgrund der flexiblen Bearbeitungsreihenfolge von Produkten. Der Ansatz richtet sich als Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung an Manager in der Remanufacturing-Industrie.

Guide & Srivastava et al. (1997) greifen den Ansatz aus Guide & Spencer 1997 auf und vergleichen diesen mit weiteren konventionellen auf das Remanufacturing angepassten Kapazitätsplanungsansätzen. Ziel ist die Ermittlung der Stationsauslastung in einem Job Shop mit einer fixen Anzahl an Arbeitstationen. Die Ansätze werden in einer mehrperiodigen Simulationsstudie erprobt und mit klassischen Kapazitätsplanungsmethoden aus der Linearproduktion verglichen. Die Länge einer Planungsperiode beträgt konstant drei Monate. Die modifizierten Ansätze, wie der Ansatz aus Guide & Spencer 1997, welche die für das Remanufacturing typischen Gegebenheiten wie z.B. Routingalternativen oder variable Aufarbeitungsraten berücksichtigen, liefern signifikant bessere Ergebnisse.

Kim & Jeong et al. (2005) formulieren zwei zusammenhängende mathematische Modelle für die strategische und operative Planung im Remanufacturing. Ersteres ermöglicht die Bestimmung der optimalen Investitionsstrategie für die Teilschritte Sammlung, Demontage und Aufarbeitung. Die jeweiligen Kapazitäten sind proportional zum Investitionsumfang. Mit dem operativen Planungsmodell lassen sich die optimalen Stückzahlen für verschiedene Produkttypen und für jeden Teilschritt unter Berücksichtigung der zuvor festgelegten Kapazität ermitteln. In beiden Modellen steht die Kosteneinsparung als Zielgröße im Vordergrund.

Franke & Basdere et al. (2006) entwickeln einen Ansatz für die Planung und periodische Anpassung von hybriden Remanufacturing-Systemen für die Aufarbeitung gebrauchter Mobiltelefone. Das Konzept umfasst die Kapazitäts- und Programmplanung für verschiedene Produktvarianten. Abhängig vom Gesamt- bzw. Komponentenzustand vorliegender Gebrauchsgüter, können die erforderlichen Kapazitäten für die Identifikation, Prüfung, manuelle und automatisierte Demontage, Remontage sowie die Aufarbeitung alternativ mit

einem exakten oder heuristischen Optimierungsverfahren bestimmt werden. Schließlich erfolgt die Erprobung der Kapazitätskonfiguration mittels Simulationsmodell. Dabei kann die Systemleistung sowie die erforderlichen Ressourcen für Transport und Lagerhaltung ermittelt werden. Der Ansatz betrachtet die Demontage nur oberflächlich. Außerdem geht der Ansatz nicht über das Konzeptstadium hinaus. Es fehlt eine (simulative) Erprobung.

Georgiadis & Athanasiou (2013) untersuchen Skalierungsstrategien für die Kapazität von Remanufacturing-Systemen in der Rückwärtslogistik. Die Basis ihrer Langzeitplanung bildet der Nachfrageverlauf über den ganzen Produktlebenszyklus. Mithilfe eines Optimierungsansatzes basierend auf System Dynamics vergleichen die Autoren die Möglichkeit einer frühen großskaligen Investition mit einer flexiblen, der Nachfrage schrittweise folgenden Kapazitätsanpassung. Die Untersuchung der Strategien erfolgt im Rahmen unsicherheitsbehafteter Marktszenarien. Die Autoren zeigen, dass durch flexible Skalierungsstrategien Überinvestitionen effektiv vermieden werden können.

Eickemeyer & Herde et al. (2014) präsentieren einen Kapazitätsplanungsansatz für die Reparatur und Wartung komplexer Investitionsgüter am Anwendungsfall von Flugzeugtriebwerken. Der Arbeitsaufwand für die Aufarbeitung ist unsicherheitsbehaftet und abhängig vom Objektzustand. Diese Relation wird von den Autoren mittels Bayes'scher Netze modelliert. In der Langzeitplanung nutzen die Autoren ein exaktes Verfahren zur Bestimmung des Kapazitätsbedarfs, unterteilt in manuelle und maschinelle Ressourcen sowie externe Dienstleister. Die Planung erfolgt monatlich über einen Zeitraum von einem Jahr. In der mittelfristigen Planung werden die Ressourcen auf Wochenbasis spezifischen Kostenstellen zugewiesen. In der kurzfristigen Planung erfolgt schließlich eine konkrete Auftragsallokation auf Tagesbasis über einen Zeitraum von einer Woche.

Lee & Doh et al. (2015) betrachten die Kapazitäts- und Produktionsplanung für kombinierte Fertigungs- und Remanufacturing-Systeme. Als Grundlage dienen Stückzahlverläufe verschiedener Produkttypen über einen aus mehreren Perioden bestehenden Planungshorizont basierend auf einer gegebenen Kundennachfrage. Die von den Autoren definierte Problemstellung umfasst die Bestimmung der Fertigungs- und Remanufacturingkapazitäten sowie die Planstückzahlen je Produktgruppe für die Fertigung, das Remanufacturing und die Fremdbeauftragung. Ihr Ziel ist die Minimierung der Kosten. Diese setzen sich aus Stillstands-, Betriebs-, Lager- und Fremdvergabekosten zusammen. Stillstandskosten werden durch die Kapazitätsanpassungen hervorgerufen und sind damit vergleichbar mit Rekonfigurationskosten. Aufgrund der Komplexität des Problems präsentieren die Autoren zwei heuristische Verfahren zur Problemlösung, die in der Validierung annähernd optimale Ergebnisse liefern.

Eguia & Lozano et al. (2011) definieren den Term Reconfigurable Disassembly System (RDS, dt.: Rekonfigurierbare Demontagesysteme) als das Pendant zum Reconfigurable Manufacturing System (RMS) in der Zirkulärwirtschaft. Die Autoren definieren RDS als automatisierte Systeme, welche sich durch Agilität und eine skalierbare, modulare Struktur schnell an Stückzahlschwankungen und Änderungen im Variantenmix anpassen können. Des Weiteren stellen die Autoren eine zweistufige Methode für das Scheduling, Sequencing und das Design eines RDS vor. Um die Produktivität des Systems (z.B. durch reduzierten Rüstaufwand) zu erhöhen, gruppieren sie zunächst Produkte mit ähnlichen Demontageanforderungen. Anschließend identifizieren sie die optimale Reihenfolge für die Abarbeitung der Produktgruppen unter Berücksichtigung der anfallenden Rekonfigurationskosten und der Ressourcenauslastung. Für die Problemlösung nutzen sie neben dem hierarchischen Clustering ein exaktes Optimierungsverfahren.

Andersen & Brunoe et al. (2022) untersuchen simulativ das Einsatzpotential modularer rekonfigurierbarer Produktionssysteme für das Remanufacturing. Als Nebenaspekte inkludieren sie außerdem den Mehrwert einer intensivierten Produktinspektion und -sortierung sowie Informationsverarbeitung. Die Arbeit baut auf den Herausforderungen eines Remanufacturing-Unternehmens auf, die im Rahmen einer Fallstudie identifiziert wurden. Drei Variationen für rekonfigurierbare Systeme sowie ein an die Fallstudie angelehntes System werden jeweils einer Untersuchung unterzogen. Die rekonfigurierbaren Systemkonzepte unterscheiden sich dabei u.a. in Skalierbarkeit, Automatisierungsgrad, Inspektionskonzept und Investitionsumfang. Unter Annahme eines über fünf Jahre andauernden linearen Stückzahlwachstums für Produktrückläufer, wird ein stochastisches Modell zur Evaluation der Systemtypen entwickelt. Die mittels Monte-Carlo Simulation generierten Evaluationsergebnisse unterstreichen das Potential der rekonfigurierbaren Systemtypen. Die besten Ergebnisse für die Ressourcenauslastung bei günstigstem Kapitalwert erreicht dabei ein plattformbasierter rekonfigurierbarer Systemtyp, welcher die feinschrittigste Systemanpassung zulässt. Die Genauigkeit des präsentierten stochastischen Modells ist eingeschränkt. So werden z.B. die bei einer Rekonfiguration entstehenden Anlaufverluste vernachlässigt.

3.6 Bewertung des Forschungsdefizits und Ableitung von Forschungsfragen

Es folgt eine zusammenfassende Bewertung der in den vergangenen Unterkapiteln diskutierten Forschungsansätze anhand der definierten Anforderungen für die Demontageplanung und -steuerung (DPS) von agilen hybriden Demontagesystemen (AHDS) und die Ableitung des Forschungsdefizits. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der Forschungsarbeiten sowie den Erfüllungsgraden der individuellen Anforderungen.

Die **Forschungsarbeiten aus Unterkapitel 3.2**, die eine rein planerisch-organisatorische Sicht auf die Demontage auf Fabrikebene einnehmen, sind rein prädiktiver Natur und nicht für eine adaptive Systemsteuerung geeignet. Auch wenn in diesen Arbeiten ein Hauptaugenmerk auf der Unsicherheitsbewältigung liegt, werden wichtige Eigenschaften wie Produktzustände oder die Gefahr scheiternder Operationen in der Planung mehrheitlich nicht antizipiert. Ein robuster Systembetrieb kann nicht gewährleistet werden. Weiterhin stehen in arbeitsteiligen Demontagesystemen trotz mangelnder Flexibilität in erster Linie taktgebundene Demontagelinien im Fokus. Roboterbasierte Systeme werden als Teil geschlossener Mensch-Roboter-Zellen untersucht. Es fehlt jedoch das Verständnis für lose verkettete, arbeitsteilige hybride Systeme und geeigneten Verfahren für die Aufgabenverteilung innerhalb dieser Systeme.

Die **Forschungsarbeiten aus Unterkapitel 3.3**, die sich differenzierter mit dem Einfluss der Gebrauchtzustände und Qualitätsklassensystemen auseinandersetzen, sind mehrheitlich der Beschaffungsplanung zuzuordnen und auf Supply-Chain-Ebene verortet. Die wenigen Ansätze, welche der Fabrikebene zugewandt sind, sind strikt prädiktiv und beschränken sich auf manuelle Demontagelinien.

Die **Forschungsarbeiten aus Unterkapitel 3.4** zu reaktiven DPS-Ansätzen erfüllen die Anforderungen für einen dynamischen Systembetrieb. Damit kommen sie trotz vermehrt prozesstechnischem Fokus dem gesuchten Zielsystem der AHDS-Ablaufsteuerung am nächsten. Bestehende Steuerungsansätze sind jedoch insbesondere auf lose verkettete Systeme in Matrixstruktur zu erweitern. Weiterhin ist die Generalisierbarkeit der Ansätze fraglich. Des Weiteren fehlen Erkenntnisse zum industriellen Einsatz scheiteranfälliger Demontageroboter in hybriden Systemen bei erhöhter Produktvielfalt. Hier werden industrietaugliche Steuerungsverfahren benötigt, die auf ein komplexes Umfeld ausgelegt sind und einen robusten und wettbewerbsfähigen Betrieb ermöglichen. Weiterhin mangelt es bestehenden Verfahren mehrheitlich an einer die Realität hinreichend genau abbildenden simulativen Erprobung.

Generell existieren wenige Ansätze, welche die Kapazitätsplanung in der Demontage fokussieren. Die **Forschungsarbeiten aus Unterkapitel 3.5** sind entweder auf die gesamte Remanufacturing-Prozesskette ausgerichtet und abstrahieren die Demontage oder tangieren das Thema Kapazitätsplanung nur am Rande. Trotz hoher Volatilität in der Kreislaufwirtschaft sind dem Autor keine systematischen Methoden bekannt, die eine differenzierte, auf Demontagefabriken abgestimmte Ermittlung von Soll-Kapazitäten unter Berücksichtigung der Gebrauchtzustände ermöglichen. Im Zuge der Entwicklung von AHDS mangelt es insbesondere an geeigneten Verfahren für die bedarfsgesteuerte Systemrekonfiguration zur Entlastung des Menschen sowie der Minimierung von Auslastungsverlusten.

Es kann zusammengefasst werden, dass bislang keiner der existierenden Ansätze die in Unterkapitel 3.1 festgehaltenen Anforderungen für die Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme hinreichend erfüllt. Aufbauend auf diesem Forschungsdefizit kann die Zielsetzung (vgl. Unterkapitel 1.3) um die Beantwortung der folgenden forschungsleitenden Fragestellungen konkretisiert werden:

1. Die Flexibilität agiler Demontagesysteme erfordert eine geeignete Repräsentation als Grundlage für die Ablaufsimulation und -organisation. Dabei sollen systemseitig die Modularität der Matrixstruktur sowie die Eigenschaften manueller und automatisierter Demontageressourcen berücksichtigt werden. Produktseitig sollte die Produktvarianz, die Divergenz der Produktstrukturen sowie insbesondere die Produktzustände als Hauptquelle der Unsicherheit einbezogen werden. Die Modellierung soll dabei die Abbildung verschiedenster Produkt- und Systemkonfigurationen zulassen. In Ergänzung zu Teilziel 1 ergibt sich die auf die **Systemrepräsentation** bezogene **Forschungsfrage 1: Wie können die Komplexitäten agiler Demontagesysteme sowie gebrauchter Produkte in einem integrierten Modell abgebildet werden?**
2. Der Betrieb agiler Demontagesysteme erfordert eine Steuerung, welche neben den im vorherigen Punkt genannten Komplexitäten, das Scheiterrisiko flexibler Roboter berücksichtigt. Ablaufentscheidungen sollten dabei auf dem Produkt- und Systemzustand aufbauen. Dabei soll die Systemsteuerung eine hohe Kennzahlenausprägung in verschiedenste Systemkonfigurationen, Produktspektren und für variierende Zielgewichtungen ermöglichen und industrietauglich sein. Insbesondere soll eine effektive Roboterintegration sowie die damit einhergehende Entlastung des Menschen bewirkt werden. In Ergänzung zu Teilziel 2 ergibt sich die auf den **Systembetrieb** bezogene **Forschungsfrage 2: Wie kann eine adaptive Systemsteuerung für einen robusten und leistungsmaximierenden hybriden Demontagebetrieb gestaltet werden?**
3. Die Rekonfigurierbarkeit des agilen Demontagesystems erlaubt eine dynamische Antwort auf schwankende Produktionsprogramme. Die Anpassung der Systemkapazität erfordert dazu eine auf die Gebrauchtprodukt-demontage spezialisierte Kapazitätsplanung. Analog zur Systemsteuerung soll diese eine fähigkeitsbasierte Verteilung der Demontageaufgaben unter Berücksichtigung der Zustände der zu demontierenden Gebrauchtprodukte erlauben. Durch eine genaue Auslegung des Systems und der Systemkapazität werden sowohl Auftragsrückstände als auch Auslastungsverluste vermieden. In Ergänzung zu Teilziel 3 ergibt sich die auf die **Systemadaption** bezogene **Forschungsfrage 3: Wie kann eine gezielte Systemrekonfiguration zur Anpassung der Systemkapazität für einen kostenoptimierten Betrieb erreicht werden?**

	Handlungs- feld DPS			System- modellierung				Produkt-/Prozess- modellierung					Bewertung		
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
Reaktive Demontageplanung und -steuerung															
Geiger 1996	◐	●	○	○	○	○	○	●	○	●	○	●	○	○	○
Zussman '97, '99, '00	◐	●	○	○	●	◐	○	●	○	◐	○	●	○	○	○
Tang 2001	●	●	○	●	●	○	○	●	○	●	○	○	●	○	●
Guide 2005	◐	◐	○	◐	○	○	○	○	◐	○	○	○	●	○	●
Kim 2006, 2007	◐	●	○	◐	●	●	○	●	●	●	○	●	○	○	○
Duta 2007	●	●	○	○	○	○	○	●	◐	○	○	○	●	○	◐
El Sayed 2012	◐	●	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○	●	○	○
Hrdina 2017	●	●	○	○	○	○	○	●	◐	○	○	●	●	○	●
Paschko 2023	●	●	○	○	◐	◐	○	○	◐	●	●	◐	●	○	●
Kapazitätsplanung und rekonfigurierbare Systeme in der Demontage															
Guide 1997a, 1997b	◐	○	●	●	○	○	◐	●	○	○	○	○	●	○	○
Kim 2005	◐	○	◐	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	○
Franke 2006	◐	○	●	○	●	●	●	○	●	●	●	○	●	●	◐
Eguia 2011	●	○	◐	●	◐	○	●	○	●	○	○	○	●	○	○
Georgiadis 2013	◐	○	●	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	●
Eickemeyer 2014	◐	○	◐	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	●	○	○
Lee 2015	◐	○	●	○	○	○	◐	○	●	○	○	○	●	○	○
Andersen 2022	◐	○	◐	○	●	●	●	○	◐	◐	◐	○	◐	○	●

4 Überblick über den Lösungsansatz

Motiviert durch die Zielsetzung, die Forschungsfragen sowie das Forschungsdefizit, erfolgt in diesem Kapitel ein Überblick über den fokussierten Lösungsansatz. Dazu wird in Unterkapitel 4.1 das Zielsystem eingegrenzt mit einer Differenzierung der Stationstypen im Demontagesystem, der Einbettung des Demontagesystems in ein transparentes Rückwärtslogistiknetzwerk sowie der Aufstellung ergänzender Annahmen. Anschließend wird in Unterkapitel 4.2 das Lösungsvorgehen geschildert. Teile der entwickelten Methode basieren auf den vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten¹ A_Michel 2020, A_Mak 2022, A_Müller 2022, A_Bail 2023 und A_Feuerstein 2023.

4.1 Eingrenzung des Zielsystems

4.1.1 Abgrenzung der Stationstypen im Demontagesystem

Das AHDS integriert neben manuellen Stationen (MS), flexible Roboterstationen (FRS) sowie starr-automatisierte Stationen (AS). Die Systemmodellierung orientiert sich am Aufbau der hybriden AgiProbot-Fabrik für die Demontage von Elektrokleinmotoren. Diese Arbeit entstand im Rahmen des gleichnamigen von der Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Forschungsprojekts AgiProbot, vgl. Lanza & Asfour et al. 2022.

In diesem Abschnitt erfolgt eine durchgängige und disjunkte Definition der Stationstypen in idealisierender Form. Besonderes Augenmerk liegt dabei insbesondere auf der Beschreibung und Abgrenzung der flexiblen Roboterstation (vgl. Abschnitt 2.3.4) von der starr-automatisierten Station aus betriebsorganisatorischer Sicht unter Berücksichtigung der sich aus dem technischen Entwicklungsstand ergebenden Implikationen. Dabei orientiert sich diese Arbeit an technischen Konzepten wie etwa Vongbunyong & Chen 2015 und Lanza & Asfour et al. 2022.

Die Demontage an der **manuellen Station (MS)** erfolgt händisch durch einen Werker (vgl. Abbildung 2.8a). Sie umfasst entsprechend einen manuellen Arbeitsplatz. Wie bereits heute, ist dieser als **flexibelste Ressource** zur Übernahme **sämtlicher Demontageaufgaben** befähigt. Die MS scheitert dabei nie, d.h. die Erfolgswahrscheinlichkeit liegt bei 100 %². Die MS ist einerseits ein Garant für einen robusten Systembetrieb, andererseits ist sie jedoch **kostenintensiv**. Alleinstehend stellt sie außerdem keinen Fortschritt zum heutigen

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.

² Bereits heute erfolgt die Demontage meist vollständig manuell bzw. mechanisch unterstützt. Kann der Werker eine Demontageaufgabe nicht erfüllen, existieren keine alternativen Handlungsmöglichkeiten. Das Demontageobjekt muss im Remanufacturing folglich als Ausschuss deklariert werden. Da Ausschuss jedoch vernachlässigt wird, s. Abschnitt 4.1.3, ergibt sich eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 100 %.

Industriestandard dar. Um die Abhängigkeit vom Mensch zu verringern und ihn zu entlasten, muss der Arbeitsanteil der MS reduziert werden.

Die **flexible Roboterstation (FRS)** (vgl. Abbildung 2.7) inhäriert alle Eigenschaften des flexiblen Roboters wie bereits in Abschnitt 4.1.1 definiert und wird wie folgt spezifiziert:

1. **Probabilistische Operationen:** Anders als in der konventionellen Automatisierung folgen die flexiblen Roboter keinem statischen Programmablauf mit vordefinierten Trajektorien oder Greif- und Schraubposen. Zur Durchführung einer Demontageaufgabe wählen sie vielmehr abhängig vom Gebrauchtzustand die passende Demontagestrategie. Dazu werden sie durch kognitive Fähigkeiten und Entscheidungskompetenz (vgl. Abschnitt 2.3.4) befähigt. So generieren sie für variierende Einspannungen eines Demontageobjekts individuell-geeignete Trajektorien oder veranlassen eine Neupositionierung oder einen Werkzeugwechsel. So wird eine effektive Durchführung von Demontageaufgaben unter Unsicherheit möglich (Vongbunyoung & Chen 2015, S. 95). Die durchzuführenden Demontageoperationen lassen sich jedoch im Vorfeld nicht mehr exakt präzisieren. Die Ausführungsdauer ist wie beim Mensch stochastisch verteilt.
2. **Scheiteranfälligkeit:** Durch die Unsicherheit kann eine erfolgreiche Ausführung von Demontageoperationen nicht durchgängig garantiert werden. So können Demontageoperationen scheitern, wenn das Anforderungsprofil einer Demontageaufgabe die Fähigkeiten der flexiblen Roboterstation übersteigt. Das Prozessscheitern beruht hier auf defizitären Fähigkeiten und ist strikt vom konventionellen (Maschinen-)ausfall, z.B. aufgrund von Werkzeugbruch o.Ä., zu trennen. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist, dass anders als bei einem Ausfall, kein Stationsstillstand gefolgt von einer Reparatur erfolgt. Stattdessen kann der Stationsbetrieb an der flexiblen Roboterstation nach einer gescheiterten Operation unmittelbar an einem anderen Demontageobjekt weitergeführt werden. Um das zuvor gescheiterte Demontageobjekt weiterzuverarbeiten, ist wiederum eine Neuallokation für eine manuelle Durchführung erforderlich, die als **Backup-Operation** bezeichnet wird. Das Scheitern einer Demontageoperation wird, anders als der Stationsausfall, nicht als außerordentliches Ereignis verstanden, sondern als ein in Kauf zu nehmendes **Risiko**, welches durch die **Erfolgswahrscheinlichkeit** einer Operation quantifiziert werden kann. Backup-Operationen werden stets an der MS durchgeführt.
3. **Vollautonomer Robotereinsatz:** Um den menschlichen Arbeitsaufwand durch wechselseitiges Arbeiten am selben Demontageobjekt mit potentiellen Wartezeiten für den Mensch effektiv zu reduzieren, wird auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration verzichtet.

Das flexible Robotersystem bildet eine eigenständige Station im agilen Demontagesystem. Hier gilt die Annahme, dass ein flexibler Roboter eine laufende Operation selbstständig, z.B. zeitgesteuert, als gescheitert deklarieren und den Abtransport für eine manuelle Nacharbeit veranlassen kann. Diese erfolgt wiederum dezentral durch den Mensch an einer eigenständigen manuellen Station des AHDS.

4. **Definierte Arbeitsinhalte:** Eine Demontage unbekannter Produkte ist nicht vorgesehen. Stattdessen wird von bekannten Produkten mit bekannter Struktur und einem definierten Umfang einer Demontageaufgabe ausgegangen (vgl. Laili & Wang et al. 2022 Teilziel 1 und 2). Es kann auf eine virtuelle Repräsentation der Produkte wie z.B. CAD-Modelle zurückgegriffen werden, was die Ableitung einer geeigneten Zerlegestrategie für eine Demontageaufgabe erleichtert (Lanza & Asfour et al. 2022, S. 511).
5. **Semi-universelle Einsetzbarkeit:** Ausgestattet mit flexiblen Spannsystemen und Endeffektoren sind die flexiblen Roboter für eine Vielzahl von Demontageaufgaben einsetzbar (vgl. Teilziel 2 Laili & Wang et al. 2022). Eine Spezialisierung einzelner Instanzen der flexiblen Roboter erfolgt nicht, bzw. wird als nicht erforderlich angenommen. Stattdessen werden die flexiblen Robotersysteme als universell einsetzbare Demontageressourcen betrachtet. Diffizile Demontageaufgaben bleiben jedoch weiterhin dem Menschen vorbehalten. Verglichen mit der manuellen Station ergibt sich daher ein eingeschränkter Fähigkeitsraum.

Die FRS dient der Entlastung des Menschen, ist jedoch mit Unsicherheit und einer im direkten Vergleich mit der MS potentiell geringeren zeitlichen Produktivität verbunden. Sowohl die Effektivität als auch die Effizienz der FRS hängen von der technologischen Reife ab.

Demontagevorrichtungen (DV) werden im Rahmen von rekonfigurierbaren aber **starr automatisierten Stationen (MS)** operationalisiert (vgl. Abbildung 2.8b). An den Stationen des automatisierten Stationstyps werden ausgewählte Demontageaufgaben in **deterministischer** Form realisiert. Zur weiteren Abgrenzung von der FRS gilt die vereinfachende Annahme, dass Demontageoperationen an einer AS nicht scheitern. Die Ausführungsdauer ist konstant und entspricht einer bekannten Nenndauer. Der Fähigkeitsraum einer Stationsinstanz setzt sich aus den Fähigkeiten installierter Vorrichtungen, wie z.B. Schraub- oder Pressvorrichtungen zusammen³. Die AS ist demnach keine Universalressource. Wie die FRS stellt die AS eine Möglichkeit zur Entlastung des Menschen dar. Darüber hinaus steht die AS für eine effiziente Demontage. Das Aufgabenfeld ist mangels Störungstoleranz im Vergleich mit

³ Hierbei baut das System auf der Annahme einer modularen Systemarchitektur wie der fluiden Automatisierung vgl. Wurster & Häfner et al. 2021 auf, die eine Installation und Inbetriebnahme neuer Vorrichtungen bei geringem Aufwand zulässt.

der FRS jedoch auf **Routineaufgaben** beschränkt, d.h. klar definierte, möglichst standardisierbare und häufig wiederkehrende Aufgaben mit geringem Störungsrisiko und hohem Automatisierungspotential.

Die Eigenschaften der technischen Stationstypen FRS und AS überschneiden sich womöglich in der Praxis. Um die Komplexität der Modellierung einzugrenzen und auf die später folgenden Untersuchungen zu fokussieren, erfolgt die Abgrenzung hier in idealisierter Form möglichst trennscharf. Prinzipiell ist jedoch auch eine Abbildung von Mischtypen denkbar.

Abbildung 4.1 zeigt eine Zusammenfassung der charakteristischen Merkmale der Stationstypen (oben) sowie ein Ausschnitt der AgiProbot-Demonstrator-Fabrik (unten). Unten in der Abbildung sind die drei Stationstypen und die Demontagevorrichtung der automatisierten Station hervorgehoben. Die manuelle Station in der AgiProbot-Fabrik weist einen Laborcharakter auf, ist im weiteren Sinne jedoch als Einzelarbeitsplatz mit Werkbank und universellen Werkzeugen und Spannvorrichtungen zu verstehen, analog zu den manuellen Arbeitsplätzen im Remanufacturing heute.

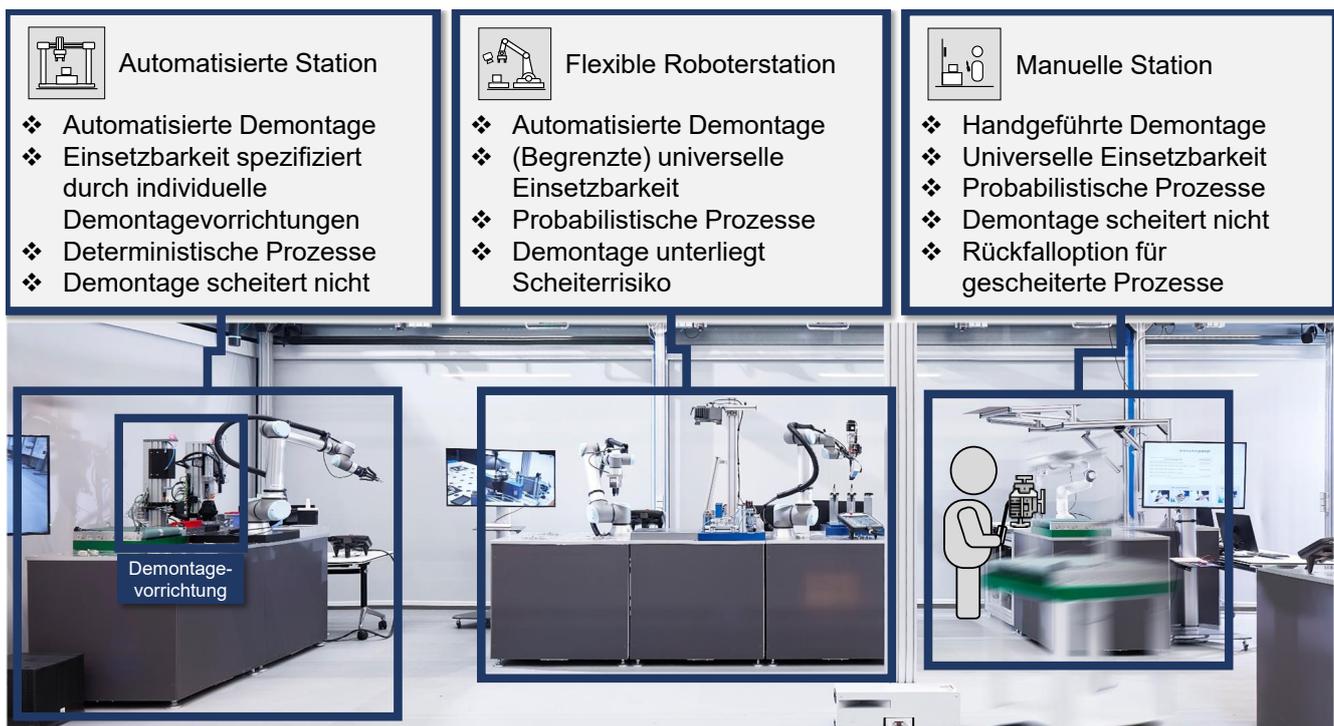


Abbildung 4.1: Oben: Charakterisierung der manuellen Station, der flexiblen Roboterstation und der (starr) automatisierten Station; Unten: Ausschnitt aus der AgiProbot-Demonstratorfabrik am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie mit Hervorhebung der Stationstypen

4.1.2 Einbettung in ein transparentes Rückwärtslogistiknetzwerk

Im Rahmen des vorliegenden Lösungsansatzes erfolgt der Betrieb des agilen Demontagesystems durch einen Remanufacturer, der wiederum selbst ein Teilsystem eines transparenten Rückwärtslogistiknetzwerks darstellt, vgl. Klenk 2023. Das zu Grunde liegende Netzwerk mit Material- und Informationsflüssen ist in vereinfachter schematischer Form in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Aufbau sowie die beteiligten Akteure sind an die Praxis der Remanufacturing-Industrie im Automobilsegment angelehnt, vgl. Abschnitt 2.2.5. Gebrauchte Produkte werden hierbei zunächst von verschiedenen Quellen, wie z.B. Core-Brokern oder Werkstätten beschafft, in Sortierzentren gesammelt, befundet und sortiert. Anschließend erfolgt eine vom Aufarbeitungsprozess entkoppelte Einlagerung in einem Sammelager für Gebrauchte Produkte. Der Abruf aus dem Sammelager erfolgt schließlich auftragsbezogen basierend auf einem Produktionsprogramm, welches sich grob aus der Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten bzw. nach demontierten Komponenten ergibt. Diese ergeben sich lose basierend auf dem Auftragseingang eines Kunden, der unter Einhaltung einer bestimmten Vorlaufzeit aufgearbeitete Produkte beim Remanufacturer bestellt. Nach Berücksichtigung von hier nicht weiter betrachteten Ausschussraten ergibt sich die abzurufende Menge an Gebrauchten Produkten aus dem Sammelager (Klenk 2023), die hier dem Produktionsprogramm der Demontage entspricht.

Der Abruf von Gebrauchten Produkten aus dem Sammelager entspricht dem Pull-Prinzip. Die eigentliche Belieferung des Remanufacturers und Weiterverarbeitung erfolgt wiederum periodisch nach dem Push-Prinzip, wobei ein jeweils in Art und Menge bekannter und fixer Mix an Gebrauchten Produkten das Eingangslager des Remanufacturers erreicht. Die ab Periodenbeginn bereitstehenden Gebrauchten Produkte warten dann auf die Auftragsfreigabe für die Demontage im AHDS, auf welcher der Fokus dieser Arbeit liegt. Im Anschluss folgen sämtliche Aufarbeitungsschritte bis zur Auslieferung der Remanufacturing-Produkte an den Kunden. Während die Anlieferung der Gebrauchten Produkte jeweils Just-in-Time vor Beginn einer Produktionsperiode abgeschlossen wird und die Demontage bis zum Periodenende abgeschlossen sein sollte, werden die Aufarbeitungsschritte entkoppelt betrachtet und fallen außerhalb des Betrachtungsrahmens. Für das Demontagesystem wird vereinfachend von einem zeitlich strikt **in Produktionsperioden unterteilten Produktionsbetrieb** ausgegangen.

In Erweiterung konventioneller Netzwerke wird von einer **erweiterten Produktbefundung** in den Sortierzentren ausgegangen. Zur Transparenzsteigerung erfolgt dazu eine Qualitätsbeurteilung der Gebrauchten Produkte, vgl. Klenk 2023. Konkret wird ein **Quality Grading** auf Produktebene durchgeführt, das die Einteilung der Gebrauchten Produkte in Qualitätsklassen umfasst, die mit der Ausführungsdauer sowie dem Erfolg der Demontageprozesse in

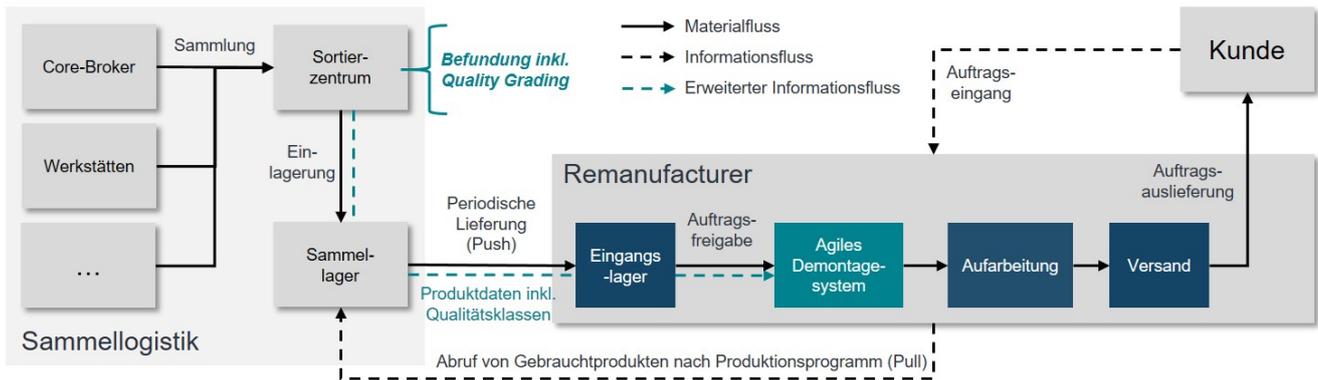


Abbildung 4.2: Einbettung des AHDS in ein Rückwärtslogistiknetzwerk mit erweiterter Produktbefundung und durchgängigem Informationsfluss

Verbindung stehen. Weiterhin erfolgt ein **erweiterter Informationsfluss** im Rückwärtslogistiksystem. Informationen zu Art, Menge und Qualitätsklasse werden so nach der Sortierung mit dem Remanufacturing-Betrieb geteilt und können in der DPS berücksichtigt werden. Je Produktionsperiode liegt der DPS im Vorfeld mit einer gewissen Vorlaufzeit ein **definitives Produktionsprogramm** vor.

4.1.3 Ergänzende Annahmen

Im Rahmen des vorliegenden Lösungsansatzes gelten die folgenden ergänzenden Annahmen:

1. Um eine individuelle Behandlung der hochvariablen und unsicherheitsbehafteten Demontageobjekte zu ermöglichen, durchlaufen die Aufträge das Demontagesystem individuell in **Losgröße 1**.
2. Die Produktstruktur und die durchzuführenden **Demontageaufgaben sind im Vorfeld bekannt**, vgl. Abschnitt 4.1.1. Die tatsächliche schwankende Ausführungsdauer der Demontageschritte liegt der DPS im Regelfall jedoch nicht vor und basiert auf Schätz- oder Planzeiten. Selbiges gilt für die Erfolgswahrscheinlichkeit bestimmter Demontageoperationen.
3. Die komplette Demontage eines Produkts ist ein **mehrstufiger arbeitsteiliger Prozess**. Aus einem Demontageschritt können mehrere Unterbaugruppen resultieren, die eine individuelle Weiterverarbeitung erfordern. Der **Materialfluss kann divergieren**.
4. Je nach Produktstruktur, kann die Reihenfolge der durchzuführenden Demontageaufgaben frei gewählt werden.
5. Es erfolgt stets eine **vollständige Demontage**.
6. **Ausschuss** wird **vernachlässigt**.

7. Kleinere Störungen werden durch eine **stochastische Modellierung** der Demontageprozesse abgebildet.
8. **Stationsausfälle** durch größere Störungen und Wartungsarbeiten werden **vernachlässigt**.
9. Die nach einer gescheiterten Operation erforderlichen **Backup-Operationen** sind wie reguläre Operationen spezifiziert.
10. Die Ressourcen im System sind mit entsprechender Informations- und Kommunikationstechnologie ausgestattet und untereinander **vernetzt**. Im weiteren Sinne entspricht das AHDS einem **cyber-physischen Produktionssystem** (Kellner & Lienland et al. 2022, S. 356 ff.). Demontageoperationen werden kontinuierlich getracked und die Daten stehen der DPS als Entscheidungsgrößen zur Verfügung.
11. Instanzen des gleichen Stationstyps (MS, FRS oder AS mit gleicher Demontagevorrichtung) besitzen jeweils den **gleichen Fähigkeitsraum**. Die Ausführungsdauern und Erfolgswahrscheinlichkeiten je Demontageaufgabe sind je Stationstyp jeweils gleich⁴.
12. Das Demontagesystem kann **rekonfiguriert** werden. Die Rekonfiguration ist jeweils zum Ende einer abgeschlossenen Produktionsperiode möglich. Im Rahmen einer Rekonfiguration wird die Systemkonfiguration, d.h. die Art und Anzahl der Stationen verändert. Dabei müssen die Kapazitätsflexibilität und die Reaktionszeiten berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 2.2).

4.2 Beschreibung des Vorgehens

Aufbauend auf der Zielsetzung (vgl. Unterkapitel 1.3), dem Forschungsdefizit und den Forschungsfragen (vgl. Unterkapitel 3.6) sowie der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Systemeingrenzung gestaltet sich der Lösungsansatz wie folgt (vgl. Abbildung 4.3):

Zur **Erreichung von Teilziel 1 - Systemrepräsentation** wird in Unterkapitel 5.1 ein **Referenzmodell** eingeführt, welches die Systemkomplexitäten, die verschiedenen Demontageressourcen sowie die Produkte in Zusammenhang setzt und daran die Spezifikation der Demontageoperationen koppelt. In einem zweiten Schritt wird in Unterkapitel 5.2 das System mit seiner Architektur, seinen Systemkomponenten, Funktionen, Relationen und Betriebsmodi modelliert. Zum Abschluss der Modellierung werden in Unterkapitel 5.3 zeit-, kapazitäts- und kostenbezogene Zielgrößen abgeleitet. Diese werden in der Entwicklung der DPS-Teilsysteme (im weiteren Verlauf auch als **DPS-Verfahren** bezeichnet) berücksichtigt und schließlich zu

⁴ Bei den FRS wird von einer Vernetzung bzw. einer gemeinsamen Wissensbasis sowie einer identischen Hardware (verwendetes Robotermodell, Spannvorrichtungen, Werkzeuge) ausgegangen. Für die Demontage an der MS werden ausschließlich Experten eingesetzt. Lerneffekte und systematische Abweichungen zwischen den Fähigkeiten der Werker, die sich z.B. durch unterschiedliche Physis oder Geschicklichkeit ergeben, werden vernachlässigt.

deren Evaluation herangezogen.

Zur **Erreichung von Teilziel 2 - Systembetrieb** wird in Unterkapitel 5.4 zunächst der Prozessablauf der Auftragsbearbeitung definiert. Für die Systemsteuerung werden die Aufgabenfelder Auftragsfreigabe und Auftragsallokation identifiziert und untersucht⁵. Für die Auftragsfreigabe wird ein modifiziertes Conwip-Verfahren präsentiert. Für die reaktive Auftragsallokation werden wiederum Prioritätsregeln definiert und in einem parametrierbaren dezentralen Multi-Prioritätsregelverfahren kollektiv eingesetzt.

Zur **Erreichung von Teilziel 3 - Systemadaption** wird die Parametrierung des Auftragsallokationsverfahrens in Unterkapitel 5.5 automatisiert (Logikadaption). Dazu werden verschiedene metaheuristische Suchverfahren eingeführt. In Unterkapitel 5.6 werden anschließend Verfahren für die Kapazitätsplanung eingeführt, welche die Anpassung des Systems an eine schwankende Auftragslast erlauben (Strukturadaption). Das Hauptverfahren basiert auf einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsansatz. Es inhäriert das zuvor definierte Referenzmodell und balanciert vorausschauend den Einsatz von Menschen, flexiblen Robotern und Demontagevorrichtungen. Dabei werden die Betriebs- und Logistikkosten minimiert. Dem vorgelagert wird ein analytisch-heuristisches Planungsverfahren als simple parametrierbare Planungsmethode und als Benchmark für das exakte Verfahren eingeführt.

Die DPS-Verfahren sowie das agile Demontagesystem werden in einer ausführbaren Ablaufsimulation abgebildet. Eine Beschreibung der prototypischen Modellierung erfolgt in Unterkapitel 5.7.

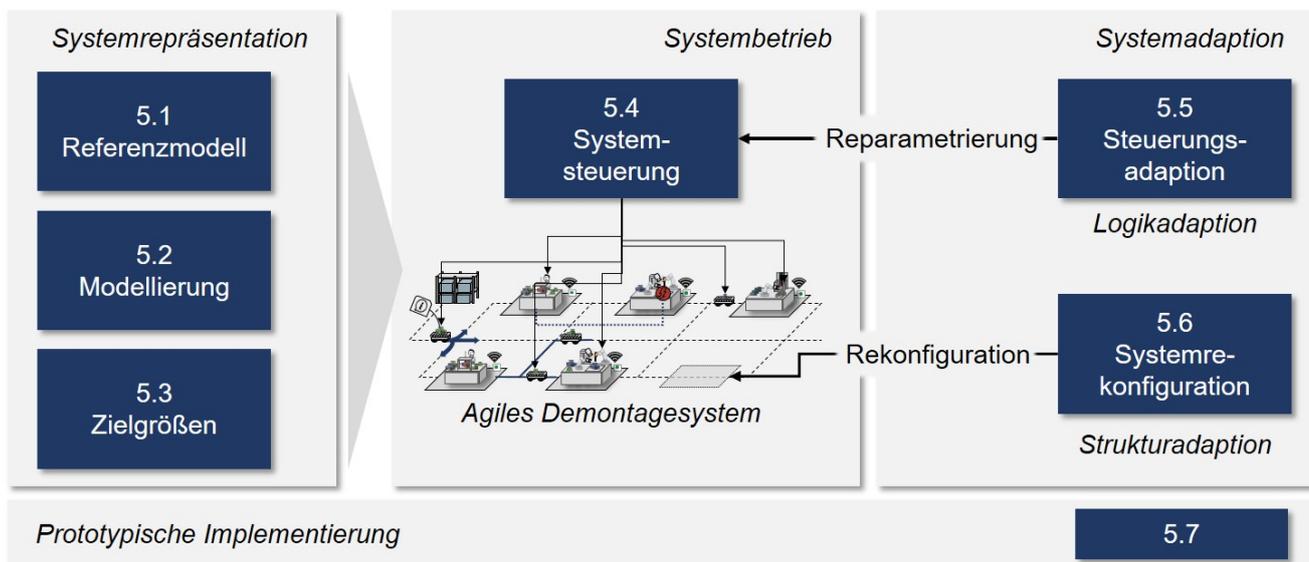


Abbildung 4.3: Überblick über den Lösungsansatz

⁵ Eine Reihenfolgeplanung, d.h. die Festlegung der Auftragsfolge (vgl. Abschnitt 2.1.4), ist überflüssig für die Systemauslastung und Leistung in der Matrixproduktion (Greschke 2020, S. 237) und wird daher vernachlässigt.

5 Methodik zur Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme

5.1 Beschreibung eines Referenzmodells

In diesem Unterkapitel wird ein modulares, fähigkeitsorientiertes Referenzmodell für die organisatorische Handhabung hybrider Demontagesysteme vorgestellt. Nach der Motivation und Einführung des Modells in Abschnitt 5.1.1 werden die einzelnen Sichten des Referenzmodells detailliert beschrieben, beginnend mit der Ressourcensicht in Abschnitt 5.1.2 und der Produktsicht in Abschnitt 5.1.3. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.1.4 mit der Operationssicht die Vereinigung und die Verknüpfung der produkt- und ressourcenbezogenen Sichtweisen. Neben der Strukturierung wird in diesem Abschnitt eine einheitliche Nomenklatur für das hybride Demontagesystem eingeführt, die auch in den nachfolgenden Abschnitten Gültigkeit besitzt.

5.1.1 Modelleinführung

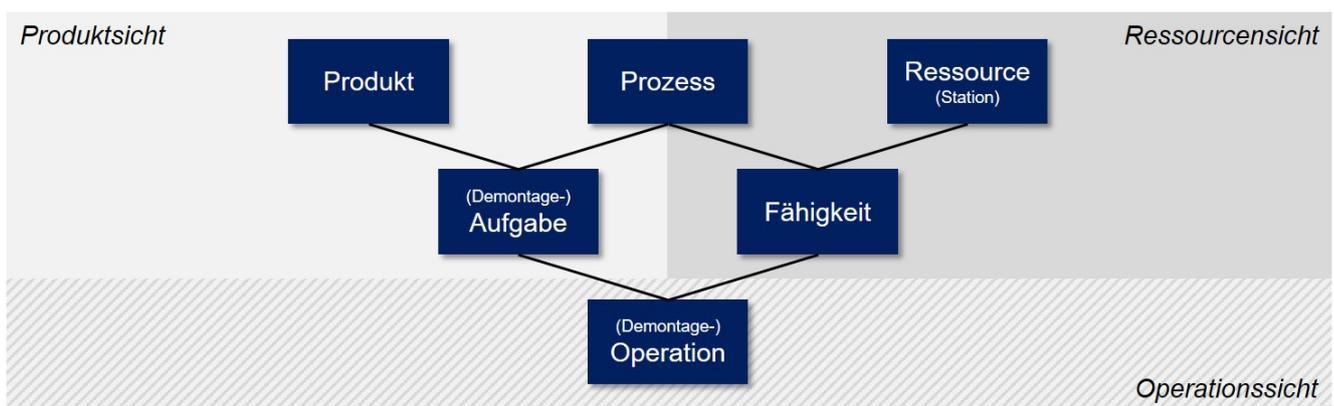


Abbildung 5.1: Referenzmodell bestehend aus einer Produkt-, einer Ressourcen- und einer Operationssicht (in Anlehnung an Pfrommer & Klein et al. 2022)

Von dem in dieser Arbeit betrachteten agilen Demontagesystem wird eine hohe Variantenflexibilität gefordert. Weiterhin sollte eine zielgerichtete Arbeitsteilung zwischen den manuellen und automatisierten Demontageressourcen erfolgen, um einen effizienten Systembetrieb zu ermöglichen. Dies erfordert eine selektive Zuteilung der Demontageaufgaben auf die Ressourcen, orientiert an ihren individuellen Fähigkeiten¹.

Als Grundlage für die Organisation des Demontagesystems und um eine flexible Aufgabenzuweisung zu ermöglichen, wird folgend ein im Kern auf dem etablierten PPR-Schema (für

¹ Fähigkeitsorientierung spielt z.B. im Kontext der Planung hybrider Montagesysteme mit Mensch-Roboter-Kooperation (Beumelburg 2005) oder modular-aufgebauter Montagesysteme (Kluge 2011) eine wichtige Rolle.

Produkt-Prozess-Ressource, Pfrommer & Stogl et al. 2015, S. 793) aufbauendes Modell eingeführt. Es besteht aus einer neutralen Produktsicht, einer neutralen Ressourcensicht sowie deren Zusammenführung. Abbildung 5.1 zeigt das Referenzmodell mit dem Produkt, dem Prozess und der Ressource, die über Aufgaben bzw. Fähigkeiten und Operationen miteinander in Verbindung stehen. Das gezeigte PPR-Schema in seiner Grundform basiert auf Pfrommer & Stogl et al. 2015 und wurde in Pfrommer & Klein et al. 2022 auf die Demontage bzw. das Remanufacturing übertragen. Ein Demontage**prozess** in Verbindung mit einer bestimmten **Produktvariante**, z.B. das Lösen einer bestimmten Schraube der Produktvariante, versteht sich als Demontage**aufgabe**. Die Aufgabe ist insofern abstrakt, als dass sie nicht im Zusammenhang mit einer **Ressource** steht. Ob eine Zuweisung zu einer Ressource letztlich möglich ist, entscheidet wiederum der (abstrakte) **Fähigkeitsraum** der Ressource. Ein automatischer Schrauber verfügt z.B. über die Fähigkeit *Ausschrauben*. Kann eine Demontageaufgabe erfolgreich einer Ressource zugewiesen werden, ist die Ausführung der Demontageaufgabe im Rahmen einer Demontage**operation** an der Ressource möglich. Hinter einer Demontageoperation steht a) eine konkrete Arbeitsanweisung für einen Mensch oder b) ein ausführbares und passendes Programm für eine automatisierte Ressource. Damit kann eine Demontageoperation, anders als die Demontageaufgabe, quantitativ bewertet werden. Daher erlaubt das beschriebene Referenzmodell sowohl eine unabhängige Beschreibung von Produkten und Ressourcen, als auch die Vernetzung über die Befähigung einer Ressource zu einer Demontageaufgabe sowie direkte Vergleichbarkeit über die Ebene der Demontageoperationen². Es folgt eine detaillierte Ausführung mit jeweils einer Vorstellung der Ressourcen-, Produkt- und Operationssicht.

5.1.2 Ressourcensicht

Unter dem generischen Begriff Demontageressource werden alle technischen und nicht-technischen Mittel verstanden, die an der Durchführung der Demontage beteiligt sind, vgl. Abschnitt 2.3.1. Demontagestationen oder einfach nur Stationen, aus denen sich das agile Demontagesystem zusammensetzt, stellen Demontageressourcen dar. Umgekehrt entspricht eine Demontageressource jedoch nicht immer gleich einer Station. Für die zwei Handlungsfelder Systembetrieb und Systemadaption ergibt sich dabei eine leicht abweichende Begriffsverwendung.

Jede Station s im System ist eine Instanz genau eines Stationstyps $st \in ST$ mit $ST = \{MS, FRS, AS\}$, vgl. Abschnitt 4.1.1. Mit den Teilmengen S_{MS}, S_{FRS}, S_{AS} ergibt sich somit

² Das Referenzmodell liefert die Grundlage für ein Matching von Aufgaben und Fähigkeiten. Auf eine technische Auseinandersetzung mit dem Fähigkeitsraum einer Ressource wird in dieser Arbeit jedoch verzichtet. Für weitere Informationen zur semantischen Beschreibung von Aufgaben und Fähigkeiten sei z.B. auf Pfrommer & Klein et al. 2022 und für einen vertikal integrierten Steuerungsansatz, der neben der Systemsteuerung auch die Anlagensteuerung abdeckt, sei wiederum auf Wurster & Klein et al. 2022 verwiesen.

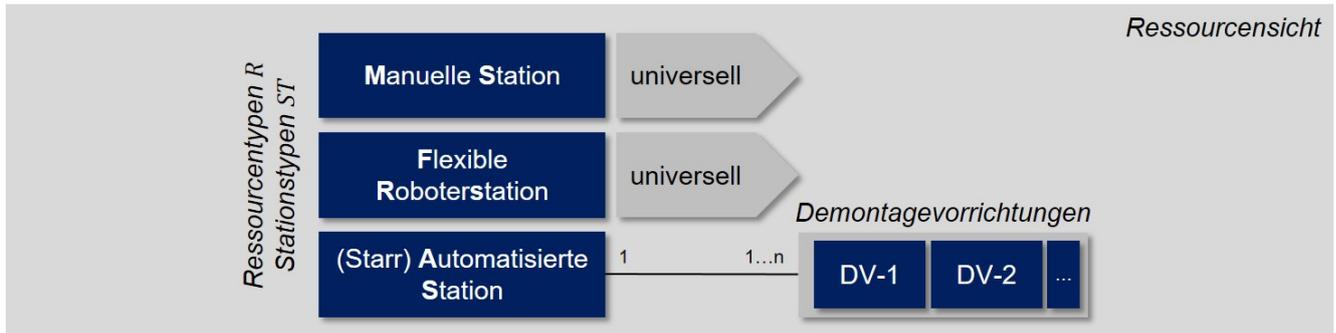


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Ressourcensicht

$(s \in S_{MS}) \vee (s \in S_{FRS}) \vee (s \in S_{AS})$. Entsprechend folgt $S = S_{MS} \cup S_{FRS} \cup S_{AS}$ als die Gesamtmenge der Stationen. Für die **Ablaufsteuerung** im **Systembetrieb** stehen die Stationen im Fokus. Sie entsprechen hier der kleinsten produktiven Einheit im System, können immer genau eine Demontageoperation durchführen und werden für die Dauer der Operation gebunden. Aus ablauforganisatorischer Perspektive entspricht das System einem klassischen Job Shop. Konkret erfüllt es dabei die Kriterien eines *flexiblen Job Shops mit Mehrzweckressourcen* (Acker 2011, S. 22 f.).

Eine Demontagestation besteht aus mindestens einer Demontageressource und **operationalisiert** diese im Systembetrieb. Im Rahmen der **Systemadaption** stehen die Demontageressourcen im Fokus. So definieren sich die Fähigkeitsräume der AS-Instanzen über die ihnen zugewiesenen Demontagevorrichtungen DV. Für eine vollständige Menge aller verschiedener DV-Typen $R_{DV} = \{DV1, DV2, \dots\}$ gilt für die einer Station s zugewiesene DV: $R_s \neq \emptyset \forall s \in S_{AS}$ wobei $R_s \subseteq R_{DV}$. Anders als für die AS entsprechen der manuelle Arbeitsplatz der MS und das flexible Robotersystem der FRS nicht weiter zerlegbaren Ressourcen mit jeweils einem gleichbleibenden Fähigkeitsraum. Der Stationstyp entspricht hier dem Ressourcentyp. Es gilt $R_s = MS \forall s \in S_{MS}$ und $R_s = FRS \forall s \in S_{FRS}$. Aus der Schnittmenge aller Ressourcen ergibt sich demnach die für die **Kapazitätsplanung** relevante Menge aller Ressourcentypen $R = \{MS, FRS, DV1, DV2, \dots\}$ mit dem individuellen Ressourcentyp $r \in R$.

Abbildung 5.2 zeigt schematisch die Ressourcensicht mit der universellen MS und FRS und der je nach installierter Demontagevorrichtung spezialisierten AS.

5.1.3 Produktsicht

Die Unsicherheit im Remanufacturing und in der Demontage ist auf den Umgang mit Gebrauchsgüterprodukten zurückzuführen. Der Repräsentation und Modellierung der Gebrauchsgüterprodukte kommt daher eine wichtige Rolle zu.

Ein zu demontierendes Produkt durchläuft das Demontagesystem als **Demontageauftrag** o . Der Demontageauftrag ist eine Instanz einer Produktvariante $v \in V$, mit V als der Menge aller Produktvarianten. Eine Produktvariante wird vollständig definiert mit den durchzuführenden Demontageaufgaben A_v , einem demontageorientierten Vorranggraphen dpn_v und einer Menge von Qualitätsklassen Q_v , vgl. Abbildung 5.3. Eine Produktvariante wird hier somit mit dem Tripel $v = (A_v, dpn_v, Q_v)$ vollständig beschrieben.

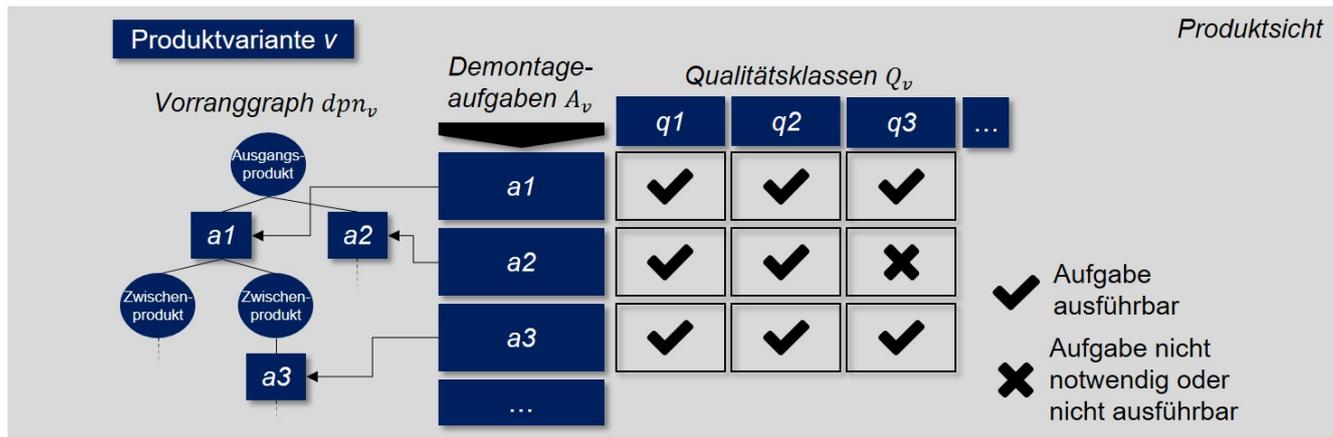


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Produktsicht

5.1.3.1 Repräsentation der Demontevorrangsbeziehungen

Analog zum Montagevorranggraph in der Montage erfordert auch die Demontageplanung und -steuerung für jede Produktvariante eine explizite Beschreibung der Relationsbeziehungen der Demontageaufgaben, vgl. Abschnitt 2.3.3.3. In dieser Arbeit werden **Demontage-Petri-Netze (DPN)** als Planungsgrundlage verwendet.

DPN wurden von Moore & Gungor et al. (1998) eingeführt und von Zussman & Zhou (1999) das erste Mal mathematisch beschrieben. Durch eine kombinierte Komponenten- und Vorgangsrepräsentation liefern DPN in dieser Arbeit eine ideale Grundlage für die Planung und Steuerung. Nach Reisig (2010) sind Petri-Netze gerichtete Graphen mit zwei verschiedenen Knotentypen: Plätze (auch Stellen genannt) und Transitionen. **Plätze** modellieren immer passive Komponenten, wie z.B. **Zustände** und werden als **Kreise** oder Ellipsen dargestellt. **Transitionen** stehen wiederum für aktive Komponenten, die einen Zustand verändern können und werden als **Quadrat** oder **Rechtecke** dargestellt. Die Verbindung zwischen einem Platz und einer Transition erfolgt über **gerichtete Kanten**, die graphisch als Pfeil dargestellt werden. Plätze sind stets über Transition miteinander verbunden. Eine Kante verbindet niemals zwei Plätze oder zwei Transitionen. (Reisig 2010)

Im Folgenden werden DPN aufbauend auf der Definition von Zussman & Zhou (1999) und Tang & Zhou et al. (2001) genutzt. DPN lassen sich wie folgt vollständig als **Quintupel** beschreiben (vgl. Wurster & Michel et al. 2022):

$$dpn = (KnoP, KnoT, KanE, KanA, Mark) \quad 5.1$$

mit:

1. $KnoP = \{knop_1, knop_2, \dots, knop_m\}$ als eine endliche Menge von Plätzen. Hierbei handelt es sich um die Baugruppen bzw. Unterbaugruppen und Einzelkomponenten (Blattknoten) im System. Der Wurzelknoten $knop_1$ steht außerdem für das vollständige Produkt vor der Demontage. $KnoP$ ist mit einer Produktstückliste vergleichbar.
2. $KnoT = \{knot_1, knot_2, \dots, knot_n\}$ als eine endliche Menge von Transitionen. Die Transitionen entsprechen den Demontageaufgaben A .
3. $KanE : KnoP \times KnoT \rightarrow \{0,1\}$ als Eingangsfunktion, welche die Menge der gerichteten Kanten zwischen einem Platz und einer Transition festlegt, wobei $KanE_{ij} = 1$ gilt, wenn $knop_i$ einen Eingangsknoten von $knot_j$ darstellt.
4. $KanA : KnoP \times KnoT \rightarrow \{0,1\}$ als Ausgangsfunktion, welche die Menge der gerichteten Kanten zwischen einer Transition und einem Platz festlegt, wobei $A_{ij} = 1$ gilt, wenn $knop_i$ ein Ausgangsknoten von $knot_j$ darstellt.
5. $Mark : KnoP \rightarrow \{0,1\}$ ist ein Markierungsvektor, dessen i -te Position festlegt, ob sich eine Marke aktuell in der Stelle $knop_i$ befindet. Für den Ausgangszustand eines Produkts gilt $mark_0(knop_1) = 1$ und $mark_0(knop_i) = 0 \forall knop_i \in KnoP \setminus \{knop_1\}$

Abbildung 5.4 zeigt ein Demontage-Petri-Netz für ein exemplarisches Produkt mit vier Einzelkomponenten. Den Komponenten wird analog zu Zussman & Zhou 1999 jeweils ein Buchstabe aus dem Alphabet zugewiesen. Eine Baugruppe wird entsprechend durch die Zusammenstellung mehrerer Buchstaben symbolisiert, dabei handelt es sich um die Baugruppenkennung g . Hierdurch wird der Graph neben den Vorrangsbeziehungen um Informationen zur Produktstruktur angereichert (Komponentensicht). Weiterhin gilt im Speziellen für DPN:

- Jedes DPN ist azyklisch mit je einem Wurzelknoten.
- Jede Transition hat maximal einen Eingangsplatz.
- Jede Transition hat mindestens zwei Ausgangsplätze.
- Ist ein Knoten ein Eingangsplatz für mehrere Transitionen (wie z.B. der Wurzelknoten ABCD in Abbildung 5.4), kann zwischen mehreren Reihenfolgeoptionen gewählt werden.

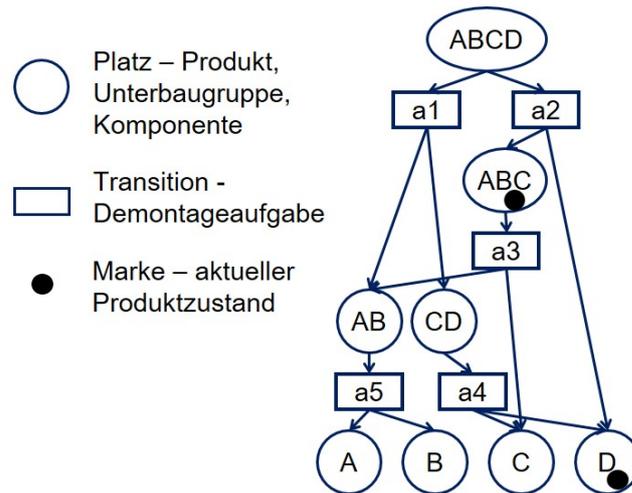


Abbildung 5.4: Demontage-Petri-Netz eines exemplarischen Produkts mit vier Komponenten

Mit den beschriebenen Charakteristika eignet sich das DPN zur Repräsentation divergierender Produktstrukturen sowie alternativer Routingoptionen. Über Marken (vgl. Abbildung 5.4 in Platz *ABC* und Platz *D*) lässt sich der Demontagezustand einer konkreten Produktinstanz abbilden. Das DPN erlangt einen ausführbaren Charakter. Sind alle Blattknoten, d.h. die Komponenten mit Marken besetzt, ist die Demontage vollständig abgeschlossen.

5.1.3.2 Repräsentation der Produktzustände

Neben der Produktstruktur beeinflusst der **Qualitätszustand** der Produkte die Durchführbarkeit und ggf. die Durchführung der Demontageaufgaben und wird daher in dieser Arbeit als zusätzliche Planungsdimension betrachtet. Für die Zustandsrepräsentation sind verschiedene Systeme anwendbar. Hierzu zählt z.B. der Einsatz von Zustandsvektoren (Wurster & Michel et al. 2022). Ein Zustandsvektor erlaubt die Abbildung einer beliebigen Menge von Zustandsmerkmalen. Durch eine stetige Skalierung der Merkmalsausprägungen ist darüber hinaus eine Abbildung unikatler Produkte möglich. Dieser Ansatz führt jedoch zu einer erhöhten Planungskomplexität sowie Problemen bei der Beschreibung von Zustands-Wirkungs-Beziehungen. Im Folgenden wird stattdessen eine Systematik basierend auf **Qualitätsklassen** eingesetzt. Demontageaufträge o , d.h. konkrete Instanzen einer Produktvariante v , werden dabei je einer diskreten nominalen Qualitätsklasse $q \in Q_v$ zugeteilt. Die Art und Anzahl der Qualitätsklassen kann für verschiedene Produktvarianten einheitlich oder individuell gewählt werden. Für Letzteres kann dann für zwei beliebige Produktvarianten v_1 und v_2 gelten $Q_{v_1} \neq Q_{v_2}$ und $|Q_{v_1}| \neq |Q_{v_2}|$. Die Definition der Qualitätsklassen kann individuell anhand verschiedener Kriterien erfolgen. Anders als in den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Ansätzen, steht in dieser Arbeit dabei nicht der Restwert oder die Wiederverwendbarkeit der Komponenten im Fokus, sondern die Wirkung des Produktzustands auf die Demontageaufgaben. Eine sinnvolle Klassifizierung orientiert sich daher an Abnutzungserscheinungen (z.B. Korrosion, Verschleiß,

Verschmutzung) oder fehlenden Komponenten. Die Qualitätsklasse kann die Durchführbarkeit oder die Notwendigkeit zur Durchführung einzelner Demontageaufgaben beeinflussen, vgl. plakativ a2 für q3 in Abbildung 5.3. Fehlen bereits bestimmte Komponenten einer Gebrauchtproduktinstanz, sind die Aufgaben zur Demontage dieser Komponenten obsolet. Für die von q abhängigen potentiell-durchführbaren Demontageaufgaben gilt $A_{v,q} \subseteq A_v$.

Die Vorteile des Qualitätsklassensystems liegen in der einfachen Handhabung. Observierte Wirkzusammenhänge lassen sich eindeutig zuweisen. Die Anzahl der Qualitätsklassen und der Granularitätsgrad kann frei und abhängig vom Anwendungsfall gewählt werden. Einerseits sind so pragmatische Ansätze mit nur wenigen Qualitätsklassen auch in der Industrie realisierbar, selbst dann, wenn nur auf eine eingeschränkte Datenbasis aufgebaut werden kann. Andererseits ist der Ansatz skalierbar und lässt bei erweiterter Datenbasis eine feingranulare kombinierte Betrachtung verschiedener Zustandsmerkmale mit mehrfach abgestuften Merkmalsausprägungen zu.

5.1.4 Operationssicht

Eine einer Ressource bzw. Station zugeordnete Demontageaufgabe manifestiert sich als Demontageoperation, vgl. Abbildung 5.1. Die Operationssicht vereint damit die Ressourcen- und Produktsicht. Abbildung 5.5 stellt die Operationssicht anhand des Operationsraums einer Demontageaufgabe a einer Produktvariante v schematisch dar. Die Ressourcentypen werden dazu den Qualitätsklassen Q_v gegenübergestellt. Ob eine spezifische Demontageaufgabe a einer bestimmten Produktvariante v an einer Station durchgeführt werden kann, hängt von der spezifischen Qualitätsklasse q und den Fähigkeiten des Stations- bzw. Ressourcentyps st bzw. r ab. Nicht durchführbare Operationen sind dazu in der Abbildung plakativ ausgegraut. Neben der Befähigung zeichnen sich Operationen weiterhin über die Ausführungsdauer und die Erfolgswahrscheinlichkeit aus. Entsprechend können alle Operationen über ein Tripel vollständig beschrieben werden:

$$op_{v,q}^{a,r} = (\kappa_{op}, t_{op}, p_{erfolg,op}) \quad 5.2$$

mit:

1. $\kappa \in \{0,1\}$ als der Fähigkeitsindikator, Binärvariable, welche die Fähigkeit zur Ausführung einer Operation beschreibt. Dabei gilt:

$$\kappa_{op} = \begin{cases} 1 & \text{falls Operation ausführbar,} \\ 0 & \text{falls Operation nicht ausführbar} \end{cases}$$

2. $t_{op} \in \mathbb{R}^+$ als die Ausführungsdauer der Operation.

3. $p_{erfolg,op} \in [0,1]$ als die Erfolgswahrscheinlichkeit der Operation.

Anstatt der Operationsnotation op wird folgend für eine explizitere Deklaration der Fähigkeitsindikatoren, Ausführungsdauern und Erfolgswahrscheinlichkeiten $\kappa_{v,q}^{a,r}$, $t_{v,q}^{a,r}$ und $p_{v,q}^{a,r}$ notiert.

Auf eine separate qualitative Fähigkeitsnotation wird in dieser Arbeit verzichtet. Stattdessen erfolgt die Beschreibung des Fähigkeitsraums einer Station bzw. eines Stationstyps ersatzweise mittels Operations- bzw. Aufgabennotation. Es beschreibe OP die Menge aller möglichen Demontageoperationen op , dann ergibt sich der **operationsbezogene Fähigkeitsraum** F_{OP}^r eines Ressourcentyps r als die Menge aller an r durchführbaren Operationen:

$$F_{OP}^r = \{op_{v,q}^{a,r} \mid \kappa_{op} = 1\} \forall v \in V, \forall a \in A_v, \forall q \in Q_v \tag{5.3}$$

Im weiteren Sinne ergibt sich analog der **aufgabenbezogene Fähigkeitsraum** F_A^r , aus allen Demontageaufgaben, für die es für mindestens eine Qualitätsklasse q eine durchführbare Operation gibt mit:

$$F_A^r = \{a \mid \exists op_{v,q}^{a,r} : \kappa_{op} = 1 \forall q \in Q_v\} \forall v \in V, \forall a \in A_v \tag{5.4}$$

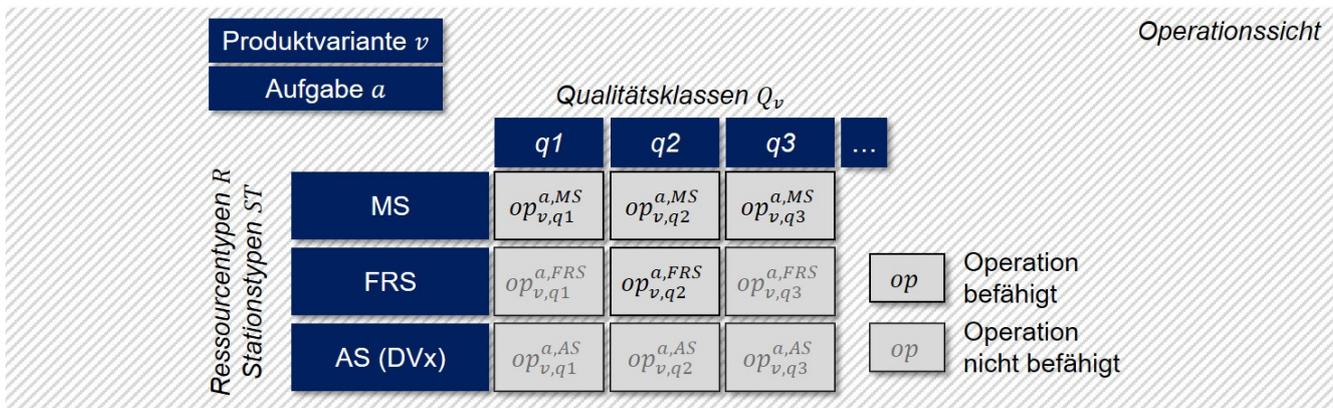


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Operationssicht

5.2 Modellierung des agilen Demontagesystems

In diesem Unterkapitel erfolgt die Modellierung des agilen Demontagesystems. Das PPR-Referenzmodell mit den abstrakteren Produkt- Ressourcen- und Operationssichten wird in diesem Zuge um eine konkretere **Systemsicht** erweitert. In einem ersten Schritt wird dazu der Systemaufbau mit den Systemkomponenten beschrieben. In einem zweiten Schritt werden die Zustände dieser Systemkomponenten sowie die Betriebsmodi des Systems erläutert.

Im Vergleich mit analytischen Modellierungen (z.B. mittels Warteschlangentheorie oder MaxPlus-Algebra) erlaubt ein Simulationsmodell die Abbildung eines höheren Komplexitätsniveaus (Scholz-Reiter & Beer et al. 2008, S. 118) und ist besonders geeignet für die hohe Dynamik in Demontagesystemen (Ciupek 2006, S. 97). Das nachfolgend beschriebene System wird daher in ein **ereignisdiskretes Simulationsmodell** überführt, das als **Interaktionsumgebung** für die DPS fungiert. Eine genauere Beschreibung zur technischen Realisierung erfolgt in Unterkapitel 5.7.

5.2.1 Systemarchitektur und -komponenten

In der Struktur und den Systemkomponenten fußt das Modell auf dem Modellierungsansatz aus Kuhnle 2020, in dem ein Job-Shop-System vor dem Hintergrund der vollautomatisierten Halbleiterproduktion beschrieben wird. Weiterhin baut das Vorgehen auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Michel 2020 auf.

Der Ansatz von Kuhnle (2020) umfasst neben Produktionsaufträgen und Maschinen (hier: Stationen) auch Quellen und Senken sowie Transportressourcen. Eine wesentliche Erweiterung durch diese Arbeit, neben der strukturellen Verankerung von Demontageprozessen sowie dem Referenzmodell, ist der Übergang zu einem mehrperiodigen Betrieb mit der Möglichkeit zur Systemrekonfiguration und einem dynamischen Systemlayout L . Analog zur industriellen Praxis wird ein fokussierter Betrachtungszeitraum in mehrere Perioden unterteilt. Naturgemäß sind dies Produktionsschichten, Arbeitstage, Arbeitswochen oder Monate. Innerhalb einer Periode bleibt die Systemkonfiguration konstant, welche die Art und Menge der Stationen sowie deren Position auf der Grundfläche des Systems festlegt. Zwischen Produktionsperioden sind jedoch Änderungen möglich. Abbildung 5.6 charakterisiert die Systemkomponenten des agilen Demontagesystems, die sich in Demontageaufträge und Ressourcen aufteilen. Die vom zuvor eingeführten Referenzmodell bekannten Stationen, entsprechen dabei Demontageressourcen und werden um nicht direkt wertschöpfende Logistikressourcen ergänzt. Es folgt eine Vorstellung der Systemkomponenten.

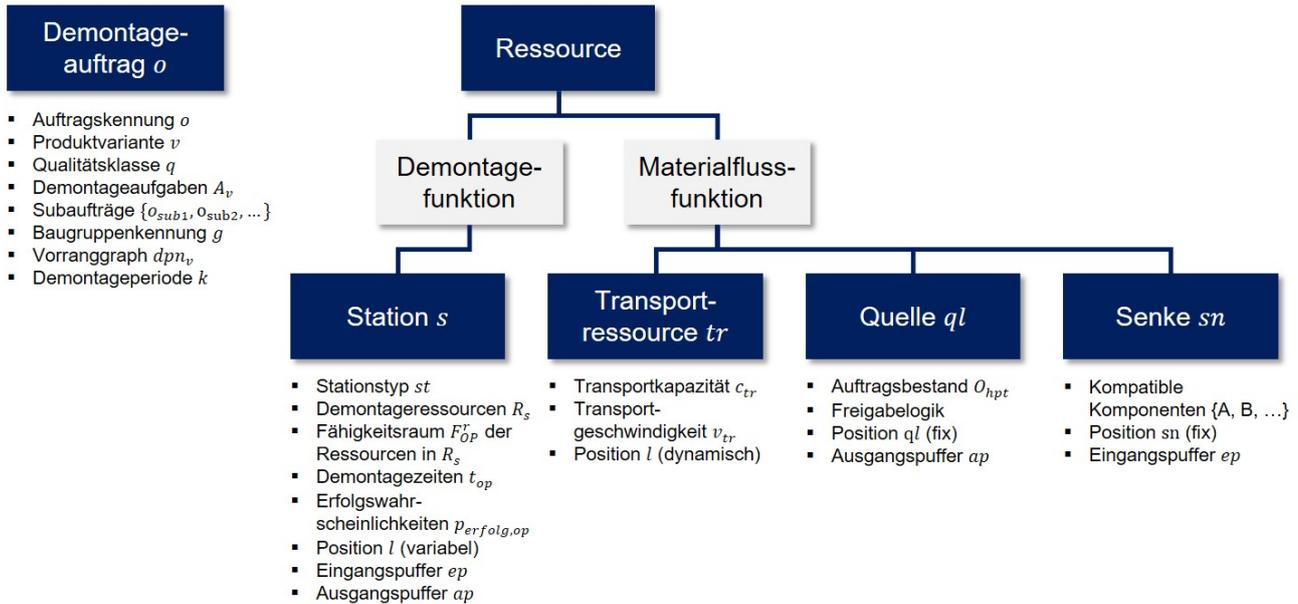


Abbildung 5.6: Charakterisierung der Systemkomponenten angelehnt an Kuhnle 2020, S. 58

5.2.1.1 Demontageaufträge

Jeder Demontageauftrag o (von engl. Order) ist Instanz genau einer *Produktvariante* v sowie einer *Qualitätsklasse* q . Die in einem Auftragsbestand O_{hpt} in einer Produktionsperiode k geführten Aufträge sind stets Hauptaufträge $o_{hpt} \in O_{hpt}$. Durch die Zerlegung von Baugruppen entsteht eine Divergenz im Materialfluss. Dieser wird durch die unmittelbare Erzeugung von *Subaufträgen* o_{sub} für die aus einer Demontageoperation hervorgegangenen Unterbaugruppen Rechnung getragen. So wird eine individuelle Weiterverarbeitung der Unterbaugruppen bis zum Komponentenstadium möglich. Die Subaufträge sind lediglich Hilfsmittel und weiterhin mit übergeordneten Subaufträgen sowie dem Hauptauftrag verknüpft. Die Fertigstellung des Hauptauftrags korrespondiert mit der Fertigstellung aller zuordenbaren Subaufträge. Jeder Auftrag und Subauftrag ist mit dem *Vorranggraph* d_{pn_v} der zugehörigen Produktvariante v verknüpft, aus dem sich die erforderlichen *Demontageaufgaben* A_v ergeben, s. Abschnitt 5.1.3. Der aktuelle Demontagefortschritt wird über die *Baugruppenkennung* g ersichtlich. So können die nächstmöglichen und erforderlichen Demontageaufgaben aus d_{pn_v} abgeleitet werden. Weiterhin sind alle Aufträge genau einer *Demontageperiode* k zugeordnet, welche unmittelbar die frühestmögliche Auftragsfreigabe T_{start}^k sowie den spätestmöglichen kostenneutralen Fertigstellungstermin T_{ende}^k festlegt, vgl. Unterkapitel 5.3.

5.2.1.2 Systemressourcen und Funktionen

Außer den Demontageaufträgen entsprechen alle anderen Systemkomponenten Ressourcen (Kuhnle 2020, S. 58). Zunächst sind dies die **Stationen** mit unmittelbarer **Demontagefunktion**. Wie im Referenzmodell in Unterkapitel 5.1 definiert, zeichnet sie jede Station s durch

einen *Stationstyp* st , installierte Ressourcen R_s , den zugehörigen Fähigkeitsräumen F_{OP}^r der Ressourcen r und den entsprechenden *Ausführungsdauern* t_{op} und *Erfolgswahrscheinlichkeiten* $p_{erfolg,op}$ der befähigten Demontageoperationen op aus. Weiterhin haben die Stationen einen Eingangspuffer ep und einen Ausgangspuffer ap zur Zwischenspeicherung von zu verarbeitenden Aufträgen bzw. erzeugten Subaufträgen vor der Weiterverarbeitung. Die Puffer weisen jeweils eine Speicherkapazität $n_{ep,s}^{max}$ und $n_{ap,s}^{max}$ auf. Die *Position* der Demostation l im Layout ist fix innerhalb einer Produktionsperiode.

Alle weiteren Ressourcen in Abbildung 6.1 sind der Systemlogistik zuordenbar und erfüllen entsprechend eine **Materialflussfunktion**. Die *Transportressourcen* $tr \in TR$, dies sind z.B. Fahrerlose Transportsysteme, übernehmen den Transport der Aufträge zwischen den Stationen, Quellen und Senken. Sie zeichnen sich durch eine *Transportkapazität* c_{tr} , eine *Transport- bzw. Fördergeschwindigkeit* v_{tr} sowie einer sich im Betrieb dynamisch ändernden *Position* l im Layout aus.

Die **Quelle** ql entspricht der Eintrittszone der Aufträge in das System. Hier erfolgt die Auftragsfreigabe (vgl. Abschnitt 5.4.2) gemäß einer *Freigabelogik*. Die Quelle ist direkt mit dem periodenbezogenen *Auftragsbestand* o_{hpt} verknüpft, der eine Teilmenge des Produktionsprogramms darstellt. Der Systemeintritt eines Auftrags erfolgt über einen kapazitierten *Ausgangspuffer* ap der Quelle. Die *Position* l der Quelle ist periodenübergreifend unveränderlich. In einem realen System entspricht die Quelle einem Zwischenlager für Aufträge im oder in direkter Nähe des Demontagesystems. Das Zwischenlager ist für die Transportressourcen zugänglich und kann auch direkt mit einem Eingangslager (vgl. Abbildung 4.2) in Verbindung stehen.

Eine **Senke** sn ist der Zielort der demontierten Komponenten eines Demontageauftrags. Sie besteht lediglich aus einem nicht kapazitierten Eingangspuffer ep , zum dem die Einzelkomponenten als Subaufträge abtransportiert werden. Mehrere Senken sind möglich, die jeweils einem Zwischenlager entsprechen, indem die Komponenten der Prozesskette im Remanufacturing folgend (vgl. Abbildung 2.4), auf den Weitertransport zur Reinigung warten. Jede Senke ist kompatibel zu einer Teilmenge aller Komponenten. Analog sind je nach Geometrie und Beschaffenheit der Komponenten unterschiedliche Reinigungsanlagen für die Durchführung des Reinigungsprozesses erforderlich. Wie bei der Quelle bleibt die *Position* der Senken periodenübergreifend unverändert.

5.2.1.3 Systemlayout und Layoutbelegung

Das Systemlayout L wird definiert als eine diskrete Menge aller möglichen Positionen l , inkl. der im Standort unveränderlichen Quelle und der Senken $L = \{ql, pos_1, pos_2, \dots, sn_1, sn_2, \dots\}$. Alle Positionen $l = pos_x$ beschreiben dabei dedizierte Stationsstellplätze. Das Layout wird

ergänzt durch eine quadratische **Transportdistanzmatrix** $D^{L \times L} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{|L| \times |L|}$, in welcher die individuellen Transportdistanzen festgelegt werden. Die Layoutbelegung LB^k beschreibt eine Menge aus Tupeln mit $LB^k = \{pos1 : s1, pos2 : -, pos3 : s2, \dots\}$, die für jeden Stationsstellplatz in L festlegt, ob und mit welcher Station diese in Periode k besetzt wird. Damit beinhaltet die Layoutbelegung implizit die Systemkonfiguration.

5.2.2 Zustände und Betriebsmodi

5.2.2.1 Zustände der Systemkomponenten

Im regulären Systembetrieb durchlaufen die aktiven Systemkomponenten Station, Transportressource und Demontageauftrag eine endliche Menge von Zuständen.

Eingesetzte **Stationen** sind entweder im Zustand **Bearbeitung** oder **Warten**. Warten Demontageaufträge im Eingangspuffer einer Station, kann ein nahtloser Übergang von einer Operation zur nächsten erfolgen. Ist der Eingangspuffer einer Station leer, geht eine Station nach abgeschlossener Operation in den Wartezustand über. Gleiches gilt analog bei abgeschlossener, aber fehlgeschlagener Bearbeitung. Zeiten für die Handhabung von Aufträgen sind in der Bearbeitungszeit inkludiert. Wie bereits geschildert, wird das fähigkeitsbezogene Scheitern einer Demontageoperation nicht als Störung verstanden (vgl. Abschnitt 4.1.3). Der Aufwand und die Dauer für die erneute Freigabe einer gescheiterten Station wird als in der gescheiterten Operation inkludiert angenommen. Dadurch ist die Weiterbearbeitung eines alternativen Demontageauftrags im unmittelbaren Anschluss möglich.

Die **Transportressourcen** werden mittels Transportaufträgen gelenkt. Daraus ergeben sich drei Zustände. Liegt kein Transportauftrag vor, befindet sich die Ressource im Zustand **Warten**. Weicht der Abholort von der aktuellen Position ab, muss bei Eingang eines Transportauftrags zunächst eine **Leerfahrt** in Kauf genommen werden. Anschließend kann der eigentliche **Transport** des Demontageauftrags zum Zielort erfolgen. Die Dauer von Transport und Leerfahrten ist deterministisch und wird von der Transportdistanzmatrix vorgegeben. Die Steuerung der Transportressourcen bzw. die Zuweisung von Transportaufträgen erfolgt über ein zentrales Flottenmanagement nach dem FCFS-Prinzip (First come, first served), wobei Transportaufträge zunächst zentral gesammelt werden und dann, priorisiert nach dem Zeitpunkt des Auftragseingangs, an freie Transportressourcen verteilt und der Reihe nach abgearbeitet werden.

Die **Demontageaufträge**, ob Haupt- oder Subauftrag, suchen sich dezentral gesteuert (vgl. Unterkapitel 5.4) den Weg durch das Demontagesystem. Dabei nehmen sie die Services der Stationen und Transportressourcen in Anspruch. Entsprechend ergeben sich die Zustände

Bearbeitung, Transport und Warten. Das Warten auf den Weitertransport erfolgt im Ausgangspuffer einer Station oder der Quelle. Das Warten auf die Weiterverarbeitung erfolgt wiederum in den Eingangspuffern der Stationen.

5.2.2.2 Betriebsmodi des Systems

Das System durchläuft im Laufe einer Produktionsperiode drei Betriebsmodi. Neben dem im vorigen Abschnitt geschilderten regulären Modus der **Auftragsbearbeitung (I)** bzw. kurz dem **Bearbeitungsmodus**, weist das rekonfigurierbare Demontagesystem noch einen **Auslaufmodus (II)** und einen **Rekonfigurationsmodus (II)** auf. Im Rahmen einer Produktionsperiode k werden alle Modi genau einmal durchlaufen. Der Systemeinlauf erfordert seitens der Systemsteuerung keine Sonderbehandlung. Ein vierter Betriebsmodus ist entsprechend nicht erforderlich.

Die Produktionsperiode beginnt zum Zeitpunkt T_{start}^k und endet zum Zeitpunkt T_{ende}^k . Das System startet zu T_{start}^k und verbleibt im regulären **Bearbeitungsmodus (I)**. Wurde der Auftragsbestand in der Vorperiode $k - 1$ vollständig abgearbeitet oder sind die Eingangspuffer einzelner Stationen aufgrund individuell abgearbeiteter Arbeitsvorräte der Vorperiode leer, können kurz nach Periodenbeginn T_{start}^k Einlaufeffekte in Form von Stationsstillständen im System auftreten. Ist dies nicht der Fall, kann fast nahtlos an den Bearbeitungsmodus der Vorperiode angeschlossen werden.

Kurz vor Ende der Produktionsperiode zum Zeitpunkt $T_{auslauf}^k = T_{ende}^k - t_{auslauf}$ geht das System in den **Auslaufmodus (II)** über. In diesem werden bereits begonnene Bearbeitungs- und Transportoperationen noch beendet, jedoch keine neuen begonnen. Der Zweck des Auslaufmodus ist die Vorbereitung des Systems auf die Rekonfiguration. Um etwaige Verwerfungen im System zu vermeiden und die Kennzahlenerfassung zu vereinheitlichen, befinden sich alle Systemkomponenten nach erfolgreichem Auslauf im *Wartezustand*. Hierzu ist $t_{auslauf}$ lang genug zu wählen, um alle laufenden Prozesse zu beenden, gleichzeitig jedoch möglichst kurz, um Auslastungsverluste zu vermeiden.

Schließlich folgt im Anschluss an den Auslaufmodus die Systemrekonfiguration im **Rekonfigurationsmodus (III)**. In diesem Zuge werden die Transportressourcen in den Ausgangszustand zurückversetzt sowie bedarfsweise, z.B. für nicht mehr vorhandene Stationen, eine Neupositionierung der Demontageaufträge vollzogen. Für die Leistungsevaluation steht in dieser Arbeit die Planbelegungszeit des Systems (VDI 3423 2011) im Fokus. Vereinfachend wird die Systemrekonfiguration dabei von der Planbelegungszeit ausgenommen. Entsprechend zählt nur der Auftragsbearbeitungs- (I) und der Auslaufmodus (II) in die Planbelegungszeit. Wird vereinfachend die geplante Stillstandszeit vernachlässigt, gilt weiterhin $T_{ende}^k = T_{start}^{k+1}$.

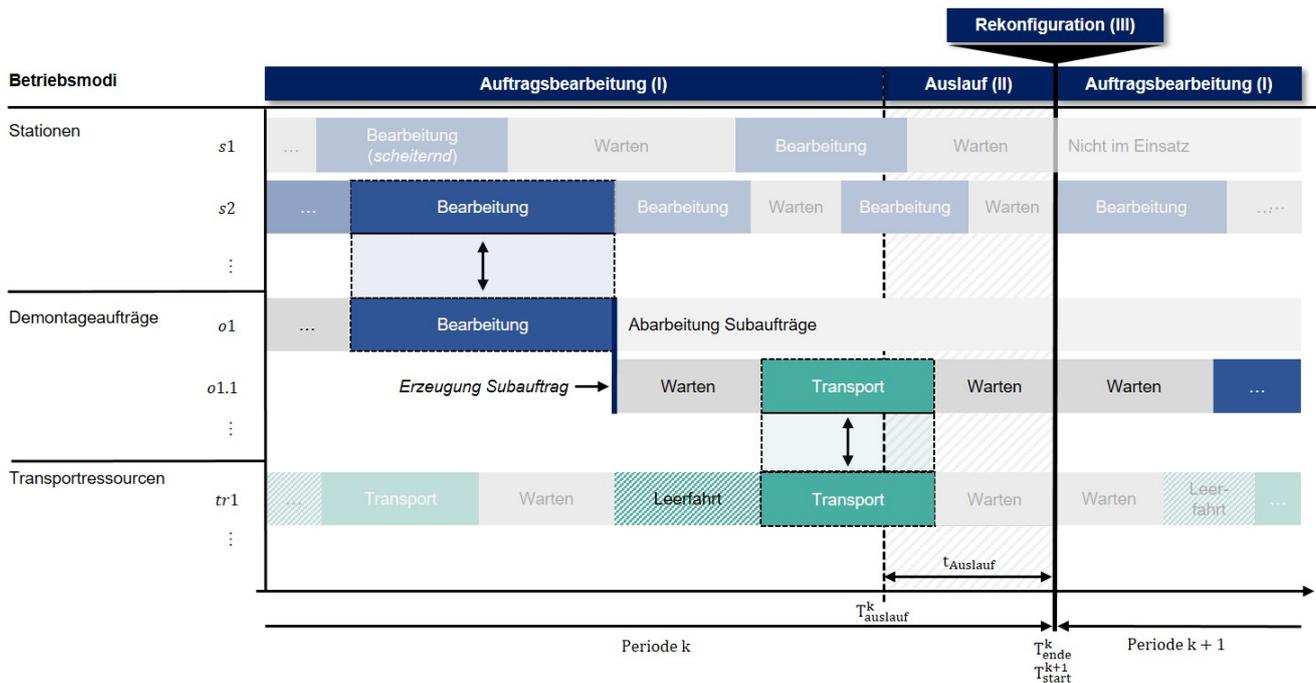


Abbildung 5.7: Ausschnitt aus dem Belegungsplan exemplarischer Systemkomponenten am Übergang von einer Produktionsperiode k zur Folgeperiode $k+1$ inklusive der Betriebsmodi und Zustände der Systemkomponenten

Abbildung 5.7 zeigt plakativ einen **integrierten Zeitplan** für exemplarische Systemkomponenten am Übergang zwischen zwei Produktionsperioden k und $k + 1$. Auszugsweise sind zwei Stationen s_1 und s_2 , ein Auftrag o_1 mit einem zugehörigen Subauftrag $o_{1.1}$ sowie eine Transportressource tr_1 abgebildet. Des Weiteren werden die drei Betriebsmodi des rekonfigurierbaren Demontagesystems verdeutlicht. Mit s_1 ist in Periode k eine scheiternde Station im Einsatz, welche nach Systemrekonfiguration in Periode $k + 1$ nicht mehr eingesetzt wird. Im Fokus der Abbildung und hervorgehoben sind die Aufträge o_1 und $o_{1.1}$. Während o_1 bereits zu Beginn des betrachteten Zeitabschnitts existiert, wird $o_{1.1}$ erst unmittelbar nach erfolgreicher Bearbeitung von o_1 an s_2 erzeugt. $o_{1.1}$ wird unmittelbar weiterbearbeitet. Die Weiterbearbeitung soll aber nicht an s_2 , sondern an einer nicht weiter gezeigten Station erfolgen. Ein Transport ist erforderlich. Der Transportauftrag wird an tr_1 vergeben, welche direkt mit der Anfahrt zu s_2 beginnt. Die anschließende Transportoperation endet wiederum im Auslaufmodus. Die Weiterbearbeitung von $o_{1.1}$ kann schließlich erst nach einer kurzen Wartezeit in Periode $k + 1$ erfolgen. Im vorliegenden Fall gehen mit der Zerlegung mehrere Unterbaugruppen bzw. Komponenten aus dem Hauptauftrag o_1 hervor. Anders als $o_{1.1}$ entspricht o_1 dann nicht mehr einer einzelnen direkt zuordenbaren Systementität. o_1 geht stattdessen in einen abstrakten Wartezustand über, wobei die Auftragserfüllung an die Fertigstellung aller untergeordneten Subaufträge gekoppelt ist.

5.3 Modellierung der Zielgrößen

Zur Quantifizierung der unternehmerischen Zielerreichung sind messbare Zielgrößen erforderlich. Typische Zielgrößen in der Linearproduktion sind die Auftragsdurchlaufzeit, die Termintreue und die Ressourcenauslastung. Insbesondere durch die in den letzten Dekaden in vielen Branchen vollzogenen Transformation von Verkäufer- zu Käufermärkten, steht die Kundenorientierung und damit die Durchlaufzeit und die Termintreue meist an erster Stelle. In der Prozesskette des Remanufacturings erfüllt die Demontage eine Produzentenfunktion (vgl. Abschnitt 2.3.1). Auch hier ist das Ziel eine pünktlichen Bereitstellung der Komponenten für die Aufarbeitung und Remontage. In der industriellen Demontage wird jedoch die **Effizienz** der Prozesse als wichtigster Erfolgsfaktor und **entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit** angesehen (Duflou & Seliger et al. 2008, S. 583). Unter diesen Prämissen erfolgt in dieser Arbeit die Zielgrößendefinition mit Augenmerk auf der **Optimierung des Ressourceneinsatzes** und der **Maximierung der Systemleistung**.

Unter Annahme eines mehrperiodigen Systembetriebs (vgl. Kapitel 4) können die Optimierungsziele plakativ mit Abbildung 5.8 beschrieben werden. Je Periode ergibt sich ein Auftragsbestand aus dem Produktionsprogramm, der durch die Systemressourcen über die Laufzeit der Periode reduziert werden kann (dunkelblaue Kurve). Der Auftragsbestand sollte exakt zum Periodenende T_{ende}^k abgearbeitet sein, sonst resultieren entweder Auftragsverzug im Falle eines Kapazitätsdefizits (vgl. Periode k) oder Auslastungsverluste im Falle eines Kapazitätsüberschusses (vgl. Periode $k + 1$). Im Handlungsfeld Systemadaption geht es dabei um die **richtige Ressourcenbereitstellung**, im Handlungsfeld Systembetrieb um die **richtige dispositive Nutzung der bereitgestellten Ressourcen**. Je Handlungsfeld eignen sich dabei verschiedene Zielgrößen.

Logistische Zielgrößen werden typischerweise in **kostenorientierte, zeitorientierte und kapazitätsorientierte Größen** unterteilt (Acker 2011, S. 26 ff.). Die Kosten für die Anschaffung von Anlagen sowie den Betrieb des Systems können durch die operativen Entscheidungen im Systembetrieb nicht beeinflusst werden. Innerhalb einer Produktionsperiode ist daher auch von sogenannten „sunk costs“ die Rede (Lödding 2016, S. 40). Für den Systembetrieb bzw. die Systemsteuerung im Einperiodenfall stehen entsprechend zeit- und kapazitätsorientierte Zielgrößen im Mittelpunkt. Für die Systemadaption bzw. die Kapazitätsplanung mit längerfristigem Betrachtungshorizont ist wiederum eine monetär begründete Entscheidung sinnvoll und praxisüblich. Insbesondere unter dem Aspekt des hybriden Ressourceneinsatzes ist die variierende Kosteneffizienz der Stationstypen (vgl. Abschnitt 5.1.2) ein wichtiger Einflussfaktor. Kostenbezogene Zielgrößen erlauben hier eine unikriterielle Bewertung und werden daher für mehrperiodige Untersuchungen betrachtet.

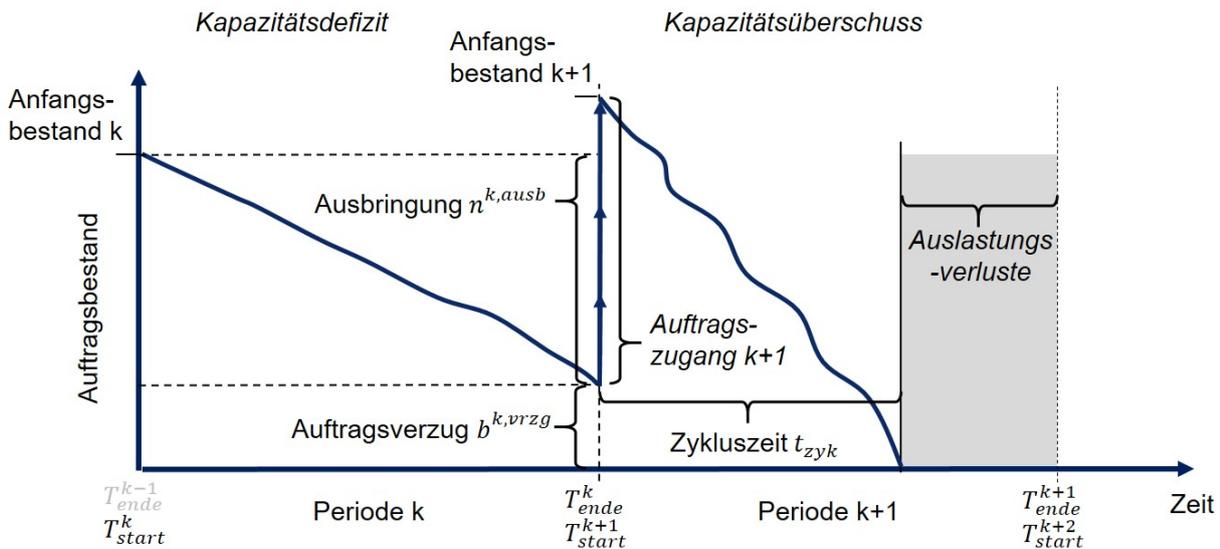


Abbildung 5.8: Systemkapazität und Systemleistung: Verbildlichung und Begriffsdefinition

Im Folgenden werden zunächst die zeit- und kapazitätsbezogenen Zielgrößen definiert. Anschließend werden die kostenbezogenen Zielgrößen betrachtet.

5.3.1 Zeit- und kapazitätsbezogene Zielgrößen

In Anlehnung an Lödding (2016, S. 39) resultiert die mittlere **Leistung** L eines Produktionssystem in einem Bezugszeitraum aus dem Quotienten aus Auftragsabgang und der Länge des Bezugszeitraums. Bezogen auf eine Periode k ergibt sich die mittlere Leistung L_k mit der **Ausbringung** $n^{k,ausb}$ sowie der Periodenlänge t_k wie folgt:

$$L_k = \frac{n^{k,ausb}}{t_k} \quad 5.5$$

In der periodenweisen Produktion ist der Bezugszeitraum, die Periodenlänge t_k , konstant. Die Ausbringung ist damit hinreichend für den Vergleich der Leistung zweier Systeme. Ist der Auftragsbestand konstant und der Betrachtungszeitraum nicht limitiert bzw. endet nach Abarbeitung des Auftragsbestands (im mehrperiodigen Fall), existiert mit der **Fertigstellungszeit** bzw. **Zykluszeit** t_{zyk} (engl. Makespan) eine wichtige Ersatzgröße für die Systemleistung. Sie ist gleichzusetzen mit der Belegungszeit des gesamten Demontagesystems (Neidhardt 2007, S. 21). Weiterhin ergibt sie sich aus dem frühesten Auftragsfreigabezeitpunkt $\min(T_{start}^o)$ und dem spätesten Auftragsfertigstellungszeitpunkt $\max(T_{ende}^o)$, welcher hier dem Ankunftszeitpunkt der letzten Komponente in der Senke entspricht:

$$t_{zyk} = \max(T_{ende}^o) - T_{start}^k \quad 5.6$$

Im mehrperiodigen Fall ersetzt der Periodenbeginn T_{start}^k die früheste Auftragsfreigabe. Als Indikator für den Nutzungsgrad der Systemressourcen wird ergänzend die **Kapazitätsauslastung** u (von engl. *utilization*) betrachtet³. Dieser Indikator lässt sich verdichten und somit ergeben sich bei einer effektiven Bearbeitungszeit $t_{s,eff}^k$ einer Station s in einer Periode k mit der Gesamtdauer t_k die Auslastung u_s^k der Station, die mittlere Auslastung aller Stationen eines Stationstyps u_{st}^k sowie die mittlere Systemauslastung, gleichbedeutend mit der mittleren Auslastung aller Stationen u_S^k , wie folgt:

$$u_s^k = \frac{t_{s,eff}^k}{t_k} \quad u_{st}^k = \frac{1}{|S_{st}|} \sum_{s \in S_{st}} \frac{t_{s,eff}^k}{t_k} \quad u_S^k = \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \frac{t_{s,eff}^k}{t_k} \quad 5.7$$

Als Indikator für die Reaktionszeit und einen schlanken Systembetrieb wird abschließend die **mittlere Durchlaufzeit** aller Aufträge $\overline{t_{DLZ}}$ als weiteres Ziel mit aufgenommen. Betrachtet wird konkret die mittlere Durchlaufzeit der Hauptaufträge unabhängig von der Produktvariante:

$$\overline{t_{DLZ}} = \frac{1}{|O_{hpt}|} \sum_{o \in O_{hpt}} T_{o,ende} - T_{o,start} \quad 5.8$$

Die Durchlaufzeit ist nach Little's Law eine Ersatzgröße für den Auftragsbestand im System (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 32). In einer Matrix-Produktion ist aufgrund der variablen Demontageabläufe der Aufträge nur die mittlere Durchlaufzeit von Relevanz (Greschke 2020, S. 276). Neben der Zykluszeit und der Systemauslastung dient die mittlere Durchlaufzeit als ergänzende Zielgröße zur im Fokus stehenden Systemausbringung.

5.3.2 Kostenbezogene Zielgrößen

Für die Kapazitätsplanung und die mehrperiodige Evaluation werden die anfallenden Kosten betrachtet. Die Kostenerfassung erfolgt hierbei stets periodenbezogen mit den **Periodenkosten** C^k . Die Kosten setzen sich aus den Betriebs- und Rekonfigurationskosten der Demotageressourcen sowie den auftragsbezogenen Verzugskosten zusammen. Die Kosten die durch den Einsatz der Transportressourcen entstehen, werden vernachlässigt.

Der wichtigste Kostenbestandteil sind die **Betriebskosten** C_{btrb}^k der Ressourcen in einer Periode k . Hierbei erfolgt die Ermittlung mit einer *Maschinenstundensatzrechnung*, bei der sämtliche Kosten für den Betrieb einer Ressource auf die Nutzungszeit umgerechnet werden

³ Motiviert durch die Fixkostendegression (Kellner & Lienland et al. 2022, S. 160) wird eine hohe Auslastung der Systemressourcen mit einer hohen Systemeffizienz verbunden. Aufgrund der variierenden Kosteneffizienz der Demotageressourcentypen und der Möglichkeit des Prozessscheiterns ist die Sinnhaftigkeit einer Ressourcenbelegung im vorliegenden AHDS immer abhängig vom Ressourcentyp. Die Ressourcenauslastung ist in dieser Arbeit folglich kein hinreichendes Kriterium für Effizienz und kann bei alleiniger Betrachtung zu einer Fehleinschätzung der Systemproduktivität führen.

(Müller 2013, S. 361 ff.). Im vorliegenden Fall liegen hierzu Kostensätze je Ressource $c_{r,btrb}$ vor. Der Kostensatz $c_{r,btrb}$ beinhaltet dabei z.B. Kosten für Abschreibungen, Energiekosten oder Personalkosten. Vereinfachend wird ein statischer Ressourcenkostensatz angenommen. Dieser fällt vollständig auf die komplette Periodenlänge t_k an, unabhängig von der Ressourcenauslastung. Als Berechnungsgrundlage dient die Anzahl n_r^k der Ressourcen je Ressourcentyp $r \in R$ im System in Periode k . Damit ergeben sich die Betriebskosten in einer Periode k wie folgt:

$$C_{btrb}^k = \sum_{r \in R} n_r^k * c_{r,btrb} * t_k \quad 5.9$$

Fallen **Investitionsausgaben** an, werden diese mit C_{inv}^k notiert. In der operativ-taktischen Planung werden Investitionsausgaben jedoch vernachlässigt ($C_{inv}^k = 0 \forall k \in K$) bzw. über die Ressourcenkostensätze mitberücksichtigt. Für $r = MS$ ist diese Annahme einfach über die Lohnkosten zu argumentieren. Für $r = FRS$ und $r = DV_x$ kann eine derartige Kostenstrukturierung wiederum mittels eines Abschreibungssystems argumentiert werden. Eine höherfrequente Rekonfiguration sowie kurze Einsatzzeiten technischer Ressourcen könnten wiederum mittels Miet- bzw. Leasingmodellen⁴ in der Praxis realisiert werden.

Eine weitere Kostenart sind die ressourcenbezogenen **Rekonfigurationskosten** C_{reko}^k . Diese umfassen die mit der Systemanpassung vor Auftragsabarbeitung in k anfallenden Kosten, die durch die technischen und logistischen Aufwände einer Rekonfiguration entstehen. Hierzu werden für alle in k neu aufgebauten Ressourcen $n_{r,+}^k$ und abgebauten Ressourcen $n_{r,-}^k$ ressourcentypspezifische Kostensätze $c_{r,+}$ und $c_{r,-}$ festgelegt, aus denen sich jeweils Aufbaukosten $C_{r,+}^k$ und Abbaukosten $C_{r,-}^k$ ergeben. Die Rekonfigurationskosten ergeben sich dann wie folgt:

$$C_{reko}^k = \sum_{r \in R} n_{r,+}^k * c_{r,+} + n_{r,-}^k * c_{r,-} = \sum_{r \in R} C_{r,+}^k + C_{r,-}^k \quad 5.10$$

Abschließend fallen als letzte Kostenart die auftragsbezogenen **Verzugskosten** C_{vrzg}^k durch eine Abgangsterminabweichung an, der die Abgangsterminierung sämtlicher Demontageaufträge im Auftragsbestand einer Periode k auf das Periodenende $T_{k,Ende}$ zu Grunde liegt. Eine frühere Fertigstellung wird nicht honoriert. Die Nicht-Fertigstellung erfordert wiederum die Abarbeitung in einer Folgeperiode. Der Kostensatz für Auftragsverzug c_{vrzg} kann sich z.B. pauschal aus den Bestandskosten für die Lagerung von Gebrauchsgüterprodukten, Kosten für die alternative Beschaffung von Neukomponenten, Konventionalstrafen oder Kosten für erforderliche Expressversendungen zusammensetzen (Lödding 2016, S. 41). Auch c_{vrzg} wird im Folgenden vereinfacht als Konstante betrachtet. Damit ergeben sich die periodenbezogenen

⁴ Leasingmodelle sind ein Ansatz, der mit dem Trend zu kurzzyklischeren Rekonfiguration von Produktionssystemen in Industrie und Forschung (vgl. z.B. Fechter & Dietz et al. 2019) zunehmend in den Fokus rückt.

Verzugskosten C_{vrzg}^k in k für einen Auftragsrückstand $b^{k,vrzg}$ mit:

$$C_{vrzg}^k = b^{k,vrzg} * c_{vrzg} \quad 5.11$$

Abschließend ergeben sich die Periodenkosten C^k sowie die **Gesamtkosten** C_{ges}^K :

$$C^k = C_{btrb}^k + C_{reko}^k + C_{vrzg}^k \quad 5.12$$

$$C_{ges}^K = \sum_{k \in K} C^k \quad 5.13$$

5.4 Verfahren für die Systemsteuerung

Nachdem in diesem Kapitel bislang die Architektur und die Modellierung des System beschrieben wurde, liegt im Folgenden der Fokus auf dem operativen **Systembetrieb im Bearbeitungsmodus** und den damit einhergehenden dispositiven Aufgaben. Zunächst werden die Aufgaben der Systemsteuerung (Auftragsfreigabe und Auftragsallokation) anhand des Ablaufs der Auftragsbearbeitung hergeleitet. In einem zweiten Schritt wird dann ein Verfahren für die Auftragsfreigabe eingeführt. Abschließend wird ein parametrierbares Multi-Prioritätsregelverfahren vorgeschlagen. Das Multi-Prioritätsregelverfahren basiert im Kern auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Müller 2022.

5.4.1 Charakterisierung der Steuerungsaufgaben

Der Betrieb des Demontagesystems erfolgt auftragsbasiert, dezentral organisiert und rein reaktiv. Die Steuerungsaufgaben ergeben sich aus dem Ablauf der Auftragsbearbeitung, wie Abbildung 5.9 schematisch verdeutlicht.

Wie in Unterkapitel 4.1 definiert, folgt der Systembetrieb einem vorgegebenen Produktionsprogramm, welches die Art und Anzahl der zu demontierenden Gebrauchtpunkte in einer Produktionsperiode k umfasst. Alle Gebrauchtpunkte stehen mit Beginn der Periode $T_{k,Start}$ für die Demontage zur Verfügung und können flexibel eingesteuert werden. Die sich mit der Freigabe (*Auftragsfreigabe* - **Steuerungsaufgabe 1**) an der Quelle befindenden Aufträge sind Hauptaufträge, die einem vollständigen Gebrauchtpunkt der Variante v zugeordnet werden können. Nach Freigabe wird wie mit allen vakanten Aufträgen nach dem gleichen Schema verfahren: Zunächst wird anhand des Demontevorranggraphs d_{pn_v} sowie der Baugruppenkennung g geprüft, ob weitere Demonteaufgaben durchzuführen sind. Ist dies der Fall, werden alle möglichen Demonteaufgaben identifiziert, eine Operation ausgewählt (*Auftragsallokation* - **Steuerungsaufgabe 2**) und abschließend ausgeführt. Die Ausführung kann hierbei vorab eine zusätzliche Transportoperation erfordern. Schlägt die

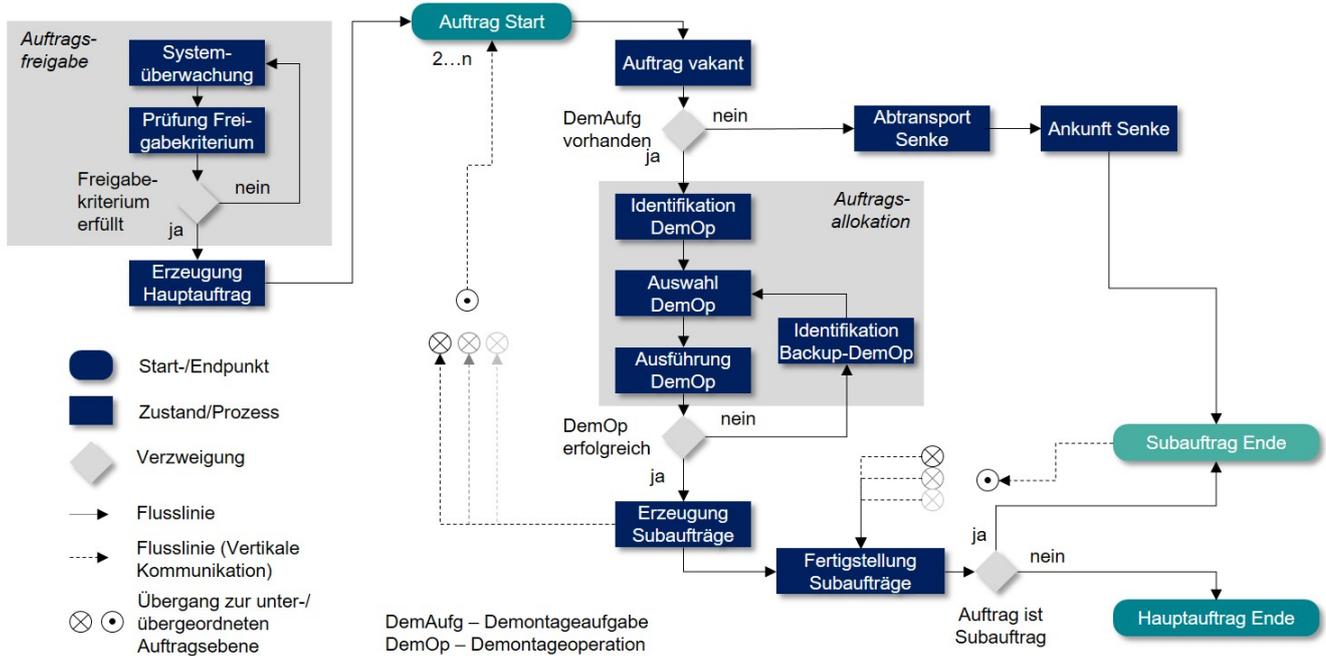


Abbildung 5.9: Ablaufschema der Auftragsbearbeitung mit den dezentralen Handlungsfeldern Auftragsfreigabe und Auftragsallokation

Demontageoperation fehlt, werden geeignete Backup-Operationen identifiziert und ausgeführt. Ist die Demontageoperation erfolgreich, werden für alle resultierenden Komponenten Subaufträge erzeugt (vgl. Wurster & Michel et al. 2022). Der ursprüngliche vakante Auftrag wartet nun die Fertigstellung der erzeugten Subaufträge ab (vgl. Abbildung 5.7), die nun selbst als vakante Aufträge weiterverarbeitet werden. Ein vakanter Auftrag kann durch den Abtransport zu einer Senke abgeschlossen werden. Der Abtransport zur Senke erfolgt jedoch nur für Aufträge ohne weitere Demontageaufgaben. Dabei handelt es sich in erster Linie um vollständig zerlegte Komponenten, Blattknoten im DPN, die selbst als vakante Subaufträge behandelt werden, aber lediglich noch einen Transport erfordern. Ein Hauptauftrag gilt dann als fertiggestellt, wenn alle untergeordneten Aufträge fertiggestellt wurden, d.h. alle zu Grunde liegenden Komponenten die Senke erreicht haben. Das geschilderte Vorgehen ermöglicht durch den auftragsbezogenen iterativen Charakter eine individuelle Behandlung aller aus dem divergierenden Materialfluss hervorgehenden Baugruppen und somit einen systematischen aber dennoch hochflexiblen Umgang mit Aufträgen auf der Shopfloor-Ebene.

Analog zur Unterteilung in Abbildung 2.1 sind im Rahmen der Auftragsbearbeitung die Aufgaben der **Auftragsfreigabe** und der **Ablaufsteuerung** zu unterscheiden, wobei die Ablaufsteuerung hier der **Auftragsallokation** entspricht. Der Demontageablauf wird dabei vollständig von der Planung entkoppelt, d.h. auf vordefinierte Ablaufpläne wird vollständig verzichtet. Stattdessen sollen sich die Aufträge selbst den möglichst optimalen Weg durch das Demontagesystem suchen. Diese dezentrale Selbststeuerung der Systemkomponenten ver-

spricht eine hohe Robustheit und Stabilität des Systems gegenüber Störungen (Scholz-Reiter & Beer et al. 2008, S. 128). Gleichzeitig spiegelt sich die hohe Flexibilität im Systembetrieb fast vollständig in den Freiheitsgraden und im Aufgabenumfang der Auftragsallokation wider. Sie integriert im weiteren Sinne neben der Belegungsplanung (Scheduling), d.h. der Zuweisung der Aufträge zu Demontagestationen, auch das Sequencing, d.h. die Festlegung der Aufgabenreihenfolge (nicht zu verwechseln mit der Auftragsreihenfolge) und die Funktion des Balancings, mit einer gleichmäßigen Verteilung der Arbeitslast auf die Stationen (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Die Tragweite der Auftragsallokation ist in der vorliegenden Arbeit entsprechend hoch.

5.4.2 Verfahren für die Auftragsfreigabe

Die erste Steuerungsaufgabe ist die Auftragsfreigabe, mit der Aufträge aus dem Auftragsbestand O_{hpt} in den Umlaufbestand O_{wip} des Systems, mit $|O_{wip}| = n_{wip}$ überführt werden. Die Wahl der Produktvariante erfolgt dabei zufällig. Auf eine Reihenfolgebildung wird verzichtet, vgl. Abschnitt 4.1.3⁵. Stattdessen erfolgt eine Varianten- und Produktzustandsunabhängige Einsteuerung nach vorab definierten Freigabekriterien. Das System wird hierzu kontinuierlich überwacht. Sind alle Freigabekriterien erfüllt, wird ein zufälliger Hauptauftrag gezogen und an der Quelle dem System zugeführt.

Ein erstes notwendiges Kriterium für die Auftragsfreigabe ist der verfügbare Platz im Ausgangspuffer der Quelle. Dabei darf die Anzahl der Aufträge im Ausgangspuffer der Quelle $n_{ap,ql}$ die maximale Pufferkapazität $n_{ap,ql}^{max}$ nicht übersteigen. Es gilt:

$$n_{ap,ql} < n_{ap,ql}^{max} \quad 5.14$$

Generell zeichnet sich die vorliegende Systematik als **bestandsregelnde Auftragsfreigabe** aus (Lödding 2016, S. 343), die eine Begrenzung des Umlaufbestands n_{wip} (engl. für **Work in Progress**) fokussiert. Genau genommen kommt eine sogenannte **Conwip-Steuerung** (von Constant Work in Progress) zum Einsatz⁶ (Lödding 2016, S. 375 ff.). Bei dieser werden solange Aufträge freigegeben, bis ein maximal erlaubter Umlaufbestand n_{wip}^{max} erreicht ist. Weitere Aufträge können anschließend erst wieder nach Fertigstellung bestehender aktiver Aufträge freigegeben werden. Das zweite Freigabekriterium ist demnach $n_{wip} < n_{wip}^{max}$.

⁵ Die lose Verbindung der Stationen sowie die Pufferplätze begrenzen den Einfluss der Auftragsreihenfolge auf die Engpassbildung und die Systemleistung im Betrieb (Greschke 2020, S. 237). Durch die zufällige Wahl der Aufträge ergibt sich darüber hinaus eine Nivellierung der Auftragslast.

⁶ In der Praxis wird das Verfahren auch in analoger Form mittels einer begrenzten Anzahl an Conwip-Karten (Lödding 2016, S. 380 ff.) realisiert, welche den Produktionsaufträgen bis zur Fertigstellung fest zugewiesen werden und ohne die keine neue Auftragsfreigabe erfolgen kann. Die Menge der Conwip-Karten beeinflusst schließlich maßgeblich die Auftragsdurchlaufzeit und Systemleistung.

Der maximale Umlaufbestand n_{wip}^{max} ist der zentrale Verfahrensparameter der Conwip-Auftragsfreigabe (Lödding 2016, S. 380). In statischen Systemen, d.h. Systemen mit gleichbleibender Ressourcenkonfiguration und Auftragslast, ist eine Fixierung $n_{wip}^{max} = konst.$ möglich. Im rekonfigurierbaren System würde dies wiederum zu einer Überlastung kleiner bzw. Unterauslastung großer Systeme führen. Stattdessen wird in dieser Arbeit ein dynamischer **kapazitätsorientierter Ansatz** verfolgt. Hierzu wird der Umlaufbestand n_{wip}^{max} proportional an die Pufferkapazität der Stationen im System gekoppelt.

Im weiteren Verlauf werden dazu zwei Verfahren unterschieden. Zunächst die konventionelle **Auftragsregelung**, in der sich der Umlaufbestand an der Anzahl der Aufträge im System orientiert. Hier gilt mit *OIP* für engl. *orders in progress* $n_{wip} = n_{OIP}$. Das agile Demontagesystem unterliegt jedoch einem divergierenden Materialfluss mit rekurrenter Erzeugung von Subaufträgen, welche von diesem konventionellen Ansatz vernachlässigt werden, da dieser nur Hauptaufträge berücksichtigt. Als Alternative wird deshalb ein weiterer Ansatz verfolgt, indem der Umlaufbestand an der Anzahl der Komponenten ausgerichtet wird, mit *CIP* für engl. *components in progress* $n_{wip} = n_{CIP}$. Dieser Ansatz wird **Komponentenregelung** genannt. Anders als die Anzahl der Aufträge, bleiben die Komponenten mit der Freigabe von Hauptaufträgen stets konstant. Der individuelle Produktaufbau findet Berücksichtigung. Da die Arbeitslast je Demontageauftrag in der Tendenz proportional mit der Anzahl der Komponenten wächst, inhäriert die Komponentenregelung neben bestandsorientierten Kriterien auch Eigenschaften eines belastungsorientierten Verfahrens.

Mit einem variablen Conwip-Koeffizienten k_{cw} , der Skalierungskonstante k_{skal} und der Eingangspufferkapazität $n_{ep,s}^{max}$ von Station s ergeben sich die oberen Conwip-Grenzen n_{xip}^{max} (mit *xip* für *x-in-progress*) jeweils mit:

$$n_{xip}^{max} = k_{cw} * k_{skal} * \sum_{s \in S_k} n_{ep,s}^{max} \quad 5.15$$

Als weiteres hinreichendes Kriterium ergibt sich aus der Conwip-Logik für die Auftragsfreigabe:

$$n_{xip} < n_{xip}^{max} \quad 5.16$$

Als Konstante eingesetzt, gleicht k_{skal} die k_{cw} -Skalierung für OIP und CIP aneinander an und dient somit der Grobabstimmung. Der Conwip-Koeffizient k_{cw} kann wiederum zur Feinabstimmung genutzt werden. Eine Untersuchung der Conwip-Freigabeverfahren mit einer Feinabstimmung des Conwip-Koeffizienten k_{cw} und die Ableitung der logistischen Kennlinie des AHDS erfolgt in Unterkapitel 6.2. Das Verfahren der konventionellen Auftragsregelung basiert auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Bail 2023.

5.4.3 Verfahren für die Auftragsallokation

Der zweite Aufgabenbereich der **Steuerung** ist die kontinuierliche Allokation vakanter Aufträge auf die Stationen, entsprechend einer Auftragsfeindisposition, vgl. (Acker 2011, S. 10). Hierzu werden zunächst alle möglichen Demontageoperationen identifiziert und daran anschließend, die durchzuführende Operation ausgewählt. Das Entscheidungsproblem ist mit dem Aufgabenfeld des Dispatchings vergleichbar, in dem Entscheidungen, anders als in der Planung oder dem Scheduling, für unmittelbare Aktionen getroffen werden (Wu & Shen 2020, S. 3). Eine explizite Terminierung einer Demontageoperation ist aufgrund der Systemdynamik und der dezentralen Steuerung nicht möglich. Der tatsächliche Startzeitpunkt einer Operation ist somit abhängig von potentiell erforderlichen Transportoperationen und anfallenden Wartevorgängen, vgl. Abbildung 5.7.

Für den Fall, dass eine Operation scheitert, wird analog zum regulären Vorgehen verfahren, es werden jedoch lediglich Backup-Operationen, d.h. MS-Operationen (vgl. Abschnitt 4.1.1) zur Auswahl gestellt, vgl. Abbildung 5.9. Die Ausführung erfolgt nach Ankunft im Stationseingangspuffer frühestmöglich und unter Berücksichtigung der bestehenden Auftragswarteschlange nach dem FCFS-Prinzip. Resultierende Ablaufpläne im Modus der Auftragsbearbeitung sind demnach stets *unverzögert* (Acker 2011, S. 40).

Der aus möglichen Demontageoperationen bestehende **Aktionsraum** der Auftragsallokation ergibt sich aus den nächsten Demontageaufgaben und den zur Durchführung dieser Aufgaben befähigten Stationen, vgl. Abbildung 5.10. Eine Operation im Aktionsraum ist durch eine Reihe entscheidungsrelevanter Merkmale charakterisiert, die sich aus dem Produkt-, Stations- und Systemzustand ergeben und je nach Zielsetzung in der Allokationsentscheidung berücksichtigt werden sollten. Eine **Auswahl der Entscheidungsmerkmale** ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

Der Erfüllungsgrad der übergeordneten Zielstellung kann erst retrospektiv evaluiert werden und ist letztlich Ergebnis der einzelnen Allokationsentscheidungen in ihrer Gesamtheit. Die Optimalität einer lokalen Einzelentscheidung lässt dabei keinen direkten Rückschluss auf die globale Zielerreichung zu. So kann sich eine greedy-Strategie, d.h. die Wahl der stets geeignetsten Operation aus Sicht eines individuellen Auftrags, bereits mittelfristig negativ im System niederschlagen⁷. Vielmehr bedarf es eines Steuerungsverfahrens, das auch lokal-suboptimale Entscheidungen zulässt, die in der Interaktion der Systemkomponenten zu einem robusten und effizienten Systemverhalten führen (Scholz-Reiter & Beer et al. 2008, S. 129).

⁷ Wird z.B. stets die Station mit der kürzesten Bearbeitungszeit oder der höchsten Erfolgswahrscheinlichkeit allokiert, kommt dies kurzfristig ggf. der Durchlaufzeit der allokierten Aufträge zu Gute, führt aber zu Auslastungsverlusten an den anderen Stationen. Mittelfristig können sich Engpässe mit einer niedrigeren Systemausbringung ausbilden, was letztlich sogar eine höhere mittlere Auftragsdurchlaufzeit zur Folge hat.

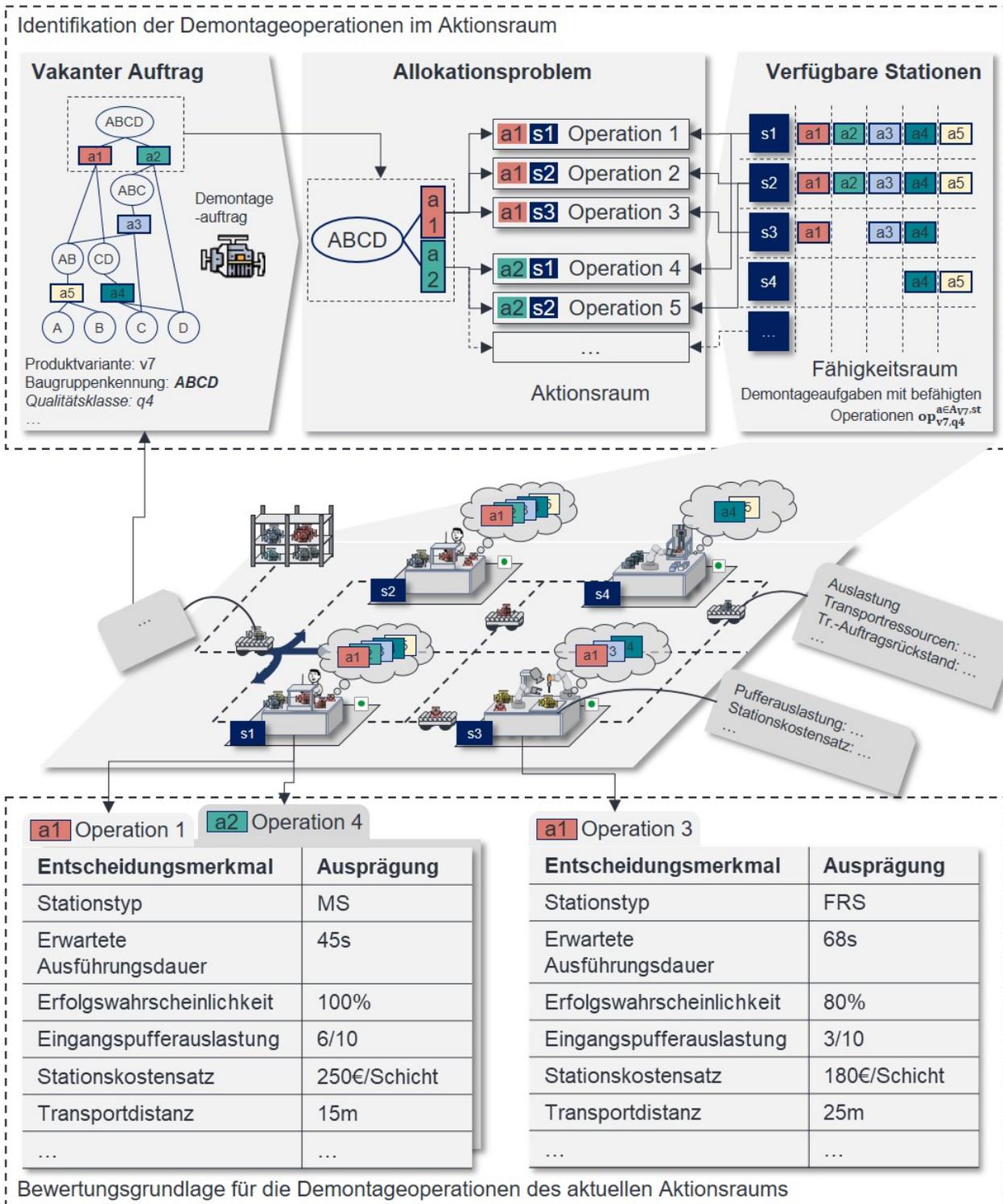


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines individuellen Allokationsentscheidungsproblems; Oben: Aufbau des Aktionsraums aus dem DPN des vakanten Produkts sowie dem Matching der Demontageaufgaben mit fähigen Stationen zur Ableitung von Operationen, Unten: Bewertungsgrundlage zur Auswahl einer Operation anhand verschiedener Entscheidungsmerkmale (Die Ausprägungen der Entscheidungsmerkmale und die Bezeichnungen wurden willkürlich gewählt und dienen lediglich der Anschaulichkeit)

Diese Eigenschaft wird auch als Emergenz⁸ bezeichnet. Tragen die emergenten Eigenschaften des Systems zur Zielerreichung bei, wird auch von positiver Emergenz gesprochen (Scholz-Reiter & Beer et al. 2008, S. 130).

Zusammenfassend liegt der Fokus im Folgenden auf der Entwicklung eines **reaktiven, dezentralen Auftragsallokationsverfahrens**, das eine **positive Emergenz** im System bewirkt.

5.4.3.1 Auswahl der Steuerungsmethode

In diesem Abschnitt wird die Wahl des Steuerungsverfahrens für die Auftragsallokation begründet. Wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, lassen sich die Verfahren für die Ablaufsteuerung in exakte, heuristische und lernende Verfahren unterteilen. Exakte Verfahren sind für die hohe Dynamik im System und für eine reaktive, dezentrale Steuerung zu träge und daher generell ungeeignet. Ein bereits trainierter lernender Entscheidungsagent ist wiederum generell in der Lage, in komplexen Umgebungen in Echtzeit gute Entscheidungen zu treffen (Kuhnle 2020; Lang 2023). Im Rahmen einer Vorstudie zu dieser Arbeit konnte so bereits das Potential eines Reinforcement Learning-Verfahrens für die Ablaufsteuerung im agilen Demontagesystem nachgewiesen werden (Wurster & Michel et al. 2022). Mit steigender Systemkomplexität (z.B. durch Relaxierung von vereinfachenden Annahmen) bzw. einer sich ändernden Systemstruktur durch Systemadaption, nimmt die Eignung von Lernverfahren bzw. die Adaptivität für die Systemsteuerung jedoch zunehmend ab. Die Industrietauglichkeit ist eingeschränkt.

Im Remanufacturing erfolgt die Demontagesteuerung heute in Teilen willkürlich oder mit einfachsten Mitteln. Eine durchgängige Vernetzung und Datenverfügbarkeit in Demontagesystemen vorausgesetzt, stellen heuristische Lösungsverfahren eine industrietaugliche Lösung dar, die ein erhebliches Verbesserungspotential für die Ablaufsteuerung in Demontagesystemen verspricht. Die in der Praxis für die Steuerung oder das Scheduling von Werkstattfertigungen wohl am häufigsten eingesetzten Heuristiken sind die **Prioritätsregelverfahren**. Diese werden als Konstruktionsverfahren auch der Gruppe der Eröffnungsverfahren zugeordnet, da sie im Scheduling die Erzeugung initialer Belegungspläne ermöglichen, welche dann mittels Verbesserungsverfahren oder lokalen Suchverfahren optimiert werden können (Acker 2011, S. 104 ff.). Die Gründe die auch im vorliegenden Anwendungsfall für den Einsatz von Prioritätsregeln sprechen, sind die hohe Effizienz, Robustheit, Entscheidungsgüte, die einfache Erweiterbarkeit und die gute Nachvollziehbarkeit (Neidhardt 2007, S. 172 f.). Neben der Generierung von Ablaufplänen (Briskorn & Hartmann 2021, S. 114) werden Prioritätsregelverfahren häufig auch in der Pufferpriorisierung eingesetzt, wobei die Bearbeitungsfolge aus einer Menge gepufferter Aufträge an einer Maschine bzw. Station festgelegt wird. Hierzu wird

⁸ Emergenz: „Durch simples Verhalten und Interaktion auf lokaler Ebene wird [...] auf globaler Ebene ein gewünschtes Verhalten erzeugt.“ (Scholz-Reiter & Beer et al. 2008, S. 129)

jedem Auftrag ein Prioritätswert zugewiesen, nach dem die Aufträge sortiert und abgearbeitet werden (Neidhardt 2007, S. 62 f.).

In dieser Arbeit werden Prioritätsregeln für die Auftragsallokation genutzt. Anders als in der Pufferpriorisierung werden jedoch nicht je Station die Aufträge, sondern je Auftrag die Operationen (vgl. Abbildung 5.10) priorisiert. Die Aufträge konkurrieren nicht um die Stationen, sondern die **Stationen konkurrieren um die Aufträge**. Die Regeln entsprechen Bewertungskriterien, die der Identifikation der geeignetsten Operation dienen.

5.4.3.2 Entwicklung eines Multi-Prioritätsregelverfahrens

Wie Abbildung 5.10 zeigt, beeinflussen verschiedene Einflussfaktoren die Allokationsentscheidung. Das Entscheidungsproblem ist ambivalent. Eine unikriterielle Wahl einer Operation ist potentiell zu kurz gedacht und führt zu Einbußen in der Lösungsgüte. Hier ist auf die mangelnde Voraussicht von Prioritätsregeln in der Entscheidungsfindung hinzuweisen (Neidhardt 2007, S. 173). So agiert eine einzelne Prioritätsregel kurzfristig bzw. greedy (Domschke & Drexl et al. 2015, S. 138). Um diesen Nachteil zu adressieren, wird ein **Multi-Prioritätsregelverfahren** (MPV) vorgeschlagen, welches auf der Kombination multipler Prioritätsregeln beruht⁹. Dazu werden die möglichen Operationen gleichzeitig mit mehreren Regeln evaluiert und Einzelwertungen $\nu_{\pi}(op)$ verteilt. Die normierten Einzelwerte werden schließlich in einer konvex-gewichteten Summe verrechnet¹⁰. Durch Integration vorausschauender Entscheidungskriterien erlangt die Steuerung eine taktisch-orientierte Komponente. Der resultierende **Prioritätswert** ν_{op} einer Operation op ergibt sich nach Formel 5.17 (vgl. Wurster & Bail et al. 2023). Die Auswahl der besten Operation \hat{op} erfolgt schließlich nach Gleichung 5.18:

$$\nu(op) = \sum_{\pi \in \Pi} \nu_{\pi}(op) * w_{\pi} \quad 5.17$$

$$\hat{op} = \operatorname{argmax}_{op \in Op_{pot}} \nu(op) \quad 5.18$$

mit

1. Prioritätsregel $\pi \in \Pi = [NPA, KOZ, \dots]$
2. Regelprioritätswert $\nu_{\pi}(op)$ für Regel π
3. Regelgewichtung w_{π} , wobei stets gilt: $\sum_{\pi \in \Pi} w_{\pi} = 1$
4. Aktionsraum Op_{pot}

⁹ Bereits Boctor (1990) weist nach, dass sich durch den kombinierten Einsatz mehrerer Prioritätsregeln die Lösungsgüte im Scheduling erhöht, vgl. Kolisch & Hartmann 1999, S. 7.

¹⁰ Neidhardt (2007, S. 67) fasst vergleichbare Ansätze unter dem Begriff *Gewichtete Prioritätsindizes* zusammen.

Die Menge II setzt sich aus verschiedenen Prioritätsregeln zusammen. Die Zusammensetzung, im weiteren Verlauf auch **Regelkombination (RK)** genannt, bestimmt dabei die Ausrichtung der Steuerung und sollte zusammen mit der Gewichtung gemäß der übergeordneten Zielgrößen erfolgen. Der Einfluss der individuellen Prioritätsregeln auf die Erfüllung der jeweiligen Einzelziele kann dabei stark variieren. Die folgende Auswahl besteht aus domänenneutralen und -spezifischen Prioritätsregeln für die Auftragsallokation in agilen Demontagesystemen. Die folgenden fünf Regeln bieten besonderes Potential für die Leistungsmaximierung und sind Teil der Modellierung bzw. der Untersuchung in Kapitel 6.

- **NPA: *Niedrigste Pufferauslastung*** fördert eine gleichmäßige Verteilung der Aufträge auf die Stationen des Systems. Der Regelprioritätswert $\nu_{NPA}(op)$ ergibt sich mit der Anzahl der Aufträge im Eingangspuffer $n_{ep,s}$ und der Kapazität $n_{ep,s}^{max}$ der ausführenden Station s vgl. Formel 5.19.
- **KOZ: *Kürzeste Operationszeit*** priorisiert Demontageoperationen mit niedriger Ausführungsdauer. Diese Regel ist vergleichbar mit der weitläufig bekannten SPT-Regel (von engl. Shortest Processing Time). Für eine inhärente Normalisierung erfolgt die Wertung dabei unter Berücksichtigung der minimalen $t_{a,q}^{min}$ Operationsdauer einer Demontageaufgabe a in Qualitätsklasse q . Es gilt Formel 5.20. Ist die Ausführungsdauer unsicherheitsbehaftet, können auf gleiche Weise Erwartungswerte verwendet werden.
- **HEW: *Höchste Erfolgswahrscheinlichkeit*** priorisiert effektive Operationen mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit $p_{erfolg,op}$. Falls die tatsächliche Erfolgswahrscheinlichkeit unbekannt ist, können analog zu KOZ Erwartungswerte herangezogen werden. Der Regelprioritätswert ergibt sich mit Formel 5.21.
- **NTA: *Niedrigster Transportaufwand*** fokussiert die Vermeidung von Transportoperationen. Befindet sich ein vakanter Auftrag an einer Station, werden weiterführende Operationen an dieser Station priorisiert. Die Priorisierung erfolgt binär gemäß Formel 5.22.
- **NSK: *Niedrigste Stationskosten*** priorisiert Operationen an Stationen mit niedrigen Kosten. Die Entscheidung erfolgt anhand der Stationstyp-spezifischen Stationsstundensätze c_{op} . Die Normalisierung und Skalierung des Prioritätswerts erfolgt analog zu KOZ mithilfe der maximalen c^{max} und minimalen c^{min} Stationsstundensätze vgl. Formel 5.23. In kostenoptimierten Systemkonfigurationen mit wenigen kostenintensiven Stationen ermöglicht NSK die Reduktion von Engpässen.

$$\nu_{NPA,op} = 1 - \frac{n_{ep,s}}{n_{ep,s}^{max}} \quad 5.19$$

$$\nu_{KOZ,op} = \max\left(0, 2 - \frac{t_{op}}{t_{v,q}^{a,min}}\right) \quad 5.20$$

$$\nu_{HEW,op} = p_{erfolg,op} \quad 5.21$$

$$\nu_{NTA,op} = \begin{cases} 1 & \text{falls kein Transport erforderlich,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad 5.22$$

$$\nu_{NSK,op} = \frac{c_{op} - c^{min}}{c^{max} - c^{min}} \quad 5.23$$

Für eine effektive Kombination verschiedener Prioritätsregeln und zur Vermeidung numerischer Instabilität sind alle Regelprioritätswerte $\nu_{\pi}(op)$ normalisiert. Dennoch sind nicht alle Regelprioritätswerte notwendigerweise gleichmäßig im Intervall $[0,1]$ verteilt, z.B. aufgrund von linksschiefen, rechtsschiefen oder binären Verteilungen. Der Regelgewichtung kommt damit auch eine Ausgleichsfunktion zu.

Das MPV wird in erster Linie durch den Modellierungsfokus dieser Arbeit eingegrenzt. Bei einer Relaxierung der Modellannahmen (vgl. Abschnitt 4.1.3) bzw. einer Modellerweiterung könnte das MPV durch zusätzliche Regeln einfach erweitert und an neue Zielgrößen angepasst werden. Eine exemplarische Auswahl solcher, hier nicht weiter modellierter und untersuchter Regeln sind:

- **NAW:** *Niedrigste Ausschusswahrscheinlichkeit* zur Priorisierung von Operationen mit dem niedrigsten Ausschussrisiko zur Steigerung der Produktregenerationsrate.
- **NEE:** *Niedrigste erwartete Ermüdung* zur Priorisierung von Operationen, welche die niedrigste Ermüdung der Betriebsressourcen zur Folge haben.
- **GEF:** *Größte Erfahrung und Fähigkeit* zur Priorisierung von Stationen, welche sich durch ein höheres Maß an Befähigung von alternativen Stationen abheben.
- **NRA:** *Niedrigster Rüstaufwand* zur Priorisierung der Durchführung von Operationen an Stationen mit dem geringsten Rüstaufwand. Dies sind Stationen, die keine Umrüstung erfordern oder sich bereits im richtigen Rüstzustand befinden.

5.5 Adaption der Auftragsallokation

Das folgende Unterkapitel beschäftigt sich mit der Generalisierung des Allokationsverfahrens durch Parameteradaption, beginnend mit einer Einordnung der Problemstellung und einer Vorstellung von drei metaheuristischen Lösungsverfahren. Das Vorgehen zur Adaption der Auftragsallokation sowie die verwendeten Metaheuristiken bauen auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Bail 2023 auf.

Eine zentrale Einflussgröße des Multi-Prioritätsregelverfahrens ist neben der Regelkombination (RK) die **Gewichtungskonfiguration (GK)** der Einzelregeln. Der Zweck der Gewichtung ist die Normierung und die Hervorhebung der Relevanz der Einzelregeln. Letztere hängt ab von den gegebenen Zielgrößen sowie der u.a. aus dem Produktionsprogramm und der Systemkonfiguration resultierenden Belastung des Systems. Ein Concept Drift bzw. die Änderung der Randbedingungen kann zu einer Verschiebung der optimalen GK führen. So ist insbesondere das AHDS auf eine sich regelmäßig ändernde Systembelastung ausgelegt. Um eine performante Systemsteuerung und einen performanten Systembetrieb auch unter wechselnden Bedingungen zu gewährleisten, muss die GK entsprechend mit angepasst werden. Im Idealfall wird durch die Dynamisierung bei Lastwechsel jeweils die optimale GK identifiziert, welche die Steuerung optimal auf die Zielgrößen ausrichtet. Eine Herausforderung dieses Ansatzes ist der mehrdimensionale Suchraum, dessen Durchsuchung ein nicht analytisch lösbares Optimierungsproblem darstellt. Eine ableitbare Zielfunktion ist nicht gegeben. Gradientenbasierte Verfahren sind entsprechend ungeeignet. Die Evaluation einer GK ist nur durch ausprobieren, hier Simulation, möglich. Im Fall der Simulation ist dies mit einem nicht zu vernachlässigenden Rechenaufwand verbunden¹¹.

Um eine gute Lösung in annehmbarer Zeit zu finden, muss auf eine vollständige Enumeration des Lösungsraums verzichtet werden. Für eine effiziente Suche wird stattdessen eine heuristische Approximation der optimalen GK fokussiert. Wie bereits in Abschnitt 5.4.3.1 angemerkt, eignen sich hierfür sogenannte **Metaheuristiken, regelbasierte Algorithmen zur näherungsweise Problemlösung** (vgl. Wurster & Bail et al. 2023). Die Verfahren sind selbst problemagnostisch und können nach problemspezifischer Kopplung auf (beliebig viele) verschiedene Formen von Optimierungsproblemen angewendet werden. Eine universell-gute Metaheuristik gibt es jedoch nicht¹². Stattdessen variiert die Effektivität und die Effizienz einer Metaheuristik mit der Problemstellung. Für neue Problemstellungen ist demnach auch die Eignung einzelner Metaheuristiken erneut zu untersuchen.

¹¹ Konkret lässt sich das vorliegende Problem als ein „Black-Box“ globales Optimierungsproblem klassifizieren (Gutjahr 2010, S. 531). Lösungsverfahren, welche den genauen Zusammenhang zwischen den Eingangsparametern und der Fitness der Lösung nicht kennen, werden entsprechend auch „Black-Box-Optimierungsverfahren“ genannt.

¹² Es gilt das No-Free-Lunch-Theorem (Roy & Yu et al. 2010, S. 102 ff.).

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Metaheuristiken implementiert, erprobt und verglichen. Im Fokus stehen das *Simulated Annealing*, *Particle Swarm Optimization* und *Artificial Bee Colony Optimization*, die im Rahmen von Vorstudien im Vergleich mit weiteren Optimierungsalgorithmen (u.a. *Bayessche Optimierung*, *Ameisenalgorithmen*, *Evolutionäre Algorithmen*) das größte Einsatzpotential zeigten. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der drei metaheuristischen Verfahren erfolgt in Anhang A1. Die GK $(w_{\pi_1}, w_{\pi_2}, \dots)$ werden dabei vereinfachend als Gewichtungsvektor w notiert. Mit der Systemausbringung als Optimierungsziel äußert sich das Optimierungsproblem einheitlich als **Maximierungsproblem**.

5.6 Verfahren für die Systemrekonfiguration

Im Folgenden wird ein Systemkonfigurator entwickelt, der periodisch den Kapazitätsbedarf überwacht und die Systemrekonfiguration anstößt. Die Kernkomponente des Konfigurators ist die Kapazitätsbedarfsplanung, welche basierend auf dem Auftragsbestand einer Planungsperiode den Demontageressourcenbedarf ermittelt. Dabei ist das Ziel, über den Planungszeitraum die kostenoptimale Kapazitätsstrategie zu realisieren. Neben Art und Menge der Stationen wird eine Systemkonfiguration durch die Ableitung eines Systemlayouts komplettiert. Dies ist die Aufgabe der Layoutplanung, für die keine Verfahrensentwicklung erfolgt und nur am Rande untersucht wird, s. Anhang A4. Zunächst werden die vier Taktiken der Planung erläutert. In einem zweiten Schritt wird ein parametrierbares Kapazitätsdeckungsverfahren vorgestellt. Als Alternative wird zudem ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell präsentiert, welches eine vorausschauende Systemkonfiguration bei strikter Kostenoptimierung ermöglicht.

5.6.1 Taktik und Ablauf der Kapazitätsplanung

Um die Wirtschaftlichkeit des Demontagebetriebs zu steigern, müssen die Betriebs- und Logistikkosten minimiert werden. Diese werden durch die Entscheidungen der Kapazitätsplanung zur Systemkonfiguration bestimmt. Dabei können konkret vier Taktiken bzw. Hebel identifiziert werden, durch die eine Kostenreduktion herbeigeführt werden kann (vgl. A_Feuerstein 2023):

1. Wahl hinreichend vieler Stationen zur **Vermeidung von Verzugskosten**
2. Wahl der jeweils **günstigsten Stationen nach Betriebskosten**
3. Wahl der Systemkonfiguration mit den **geringsten Rekonfigurationskosten**¹³

¹³ Diese sind abhängig vom Stations- bzw. Ressourcentyp und dem Rekonfigurationsumfang. Es gilt, je geringer der Systemeingriff, desto niedriger die Kosten. Erhöhte Rekonfigurationskosten müssen sich durch einen effizienteren Betrieb und niedrigere Betriebskosten amortisieren.

4. Wahl der Systemkonfiguration mit der **höchsten prädizierten Systemauslastung** und dem **geringsten Engpassrisiko**.

Für Taktik 2 kann die **Kosteneffizienz** der Ausführung einer Demontageaufgabe an einer Station mit dem zu Grunde liegenden Ressourcentyp r anhand des Ressourcenkostensatzes $c_{r,btrb}$, der erwarteten Ausführungsdauer t_{op} und der erwarteten Erfolgswahrscheinlichkeit $p_{erfolg,op}$ mittels Formel 5.24 beschrieben werden (vgl. A_Feuerstein 2023):

$$c_{op}^{eff} = \frac{c_{r,btrb} * t_{op}}{p_{erfolg,op}} \quad 5.24$$

Es gilt, je kleiner c_{op}^{eff} , desto höher die Kosteneffizienz. Da die Kosteneffizienz von erforderlichen Backup-Operationen nicht berücksichtigt wird, stellt die Formel jedoch lediglich eine Näherung dar. Die Kosten einer erfolgreichen Ausführung alternativer Operationen für dieselbe Demontageaufgabe wird dennoch vergleichbar.

Da die vorliegende DPS-Entwicklung einem **Sukzessivplanungsansatz** folgt (Kellner & Lienland et al. 2022, S. 205), ist grundsätzlich der **Idealbetrieb** vom **Realbetrieb** zu unterscheiden. Im Idealbetrieb, von dem in der aggregierenden Kapazitätsplanung ausgegangen wird, kann die Kapazität jeder Station vollständig produktiv abgerufen werden. In der tatsächlichen Umsetzung, dem Realbetrieb, treten jedoch meist Auslastungsverluste auf, z.B. in der Anlaufphase oder durch die Ausbildung von Engpässen. Somit ist die Systemleistung im Idealbetrieb immer mindestens gleich hoch oder höher als im Realbetrieb. Wie groß die Differenz ausfällt, ist abhängig von der gewählten Systemkonfiguration sowie der Systemsteuerung.

Anders als die ersten drei kostenbezogenen Taktiken fokussiert Taktik 4 nicht den Idealbetrieb, sondern die Herausforderungen des Realbetriebs. Das Ziel ist hierbei die Wahl einer Systemkonfiguration, für die der Realbetrieb möglichst wenig vom Idealbetrieb abweicht. Die Planung ist damit betriebs-, steuerungs- bzw. engpassorientiert.

Im Folgenden werden ein heuristisches und ein auf linearer Optimierung basierendes Kapazitätsplanungsverfahren vorgestellt. Beide Verfahren bauen gleichermaßen auf einer hypothetischen Allokation aller potentiell durchzuführenden Demontageaufgaben auf die potentiell verfügbaren Demontageressourcen auf. Dabei liegt das Mengengerüst des Produktionsprogramms als Input zu Grunde. Der zeitbezogene Ressourcenbedarf je Ressourcentyp ergibt sich durch Kumulation der ressourcenspezifischen Belegungszeiten. Aus der ermittelten Bearbeitungskapazität je Ressourcentyp ergibt sich schließlich eine Systemkonfiguration, vgl. Abbildung 5.11. Im Wesentlichen folgen die Verfahren damit der Kapazitätsplanungsmethode von Kettner & Schmidt et al. 2010, S. 54 ff., welche die Verfügbarkeit eines definitiven Produktionsprogramms voraussetzt. Die Anzahl der erforderlichen Ressourcen je Typ ergibt sich nach



Abbildung 5.11: Ablaufschema der analytisch-heuristischen Kapazitätsplanung (adaptiert in Anlehnung an Kettner & Schmidt et al. 2010, S. 54 und Grundig 2018, S. 85)

Kettner & Schmidt et al. (2010, S. 55) aus dem Quotienten der erforderlichen Belegungszeit von Ressourcentyp r (Kapazitätsbedarf) und der verplanbaren Ressourcenbelegungszeit (verfügbare Kapazität) nach Formel 5.25:

$$\text{Bedarf Ressourcentyp } r = \frac{\text{Erforderliche Belegungszeit Ressourcentyp } r}{\text{Verplanbare Belegungszeit je Ressource von Typ } r} \quad 5.25$$

In seiner ursprünglichen Form zielt der Ansatz von Kettner auf längerfristige Planungszeiträume und berücksichtigt dabei z.B. auch Rüstaufwände, den Zeitnutzungsgrad der Ressourcen oder das zu Grunde liegende Schichtsystem. Im vorliegenden, auf kürzere Planungszeiträume ausgerichteten Ansatz, entspricht die verplanbare Ressourcenbelegungszeit vereinfacht abzugsfrei der unterbrechungsfreien Periodendauer t_k . Der Gesamtkapazitätsbedarf wird je Ressourcentyp mit $t_{r,belegt}^k$ definiert und im Rahmen der Aufgabenallokation festgelegt. Der hypothetischen Auftragsallokation in der Planung kommt aufgrund der sich durch die verschiedenen Ressourcentypen ergebenden Freiheitsgrade eine besondere Bedeutung zu. Das heuristische Verfahren bestimmt den Ressourcenbedarf in deterministischer Form ohne Optimalitätsgarantie. Zur Realisierung der zuvor beschriebenen Taktiken sind domänenspezifische Allokationsregeln erforderlich. Aus dem nach der Aufgabenallokation bestimmten Bearbeitungskapazitätsbedarf wird unmittelbar die Systemkonfiguration abgeleitet, vgl. Abbildung 5.11. Die Ist-Systemkonfiguration der Vorperiode sowie entstehende Rekonfigurationsaufwände werden nicht berücksichtigt. Das Verfahren entspricht einer Neuplanung.

Das exakte Verfahren variiert wiederum die Aufgabenallokation und wählt kostenbasiert die optimale Lösung. Die sich aus der ermittelten Bearbeitungskapazität ergebende Systemkonfiguration wird mit der vorausgehenden Systemkonfiguration der Vorperiode abgeglichen, vgl. Abbildung 5.12. Alle Schritte von der Aufgabenallokation bis zur Kostenbewertung sind

in den Optimierungslauf integriert. Das Verfahren inhäriert automatisch Taktik 1, 2 und 3. Die Lösungsqualität steigt beschränkt mit der vorgehaltenen Rechenzeit, wobei unter der Annahme eines Idealbetriebs in der Planung ein hypothetisches Kostenoptimum erreicht werden kann.

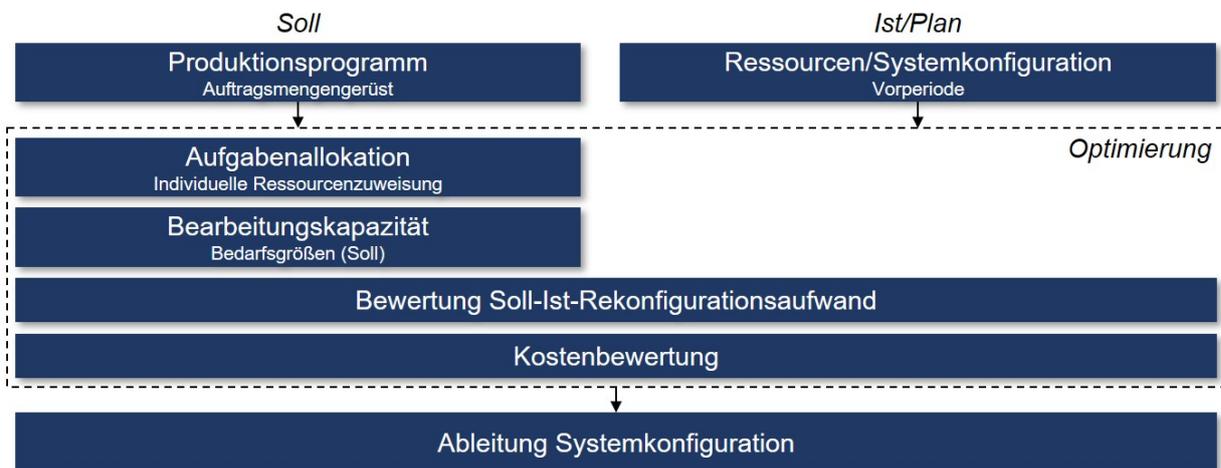


Abbildung 5.12: Ablaufschema des auf linearer Optimierung basierten Kapazitätsplanungsverfahrens (adaptiert in Anlehnung an Kettner & Schmidt et al. 2010, S. 54 und Grundig 2018, S. 85)

5.6.2 Analytisch-heuristische Kapazitätsdeckungsrechnung

In diesem Abschnitt wird eine analytische Berechnungsvorschrift mit einem heuristischen Allokationsverfahren zur Ableitung des Ressourcenbedarfs kombiniert. Das analytisch-heuristische Verfahren basiert im Kern auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Mak 2022.

Wie Abbildung 5.13 plakativ zeigt, basiert das Verfahren auf drei Schritten: die analytische **Differenzierung** der zu allozierenden Demontageaufgaben, die heuristische **Allokation** der Aufgaben mit einer entsprechenden Kapazitätsbindung je Aufgabe sowie schließlich die analytische **Aggregation** und Ableitung des ressourcenspezifischen zeitlichen Kapazitätsbedarfs $t_{r,belegt}^k$, aus dem wiederum der Ressourcenbedarf n_r^k als die erforderliche Ressourcenanzahl je Ressourcentyp r hervorgeht. Hierbei wird die **Produktsicht** über die **Operationssicht** mit der **Ressourcensicht** verknüpft. Dabei wird in der konkreten Umsetzung, anders als Abbildung 5.13 vereinfachend zeigt, mittels Matrix-Algebra ein Ressourcenbedarfvektor \mathbf{n}_k^R bestimmt, der für alle Ressourcentypen $R = \{MS, FRS, DV1, DV2, \dots\}$ (vgl. Abschnitt 5.1.2) die in Periode k erforderliche Anzahl n_r^k enthält.

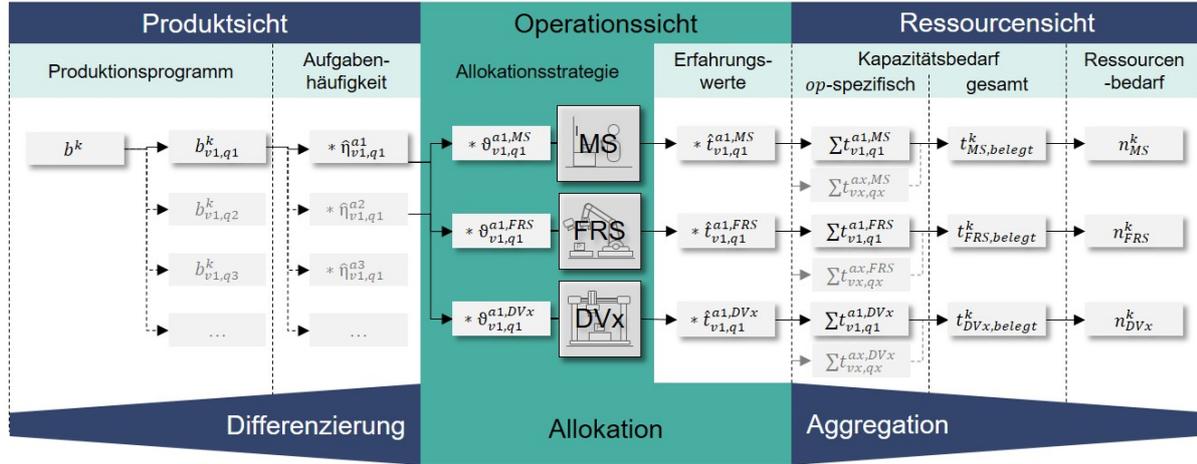


Abbildung 5.13: Analytisch-heuristische Systematik der aggregierten Kapazitätsbedarfsbestimmung: Veranschaulichung von Differenzierung, Allokation und Aggregation (Vernachlässigung der fehlerinduzierten Aufgabenallokation)

Konkret erfolgt die Kapazitätsbedarfsbestimmung kumulativ nach heuristischer Allokation der Demontageaufgaben $a \in A_v$ für alle Produktvarianten $v \in V$. Hierbei wird die **reguläre Aufgabenallokation RA** und die **fehlerinduzierte Aufgabenallokation FA** unterschieden. Die RA bildet den auf erfolgreiche Erstversuche zurückzuführenden ressourcentypspezifischen Kapazitätsbedarf. Die in Abbildung 5.13 vernachlässigte FA berücksichtigt im Umkehrschluss den durch Backup-Aufgaben entstehenden zusätzlichen Kapazitätsbedarf. Die Allokation erfolgt mit $\mathbf{RA}_{v,a}^{R \times Q_v} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{|R| \times |Q_v|}$ und $\mathbf{FA}_{v,a}^{R \times Q_v} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{|R| \times |Q_v|}$. Das bedeutet, es existiert, jeweils für RA und FA für jede Aufgabe a einer Produktvariante v eine Allokationsmatrix, die für jede Qualitätsklasse q angibt, zu welchem Anteil die Aufgaben auf den Ressourcentypen $r \in R$ auszuführen sind. Entsprechend erfolgt die Berechnung der Allokationsmatrizen sowie der erforderlichen Belegungszeit je Ressourcentyp mit dem Vektor $\mathbf{t}_{k,belegt}^R \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{|R|}$ und die zu rundende Anzahl der Ressourcen je Typ mit dem Vektor $\mathbf{n}_k^R \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{|R|}$:

$$\mathbf{RA}_{v,a}^{R \times Q_v} = \Theta_{v,a}^{R \times Q_v} \quad 5.26$$

$$\mathbf{FA}_{v,a}^{R \times Q_v} = \Xi^{R \times R} \cdot \left((\mathbf{1}^{R \times Q_v} - \hat{\mathbf{P}}_{v,a}^{R \times Q_v}) \odot \Theta_{v,a}^{R \times Q_v} \right) \quad 5.27$$

$$\mathbf{t}_k^R = \sum_{v \in V} \sum_{a \in A_v} \left((\mathbf{RA}_{v,a}^{R \times Q_v} + \mathbf{FA}_{v,a}^{R \times Q_v}) \odot \hat{\mathbf{T}}_{v,a}^{R \times Q_v} \right) \cdot (\mathbf{b}_{v,k}^{Q_v} \odot \boldsymbol{\eta}_{v,a}^{Q_v}) \quad 5.28$$

$$\mathbf{n}_k^R = \frac{1}{t_k} \mathbf{t}_{k,belegt}^R \quad 5.29$$

Es gilt:

- $\Theta_{v,a}^{R \times Q_v} = (\vartheta_{rq}), \vartheta_{rq} \in \mathbb{R}, \vartheta_{rq} \in [0,1]$ ist eine Matrix, die für jede Aufgabe a die Verteilung auf die Ressourcentypen R in Abhängigkeit von den Produktzuständen Q und

Fähigkeiten festlegt. Diese Verteilung ist anpassbar und spiegelt die jeweilige Ressourcenallokationsstrategie wider.

- $\hat{\mathbf{T}}_{v,a}^{R \times Q_v} = (\hat{t}_{rq}), \hat{t}_{rq} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ ist eine Matrix mit den Erwartungswerten für die individuellen Operationsdauern. In Skalarform wird $\hat{t}_{v,q}^{a,r}$ notiert.
- $\hat{\mathbf{P}}_{v,a}^{R \times Q_v} = (\hat{p}_{rq}), \hat{p}_{rq} \in \mathbb{R}, \hat{p}_{rq} \in [0,1]$ ist eine Matrix mit den erwarteten Erfolgswahrscheinlichkeiten für die individuellen Operationen. In Skalarform wird $\hat{p}_{v,q}^{a,r}$ notiert.
- $\Xi^{R \times R} = (\xi_{rr}), \xi_{rr} \in \mathbb{R}, \xi_{rr} \in [0,1]$ ist eine quadratische Matrix, in der die anteilige Verteilung der Backup-Operationen im Falle scheiternder Operationen festgelegt wird. Die Matrix spiegelt die Backup-Strategie wider. Es gilt:

$$\xi_{rr'} = \begin{cases} \in (0,1], & \text{falls } r \text{ anteilig Aufgaben von } r' \text{ übernimmt} \\ 0, & \text{falls } r \text{ keine Aufgaben von } r' \text{ übernimmt} \end{cases} \quad 5.30$$

Unter der Annahme, dass lediglich die FRS einem Scheiterrisiko unterliegt und Backup-Operationen stets von der MS übernommen werden (vgl. Abschnitt 4.1.1), gilt $\xi_{rr'} = 0 \forall r, r'$ mit Ausnahme $\xi_{MS,FRS} = 1$.

- $\mathbf{b}_{v,k}^{Q_v} = (b_q), b_q \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ ist ein Vektor mit den Stückzahlen je Qualitätsklasse q einer Variante v in k und beschreibt damit den Auftragsbestand. In Skalarform wird auch $b_{v,q}^k$ für den individuellen und b^k für den zusammengefassten Auftragsbestand notiert.
- $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{v,a}^{Q_v} = (\hat{\eta}_q), \hat{\eta}_q \in [0,1]$ ist ein Vektor mit der von q abhängigen Häufigkeitsverteilung einer Demontageaufgabe. Die Häufigkeitsverteilung ergibt sich aus dem Demontage-Petri-Netz (DPN) unter Annahme der Gleichverteilung optionaler Demontageaufgaben bei alternativen Demontagesequenzen. In Skalarform wird auch $\hat{\eta}_{v,q}^a$ notiert.
- $t_k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ ist die Dauer von Periode k .

Durch die Bestimmung des Ressourcenbedarfs stellt die analytische Komponente des Verfahrens lediglich die Kapazitätsdeckung sicher. Es bedarf jedoch einer geeigneten **Allokationsstrategie**, um die sich aus den redundanten Ressourcenfähigkeiten ergebenden Freiheitsgrade kostenoptimierend zu nutzen. Die Parametrierung der Allokationsmatrizen erfordert hierzu Domänenwissen.

Abbildung 5.14 beschreibt die vom analytisch-heuristischen Verfahren genutzte Allokationsstrategie und wie sich diese in der Allokationsmatrix $\Theta_{v,a}^{R \times Q_v}$ niederschlägt. Der Allokationsstrategie liegt dabei vereinfachend die Annahme zu Grunde, dass eine AS-Operation, falls befähigt, stets die kostengünstigste Alternative darstellt. Unter dieser Prämisse reduziert sich

der Lösungsraum und für jede aus dem Auftragsbestand hervorgehende Demontageaufgabe gilt:

1. AS befähigt: Nachfrageallokation AS
2. AS und FRS nicht befähigt: Nachfrageallokation MS
3. AS nicht befähigt, FRS befähigt: anteilige Nachfrageallokation gemäß Roboterstrategie

Die Verteilung von Aufgaben, für die neben der FRS lediglich die MS befähigt ist, wird über die **Roboterstrategie** geregelt, hinter der sich ein Verteilfaktor λ verbirgt, der den MS-Allokationsanteil für FRS-befähigte Demontageaufgaben festlegt. Für $\lambda = 0$ wird die maximale FRS-Kapazität abgerufen. Im Umkehrschluss wird für $\lambda = 1$ auf FRS vollständig verzichtet. Eine Untersuchung der Roboterstrategie erfolgt in Abschnitt 6.5.1.

Wie Abbildung 5.14a) zeigt und in Abschnitt 5.1.2 definiert, ist die MS zur Durchführung aller Demontageaufgaben befähigt. Sie stabilisiert den Systembetrieb, ist aufgrund der erhöhten Kosten jedoch erst die letzte Wahl. Der sich durch die Allokationsstrategie ergebende Kapazitätsbedarf setzt sich wie folgt zusammen:

- I. **MS-Primärallokation:** Allokation, falls nur MS befähigt
- II. **MS-Sekundärallokation:** Allokationsanteil nach Roboterstrategie
- III. **MS-Tertiärallokation:** Allokationsanteil der Backup-Operationen

Abbildung 5.14b) fasst die Allokationsstrategie des Verfahrens in einem Entscheidungsschema zusammen.

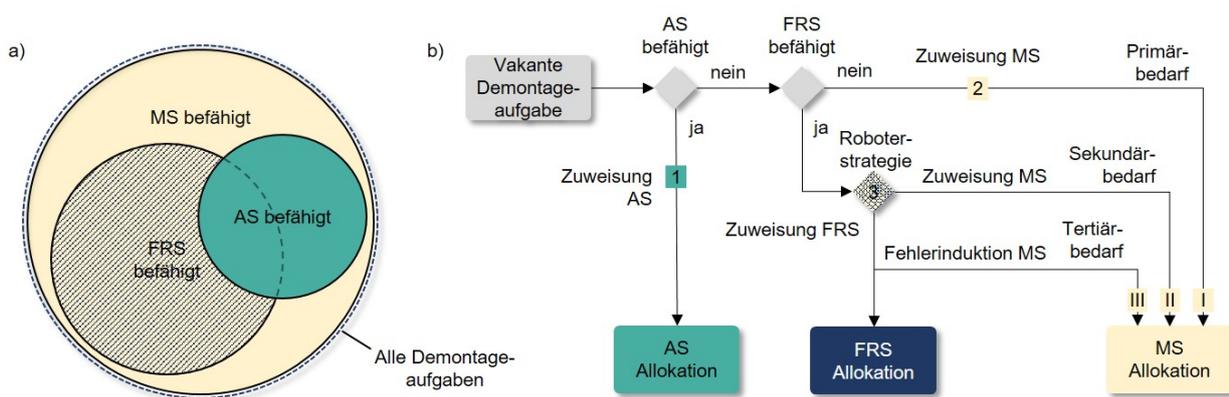


Abbildung 5.14: Verdeutlichung der Allokationsstrategie des heuristischen Verfahrens: a) Aufteilung der Demontageaufgaben nach Befähigung b) Allokationsentscheidungsschema

Durch die Anwendung der Allokationsstrategie im Rahmen der Kapazitätsdeckungsrechnung erfüllt das Verfahren die Eigenschaften einer **Heuristik**. Nachfolgend wird es daher in abgekürzter Form auch als heuristisches Verfahren bezeichnet. Die starren Allokationsregeln des heuristischen Verfahrens sorgen für nachvollziehbare Planungsentscheidungen, erlauben jedoch keine ganzheitliche Optimierung der prädierten Kosten. Für eine globale Kostenoptimierung in der Planung und eine mehrperiodige Vorausschau wird daher im folgenden Abschnitt ein exaktes Optimierungsverfahren vorgestellt.

5.6.3 Exaktes Kostenoptimierungsverfahren

In diesem Abschnitt wird das Kapazitätsplanungsproblem als **gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem** (engl. MILP für Mixed Integer Linear Program) formuliert (Domschke & Drexl et al. 2015, S. 127). Die **Reduktion der Kosten** wird dabei als Optimierungsziel verankert. Zunächst wird die Zielfunktion definiert, in der sich das Optimierungsziel widerspiegelt. Im nächsten Schritt werden die Nebenbedingungen des Modells formuliert. Abschließend wird auf eine Integration des Verfahrens in eine rollierende Planung und auf die Berücksichtigung der Kapazitätsflexibilität eingegangen. Das Optimierungsmodell basiert im Wesentlichen auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Feuerstein 2023.

5.6.3.1 Zielfunktion

Das Ziel der Optimierung ist die Reduktion der anfallenden Kosten über einen beliebigen Planungszeitraum K^{plan} . Dabei liegt die Kostendefinition aus Abschnitt 5.3.2 zu Grunde. Die Zielfunktion ergibt sich schließlich als die Minimierung der Gesamtkosten $C_{ges}^{K^{plan}}$ über alle Perioden $k \in K^{plan}$, bestehend aus der Summe der Betriebskosten C_{btrb}^k , der Rekonfigurationskosten C_{reko}^k und der Verzugskosten C_{vrzg}^k :

$$\min : C_{ges}^{K^{plan}} = \min : \sum_{k \in K^{plan}} C_{btrb}^k + C_{reko}^k + C_{vrzg}^k \quad 5.31$$

5.6.3.2 Herleitung der Nebenbedingungen

Den Kern des MILP bildet analog zum analytisch-heuristischen Verfahren die Bestimmung der Aufgabenallokation, (vgl. Abbildung 5.12), die sich aus der Gesamtheit der durchzuführenden Demontageaufgaben und deren Zuweisung zu den verschiedenen Ressourcentypen ergibt.

$$\sum_{r \in R} X_{v,q}^{a,r,k} * \kappa_{v,q}^{a,r} = b_{v,q}^k * \eta_{v,q}^a \quad \forall k \in K^{plan}, a \in A_v, q \in Q_v, v \in V \quad 5.32$$

Die Verteilung wird für jede Demontageaufgabe mittels der **Allokationsvariablen** $X_{v,q}^{a,r,k} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ bestimmt. Als Basis für die Ableitung des Ressourcenbedarfs bestimmt diese für eine Periode k die mengenmäßige Allokation einer Aufgabe a einer Produktvariante v in Qualitätsklasse q auf Ressourcen vom Typ r . $b_{v,q}^k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ beschreibt den Auftragsbestand in k und ersetzt $b_{v,k}^{Q_v}$. Die Häufigkeitsschätzung $\hat{\eta}_{v,q}^a \in [0,1]$ einer Demontageaufgabe ersetzt $\hat{\eta}_{v,a}^{Q_v}$. Die Zuweisung von Demontageaufgaben a zu Ressourcen ist durch die individuellen Ressourcenfähigkeiten $\kappa_{v,q}^{a,r}$ beschränkt.

Aus Gleichung 5.32 ergeben sich unter Berücksichtigung des Prozessscheiterns die Nebenbedingungen wie folgt:

Nebenbedingung: Berücksichtigung von Backup-Operationen

Nebenbedingung 5.33 stellt sicher, dass ausreichend Backup-Operationen berücksichtigt werden.

$$F_{v,q}^{a,r,k} \geq \sum_{r' \in R} (1 - \hat{p}_{v,q}^{a,r'}) * \xi_{rr'} * X_{v,q}^{a,r',k} \quad 5.33$$

$$\forall k \in K^{plan}, r \in R, a \in A_v, q \in Q_v, v \in V$$

$F_{v,q}^{a,r,k} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ definiert dabei die **Allokationsvariable für Backup-Aufgaben**. Hierbei definiert $r' \in R$ einen zusätzlichen Ressourcenindex für scheiteranfällige Ressourcen. Für den Ressourcentyp r ergibt sich die Menge der durchzuführenden Backup-Aufgaben mittels der Erfolgswahrscheinlichkeit $\hat{p}_{v,q}^{a,r'}$ (analog $\hat{P}_{v,a}^{R \times Q_v}$) und der Anzahl der Erstversuche $X_{v,q}^{a,r',k}$. Weiterhin legt $\xi_{rr'}$ (analog zu $\Xi^{R \times R}$) die Ausweichstrategie fest, d.h. ob Ressourcentyp r an r' gescheiterte Aufgaben übernimmt. Ist Letzteres der Fall gilt $0 < \xi_{rr'} \leq 1$. Wie in Abschnitt 5.1.2 definiert, gilt vereinfachend $p_{erfolg} = 1 \forall r \notin S_{FRS}$. Außerdem gilt:

$$\xi_{rr'} = \begin{cases} 1, & r \in S_{MS}, r' \in S_{FRS} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad 5.34$$

Die Zuweisung von Backup-Aufgaben ist damit stets eindeutig und auf den Sonderfall des FRS-basierten Scheiterns beschränkt. Rekurrenz durch die Wiederholung gescheiterter Aufgaben an selbst scheiteranfälligen Ressourcen kann somit ausgeschlossen werden.

Nebenbedingung: Vollständige Aufgabenzuteilung

Nebenbedingung 5.35 erweitert Gleichung 5.32 und bezieht das Prozessscheitern mit ein.

$$\sum_{r \in R} (X_{v,q}^{a,r,k} - F_{v,q}^{a,r,k}) * \kappa_{v,q}^{a,r} \geq (b_{v,q}^k + b_{v,q}^{k-1,rück} - b_{v,q}^{k,rück}) * \eta_{v,q}^a \quad 5.35$$

$$\forall k \in K^{plan}, a \in A_v, q \in Q_v, v \in V$$

So wird im Zusammenspiel mit Gleichung 5.33 sichergestellt, dass sämtliche Aufgaben aus Erstversuchen und Backup-Versuchen berücksichtigt werden. Des Weiteren erfolgt eine differenzierte Betrachtung des Auftragsbestands. Dies ermöglicht die gezielte Bildung von Auftragsrückständen in der mehrperiodigen Planung. So wird neben den in der Periode gemäß Produktionsprogramm vorgesehenen Aufträgen $b_{v,q}^k$, der geplante Auftragsrückstand aus der Vorperiode $b_{v,q}^{k-1,rück}$ und der planmäßige Auftragsverzug $b_{v,q}^{k,rück}$ in k berücksichtigt, vgl. Nebenbedingung 5.28. Planmäßiger Auftragsverzug kann (und muss ggf. bei erhöhter Reaktionszeit) als eine bewusste Maßnahme in Kauf genommen werden und markiert damit nach $X_{v,q}^{a,r,k}$ die zweite Entscheidungsvariable¹⁴. Die Vorteile ergeben sich durch den zeitlichen Belastungsabgleich insbesondere in der mehrperiodigen Optimierung ($|K^{plan}| > 1$). So können Belastungsspitzen geglättet und Rekonfigurationskosten bei schwingenden Belastungskurven reduziert werden. Weiterhin können ein Systemleerlauf und damit Auslastungsverluste in der An- und Auslaufphase des Systems verhindert werden¹⁵.

Nebenbedingung: Kapazitätsdeckung

Mit Nebenbedingung 5.36 wird schließlich sichergestellt, dass für die Abarbeitung, der in k durch $X_{v,q}^{a,r,k}$ allokierten Aufgaben stets ausreichend Ressourcen $n_r^k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ (analog n_k^R) zur Verfügung stehen.

$$\sum_{v \in V} \sum_{a \in A_v} \sum_{q \in Q_v} X_{v,q}^{a,r,k} * \hat{t}_{v,q}^{a,r} \leq n_r^k * t_k \quad \forall k \in K^{plan}, r \in R \quad 5.36$$

¹⁴ Als Variable der Planung wird sie vom ex post-Wert des tatsächlichen Auftragsverzugs $b_{v,q}^{k,verz}$ unterschieden, entspricht diesem jedoch, falls $k - 1$ bereits in der Vergangenheit liegt bzw. die Planung zum Zeitpunkt T_{Ende}^{k-1} erfolgt.

¹⁵ Die bewusste periodenübergreifende Verschiebung der Auftragslast stellt jedoch nicht nur ein sinnvolles Planungsinstrument dar, sondern kann unter gewissen Umständen (u.a. bei Vernachlässigung der Kapitalbindung) und in einem gewissen Umfang auch kostenneutral erfolgen, z.B. durch die Nutzung vorhandener Puffer- und Lagerkapazität oder die prädiktive Bevorratung aufbereiteter Komponenten auf Abruf zur Vermeidung von Verzugskosten. Um diese Möglichkeit zu berücksichtigen, kann als Grenzwert für einen kostenneutralen Auftragsrückstand, unabhängig von Produktvariante und Qualitätsklasse, b_{frei} notiert werden.

Nebenbedingung: Manipulation des Ressourcengefüges

Optional kann mittels weiterer Nebenbedingungen das Ressourcengefüge manipuliert werden. Exemplarisch erlaubt Nebenbedingung 5.37 die Begrenzung und Kopplung des FRS-Kapazitätsanteils an den Anteil der MS-Ressourcen. Der Koeffizient γ_{FRS}^{limit} erfüllt eine ähnliche Funktion, hängt jedoch nicht mit dem λ -Parameter der Roboterstrategie des analytisch-heuristischen Verfahrens zusammen. So wird nicht die Aufgabenallokation gesteuert, sondern direkt das Ressourcengefüge manipuliert. Für Werte $\gamma_{FRS}^{limit} \geq 1$ überschreitet die FRS-Anzahl z.B. nicht die MS-Anzahl.

$$n_{MS}^k \geq n_{FRS}^k * \gamma_{FRS}^{limit} \quad \forall k \in K^{plan} \quad 5.37$$

Weitere Nebenbedingungen

Die einzelnen Kostenpunkte der Zielfunktion 5.31 ergeben sich aufbauend auf der Kostendefinition in 5.3.2 mit dem Unterschied, dass in der Optimierung die hypothetischen Kosten ex ante geschätzt werden. Bei den Betriebs- und Rekonfigurationskosten entsprechen die tatsächlichen Kosten den geplanten Kosten. Sie können als deterministisch eingeschätzt werden. Die tatsächliche Ausbringung $n^{k,ausb}$ in Periode k ist jedoch unsicher. Die tatsächlichen Verzugskosten können dementsprechend von den geplanten Verzugskosten abweichen.

Die Betriebskosten $C_{btrb}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, die Rekonfigurationskosten $C_{reko}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ mit den Ressourcenaufbaukosten $C_{r,+}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ und den Ressourcenabbaukosten $C_{r,-}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ sowie die (geplanten) Verzugskosten $C_{vrzg}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ ergeben sich wie folgt:

$$C_{btrb}^k = \sum_{r \in R} n_r^k * t_k * c_{r,btrb} \quad 5.38$$

$$C_{reko}^k = \sum_{r \in R} C_{r,+}^k + C_{r,-}^k \quad 5.39$$

$$C_{r,+}^k \geq c_{r,+} * (n_r^k - n_r^{k-1}) \quad 5.40$$

$$C_{r,-}^k \geq c_{r,-} * (n_r^{k-1} - n_r^k) \quad 5.41$$

$$C_{vrzg}^k \geq c_{vrzg} * (-b_{frei} + \sum_{v \in V} \sum_{q \in Q_v} b_{v,q}^{k,vrzg}) \quad 5.42$$

Um unzulässige Lösungen zu vermeiden, gelten für die Modellvariablen weiterhin die folgenden **Nichtnegativitätsbedingungen**:

$$X_{v,q}^{a,r,k}, F_{v,q}^{a,r,k} \geq 0 \quad \forall k \in K^{plan}, r \in R, a \in A_v, v \in V, q \in Q_v \quad 5.43$$

$$b_{v,q}^{k,rück} \geq 0 \quad \forall k \in K^{plan}, v \in V, q \in Q_v \quad 5.44$$

$$n_r^k \geq 0 \quad \forall k \in K^{plan}, r \in R \quad 5.45$$

$$C_{r,+}^k, C_{r,-}^k \geq 0 \quad \forall k \in K^{plan}, r \in R \quad 5.46$$

$$C_{vrzg}^k \geq 0 \quad \forall k \in K^{plan} \quad 5.47$$

5.6.3.3 Modell-Output

Nach Abschluss der Optimierung ist in erster Linie die ermittelte Anzahl der Ressourcen nach Ressourcentyp mit der Entscheidungsvariablen n_r^k von Relevanz. Diese wird unmittelbar zur Ableitung der Systemrekonfiguration genutzt. An zweiter Stelle könnte die Allokationsvariable $X_{v,q}^{a,r,k}$ zur Unterstützung der Maschinenbelegungsplanung herangezogen werden. Unter der idealisierenden Annahme deterministischer Operationsausführungen könnten so optimale Demontagepläne realisiert werden. Unter Realbedingungen erschwert jedoch die hohe Unsicherheit in der Prozessausführung die Realisierung einer effizienten prädiktiven Maschinenbelegungsplanung oder verhindert diese sogar vollständig.

5.6.3.4 Zyklische Planung bei rollierendem Planungshorizont

Die Freigabe des Produktionsprogramms erfolgt jeweils periodisch gekoppelt an den Eingang der Kundenaufträge. Der Planungszeitraum K^{plan} verschiebt sich und wird zum rollierenden Planungshorizont (vgl. Abbildung 5.15), der sich jeweils aus der Menge der zukünftigen Produktionsperioden mit bekannter Auftragslage $b_{v,q}^k$ zusammensetzt. In der vorliegenden Arbeit wird der Planungshorizont als Menge von Produktionsperioden $K^{plan} = \{k, k+1, k+2, \dots\}$ mit der Startperiode k und dem Planungszeitpunkt t_{ende}^{k-1} notiert. Er definiert sich über die rollierende Menge der bereits bekannten Produktionsprogramme zukünftiger Produktionsperioden. Die Länge des Planungshorizonts, d.h. die Anzahl der im Vorfeld bekannten, unveränderlichen Periodenprogramme, wird dann mit $|K^{plan}|$ notiert und ist stets konstant. Im Randfall ist $|K^{plan}| = 1$, d.h. zum Zeitpunkt t_{Ende}^{k-1} ist lediglich der Auftragsbestand der unmittelbar folgenden Periode k bekannt. Es resultiert eine kurzfristige (myopische) Planung (Domschke & Drexl et al. 2015, S. 136).

Das zuvor definierte Modell ermöglicht eine Planung unter Berücksichtigung von Planungshorizonten mit variabler Länge. Für alle $|K^{plan}| > 1$ ergibt sich eine **rollierende Planung**. Dabei werden für sämtliche Perioden in K^{plan} Systemkonfigurationen vorgesehen. Letztlich

wird jedoch nur die für die unmittelbar folgende Periode (hier k) geplante Systemkonfiguration unverändert realisiert. Die Systemkonfigurationen der Folgeperioden $k + 1, k + 2, \dots$ können in den nachfolgenden Planungsintervallen mit der Verschiebung des Planungshorizonts überprüft und aktualisiert werden. Im Gegensatz zur kurzfristigen, einperiodigen Planung, können durch Vorausschau die Wechselwirkungen der Systemkonfigurationen sowie die Rekonfigurationspfade berücksichtigt und hinsichtlich der rekonfigurationsbezogenen Handlungskosten optimiert werden. So können z.B. erhöhte Rekonfigurationskosten bei kurzen Ausschlägen im Kapazitätsbedarf durch gezielten Auftragsverzug vermieden werden.

Die Länge von K^{plan} ist abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Mehrere Wochen sind in der Remanufacturing-Praxis üblich. Die Gründe hierfür sind u.a. die Trägheit der Logistik sowie die den Remanufacturing-Werken eingeräumte Planungsvorlaufzeit. Die Möglichkeit zur Programmplanung unter Kenntnis von Produkttypen und -zuständen wird durch die Entkopplung der Produktsammlung und -sortierung von der eigentlichen Aufarbeitung erreicht. Befundete Gebrauchtsprodukte liegen dabei solange in sogenannten Core-Lagern (vgl. Abbildung 4.2), bis ein entsprechender Auftrag zur Aufarbeitung erfolgt. Die Gebrauchtsprodukte werden dann, abhängig von der Bestellpolitik des Aftermarkets, meist chargenweise für das Remanufacturing freigegeben. Dies geschieht unter Einhaltung einer gewissen Vorlaufzeit, in der keine Änderungen am Auftragsprogramm mehr vorgenommen werden. Diese Vorlaufzeit ist auch unter dem Begriff *Frozen Zone* bekannt.

Auch der Abruf von Ressourcen kann trägheitsbehaftet sein. Dann ist die zu Grunde liegende Reaktionszeit ϵ zu berücksichtigen, welche den frühesten Festlegungszeitraum k^{fix} zeitlich vom Planungszeitpunkt trennt. Die Länge ist abhängig von der Ressourcenflexibilität. Ist eine ad-hoc Rekonfiguration möglich, kann k^{fix} unmittelbar nach der Planung beginnen. Der der Planung zu Grunde liegende erwartete Auftragsbestand entspricht dem tatsächlichen Auftragsbestand, wodurch die bestmögliche Planungsgrundlage gegeben ist.

Abbildung 5.15 zeigt plakativ drei aufeinander folgende Planungszyklen bei einem Planungshorizont von $|K^{plan}| = 5$ Perioden und einer Reaktionszeit von $\epsilon = 2$ Perioden. Im ersten Planungszyklus zum Zeitpunkt t_{Ende}^{k-1} können keine Änderungen für die Perioden k und $k + 1$ mehr vorgenommen werden. Die Perioden $k + 2, k + 3$ und $k + 4$ werden geplant, wobei nur die Systemkonfiguration für Periode $k + 2$ fixiert werden muss. In Planungszyklus 2 und 3 rolliert der Planungszeitraum jeweils um eine Periode in die Zukunft.

In der Modellierung des Kapazitätsplanungsverfahrens wird der ermittelte Ressourcenbedarf $n_{k^{fix}}^r$ der Planungsperioden k^{fix} als konstant fixiert und kann in nachfolgenden Planungszyklen nicht weiter beeinflusst werden. Fixierte Ressourcen $n_{k^{fix}}^r$ fließen dynamisch als zusätzliche Nebenbedingungen in das lineare Optimierungsmodell mit ein.

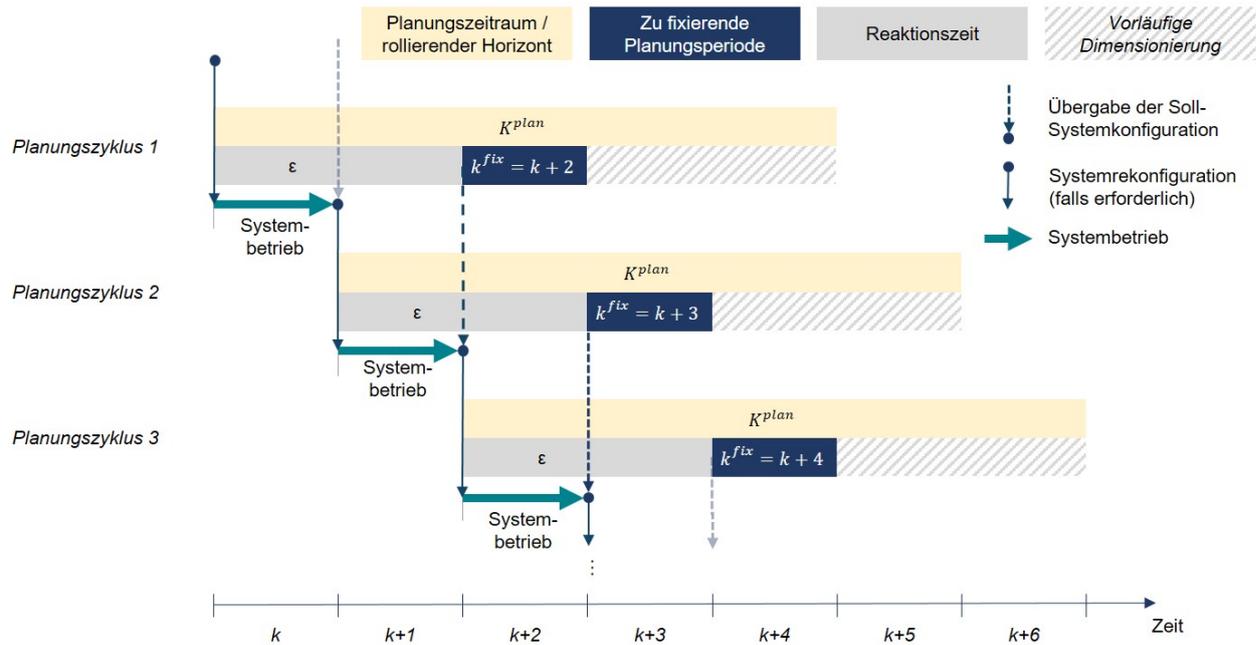


Abbildung 5.15: Zeithorizont der rollierenden Planung - Zusammenhang zwischen Planungszeitpunkt, Festlegungszeitraum und Zeitpunkt der Systemrekonfiguration (in Anlehnung an A_Feuerstein 2023)

5.6.3.5 Planung bei ressourcenspezifischer Kapazitätsflexibilität

In der industriellen Praxis ist eine Systemrekonfiguration meist mit einer erhöhten **Vorlaufzeit** verbunden und in ihrem Umfang begrenzt. Während die Vergrößerung des Maschinenparks mit einer potentiell hohen Vorlaufzeit von mehreren Wochen einhergehen kann, ist die Aufstockung der Produktionsmitarbeiter, z.B. durch den Einsatz von Springern schon kurzfristig auf Tagesebene realisierbar. Die Reaktionszeit ist demnach abhängig vom Ressourcentyp. Um dies zu berücksichtigen, wird das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Modell um **ressourcenspezifische Reaktionszeiten** ϵ_r und Festlegungszeiträume k_r^{fix} erweitert. Im Endeffekt werden in der rollierenden Planung zuerst die Ressourcen mit der höchsten Reaktionszeit fixiert. In den folgenden Planungszyklen können diese Ressourcen mengenmäßig nicht mehr verändert werden. Eine Kapazitätsanpassung ist jedoch über alternative Ressourcentypen möglich, bei denen die Vorlaufzeit noch im Rahmen der Reaktionszeit liegt. Abbildung 5.16 veranschaulicht die Planung bei ressourcenspezifischer Kapazitätsflexibilität. Exemplarisch sind die Ressourcentypen $r1, r2$ und $r3$ mit jeweils variierender Reaktionszeit $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 2$ und $\epsilon_{r3} = 3$ aufgeführt. Die derselben Periode zugehörigen Fixierungszeiträume sowie der eigentliche Systembetrieb dieser Periode sind mit derselben Farbe hervorgehoben, türkis exemplarisch für Periode $k+2$. In Planungszyklus 1 wurde n_{k+2}^{r2} und im Planungszyklus 2 n_{k+2}^{r1} fixiert. n_{k+2}^{r3} kann in den in der Abbildung aufgeführten Planungszyklen nicht beeinflusst werden.

steuerung, d.h. die Auftragsfreigabe, Auftragsallokation sowie die Adaption der Auftragsallokation wird wiederum auf Standardbibliotheken zurückgegriffen.

In Abbildung 5.17 wird die Softwarearchitektur mit den wichtigsten Komponenten des Modells aufgezeigt. Den Kern der Ablaufsimulation bilden die Systemkomponenten, vgl. Abschnitt 5.2.1. Jede Systemkomponente wird in der Simulation als eigenständiger Prozess geführt. Die Prozesse können jedoch miteinander interagieren. Die Entscheidungsfindung obliegt wiederum den Entscheidungskomponenten. Um in der Simulation den Betriebsmodus *Auftragsbearbeitung* zu ermöglichen, sind die Systeme *Auftragsallokation* und *Auftragsfreigabe* erforderlich. Das System *Kapazitätsplanung* ist für die Bestimmung geeigneter Systemkonfigurationen erforderlich. Die eigentliche Systemrekonfiguration wird vom Prozess *Rekonfigurator* gesteuert, der die Betriebsmodi *Systemauslauf* und *Rekonfiguration* (vgl. Abschnitt 5.7) koordiniert. Ausgelöst wird die Rekonfiguration vom Prozess *Observer*, der das System kontinuierlich überwacht und Daten sammelt, die er anderen Prozessen sowie den Entscheidungssystemen zur Verfügung stellt. Das Entscheidungssystem *Steuerungsadaption* kann optional zur Parametrierung der *Auftragsallokation* verwendet werden. Das Rückgrat der beschriebenen Architektur bildet die *Datenhaltung*, welche die Kernsimulation und die Entscheidungssysteme bedarfsgerecht mit Daten versorgt.

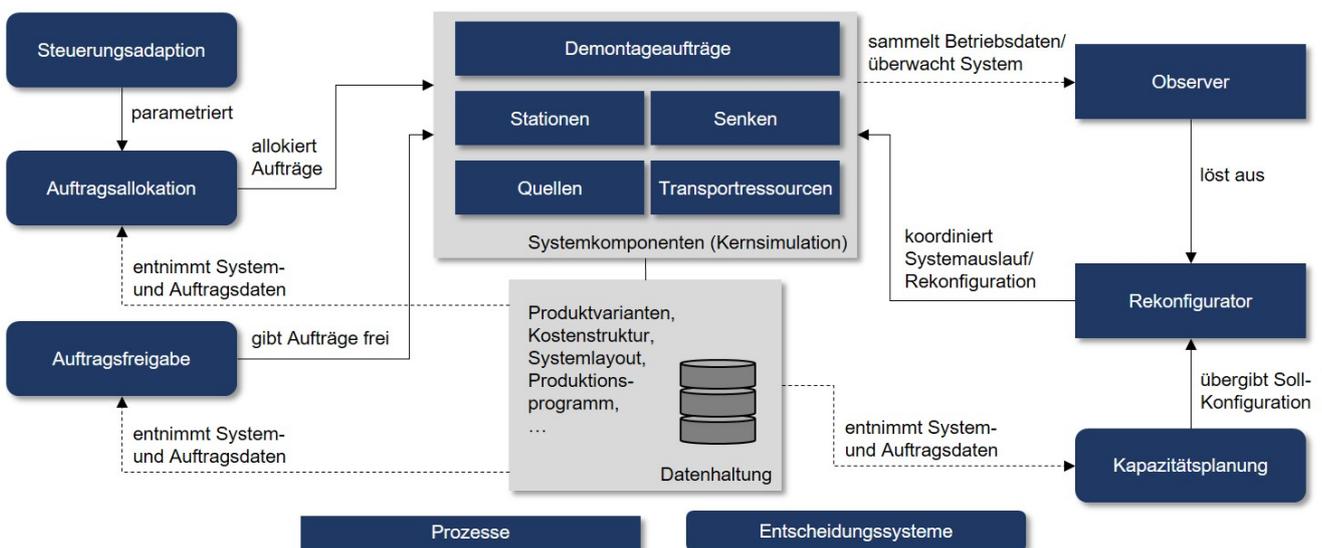


Abbildung 5.17: Vereinfachte schematische Darstellung der Softwarearchitektur

Zunächst weist das Modell der Ablaufsimulation einen generischen Charakter auf und ermöglicht die Instanziierung verschiedener Anwendungsfälle. Diese Aufgabe obliegt dem Anwender, welcher das Modell vor dem Simulationslauf initialisiert. Die Initialisierung erfolgt mittels einer Reihe verschiedener strukturierter Initialisierungsdateien (kurz *inits*), welche im *.json*-Format übergeben werden. Somit ist die Simulationsumgebung neben den Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit für eine generelle Evaluation von Demontagesystemen

einsetzbar. Für eine vollständige Initialisierung muss der Nutzer dazu die Produkttypen mit ihren Produktstrukturen und Qualitätsklassen, die Stationstypen inklusive der Demontageaufgaben, Erfolgswahrscheinlichkeiten und Ausführungsdauern, das Systemlayout mit der Transportmatrix sowie der Systemkonfiguration, das Produktionsprogramm und die Transportressourcen, Quellen und Senken definieren. Für die Konfiguration der Planungs- und Steuerungsverfahren kann wiederum auf Standardeingaben zurückgegriffen werden. Hier ist die Anpassung durch den Nutzer nicht obligatorisch.

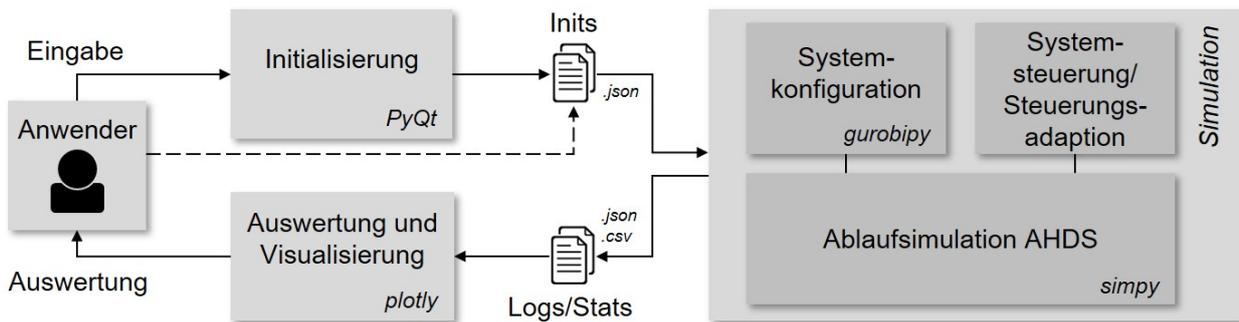


Abbildung 5.18: Schematische Darstellung der Nutzerinteraktion und der wichtigsten verwendeten Programmbibliotheken

Abbildung 5.18 zeigt schematisch eine beispielhafte Interaktion mit dem Anwender sowie die verwendeten Softwarepakete und Bibliotheken. Die Erstellung der Initialisierungsdateien kann vom Nutzer via Direkteingabe erfolgen. Aufgrund der Vielzahl an Eingabemöglichkeiten wurde zusätzlich ein optional nutzbarer prototypischer *Initialisierungs-Wizard* entwickelt, der den Nutzer durch die Initialisierung der Kernsimulation führt. Dieser wurde mithilfe von PyQt implementiert¹⁹. Abbildung 5.19 zeigt ausschnittsweise die graphisch unterstützte Initialisierung der Produktvarianten mithilfe des Wizards. Während der Simulation werden kontinuierlich Daten erfasst. Diese werden in Log-Dateien *logs* geschrieben, zyklisch weiterverarbeitet, als Statistiken (*stats*) verdichtet und als Simulationsergebnis im *.json*- oder *.csv*-Format an den Nutzer zurückgegeben. Zur Unterstützung der Auswertung können verschiedene Informationen nutzergerecht visualisiert werden. Hierzu werden interaktive Graphen mittels der Python-Bibliothek *plotly*²⁰ generiert. Die beschriebene prototypische Architektur bietet das Potential für eine **niederschwellige Nutzung** des Simulationsmodells, auch für fachfremde Nutzer ohne Programmierkenntnisse. Somit ergibt sich ein Werkzeug für Demontageplaner zur **Entscheidungsunterstützung** bei der **Auslegung und Erprobung von Demontagesystemen**.

¹⁹ PyQt ist die Python-Bindung des plattformübergreifenden GUI-Werkzeugkastens QT. Weitere Informationen: <https://wiki.python.org/moin/PyQt>, zuletzt abgerufen am 26.06.2024

²⁰ <https://plotly.com/python/>, zuletzt aufgerufen am 26.06.2024

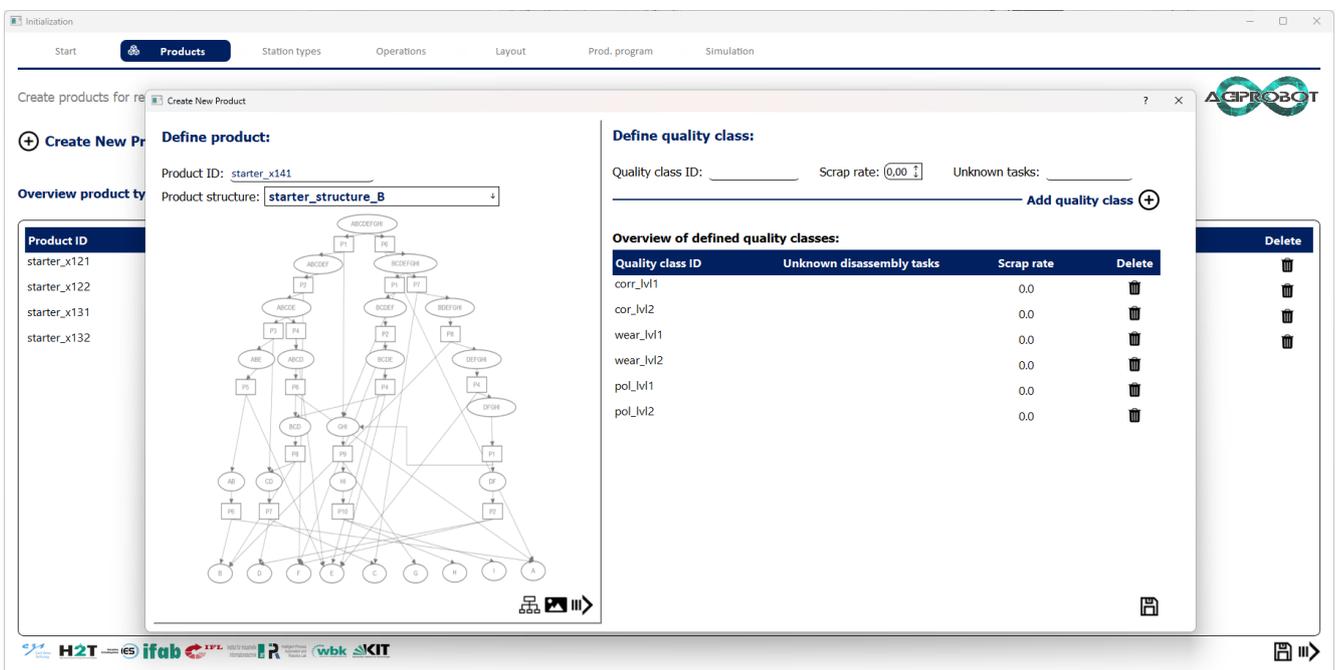


Abbildung 5.19: Exemplarischer Ausschnitt aus dem Initialisierungs-Wizard: Deklaration und Parametrisierung von Produktvarianten inklusive des Demontage-Petri-Netzes und der Qualitätsklassen

6 Simulationsbasierte Untersuchung

In diesem Kapitel folgt die Untersuchung des zuvor in Kapitel 5 modellierten Demontagesystems sowie der Verfahren der Demontageplanung und -steuerung (DPS-Verfahren) für Systembetrieb und Systemadaption. Die DPS-Verfahren bauen jeweils aufeinander auf. Entsprechend erfolgt eine sukzessive, geschachtelte Erprobung unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten gemäß Abbildung 6.1.

Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die Systemkomponenten genauer spezifiziert. Dann wird eine einperiodige Untersuchung der den Systembetrieb bestimmenden Verfahren mit dem Auftragsfreigabeverfahren, inklusive der Ableitung logistischer Kennlinien des Systems (Unterkapitel 6.2), der Prioritätsregeln und dem Multi-Prioritätsregelverfahren (Unterkapitel 6.3) sowie den Metaheuristiken zur Adaption der Regelgewichtung (Unterkapitel 6.4) durchgeführt. Im Anschluss folgt der Übergang zur mehrperiodigen Betrachtung, beginnend mit der Untersuchung der Kapazitätsplanungsverfahren (Unterkapitel 6.5) und einer integrierten Untersuchung der DPS-Verfahren (Unterkapitel 6.6). Die Erprobung der Teilsysteme wird durch ein übergeordnetes Zwischenfazit abgerundet (Unterkapitel 6.7). Ergänzend zur Untersuchung der Teilsysteme werden AHDS und DPS-Verfahren in Unterkapitel 6.8 anhand des Anwendungsfalls der Lichtmaschinendemontage an ein reales Demontagesystem angenähert und mit dem Ziel einer induktiven Ableitung von Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen für den Realbetrieb von AHDS validiert.

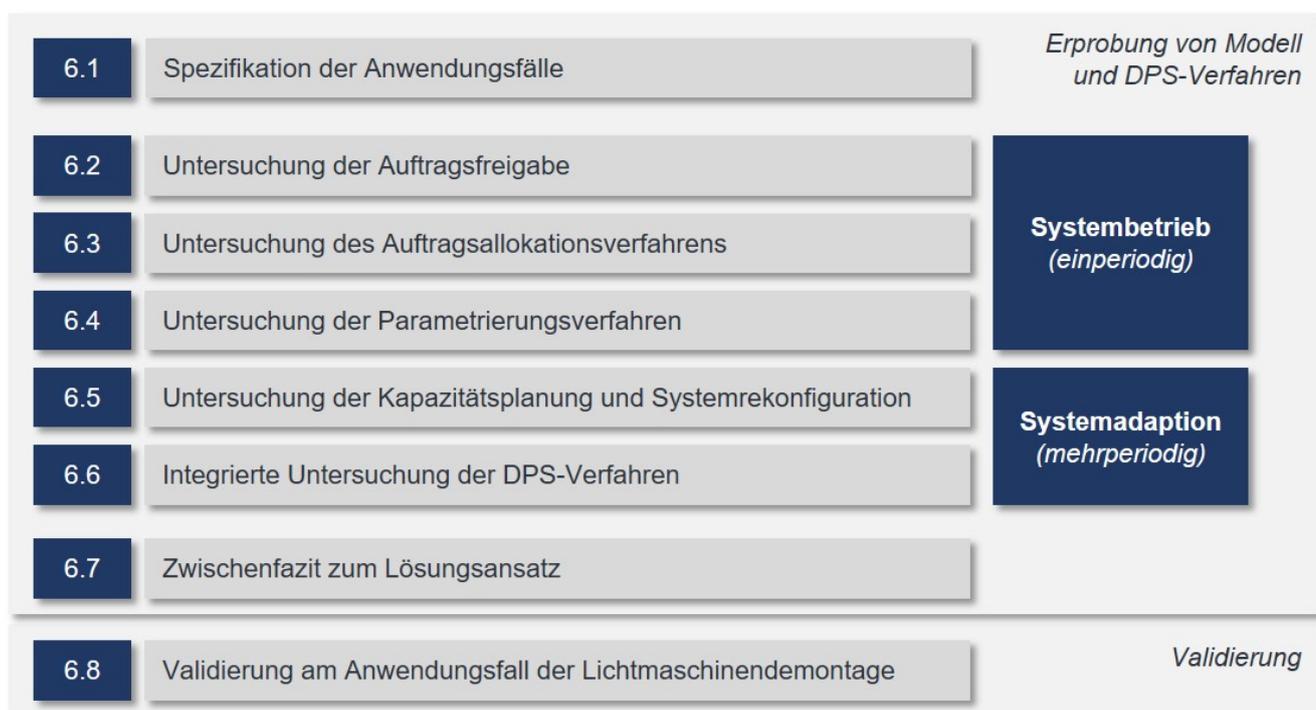


Abbildung 6.1: Vorgehen zur Untersuchung und Validierung des Lösungsansatzes

6.1 Spezifikation der Anwendungsfälle

Um die DPS-Module zu erproben, bedarf es einer Instanziierung des Simulationsmodells. Dabei wird eine Modellierung gewählt, die sich an einer auf industriellen Maßstab skalierten AgiProbot-Demonstratorfabrik (vgl. Unterkapitel 4.1 und Abbildung 4.1 unten) und an der Aufarbeitung von Elektrokleinmotoren orientiert. Bei den in der AgiProbot-Fabrik demontierten Motoren handelt es sich um Hilfsmotoren aus dem Automobilsegment, konkret Komfortaktuatoren mit unterschiedlicher Funktion sowie um Anlassermotoren vgl. Abbildung 6.2.



Abbildung 6.2: Produktbeispiele für die in der AgiProbot-Demonstratorfabrik demontierten Elektromotoren: a) Komfortaktuatoren und b) Anlassermotoren

Um die Aussagekraft der DPS-Erprobung zu erhöhen, werden heterogene Modellinstanzen erzeugt, mit dem Ziel möglichst variable Anforderungen an die DPS zu generieren. Orientiert am Referenzmodell aus Unterkapitel 5.1 werden dazu in diesem Kapitel die Systemkomponenten beschrieben. Zunächst werden verschiedene Produkttypen definiert. In einem zweiten Schritt werden die Attribute der Stationstypen quantifiziert. Danach werden die Demontageoperationen parametrisiert. Weiterhin erfolgt die Spezifikation der Systemlogistik sowie die Definition von einperiodigen Anwendungsfällen zum Abschluss.

6.1.1 Definition der Produkttypen

Im Rahmen der DPS-Erprobung werden **sechs fiktive Produkttypen** definiert, die gezielt in Art und Anzahl der Qualitätsklassen sowie in ihrer Produktstruktur bzw. der Demontageabfolge variieren. Die Produkttypen sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Die Produktbezeichnung ist ein Akronym aus der Strukturbeschreibung. Zur Einfachheit werden abstrakte Qualitätsklassen mit Index als schlichte Benennung gewählt. Die Produktstrukturen bzw. die Demontevorrangsbeziehungen sind in Abbildung 6.3 für jeden Produkttyp als DPN aufgeführt. Die Strukturen unterscheiden sich in der Anzahl der Komponenten, dem Divergenzgrad der Demontage oder in der Existenz von alternativen Demontevorgangsfolgen. Während z.B. LS4K eine strikt lineare Demontage erfordert, bietet HD6K verschiedene Routing-Alternativen bei einem hohen Divergenzgrad.

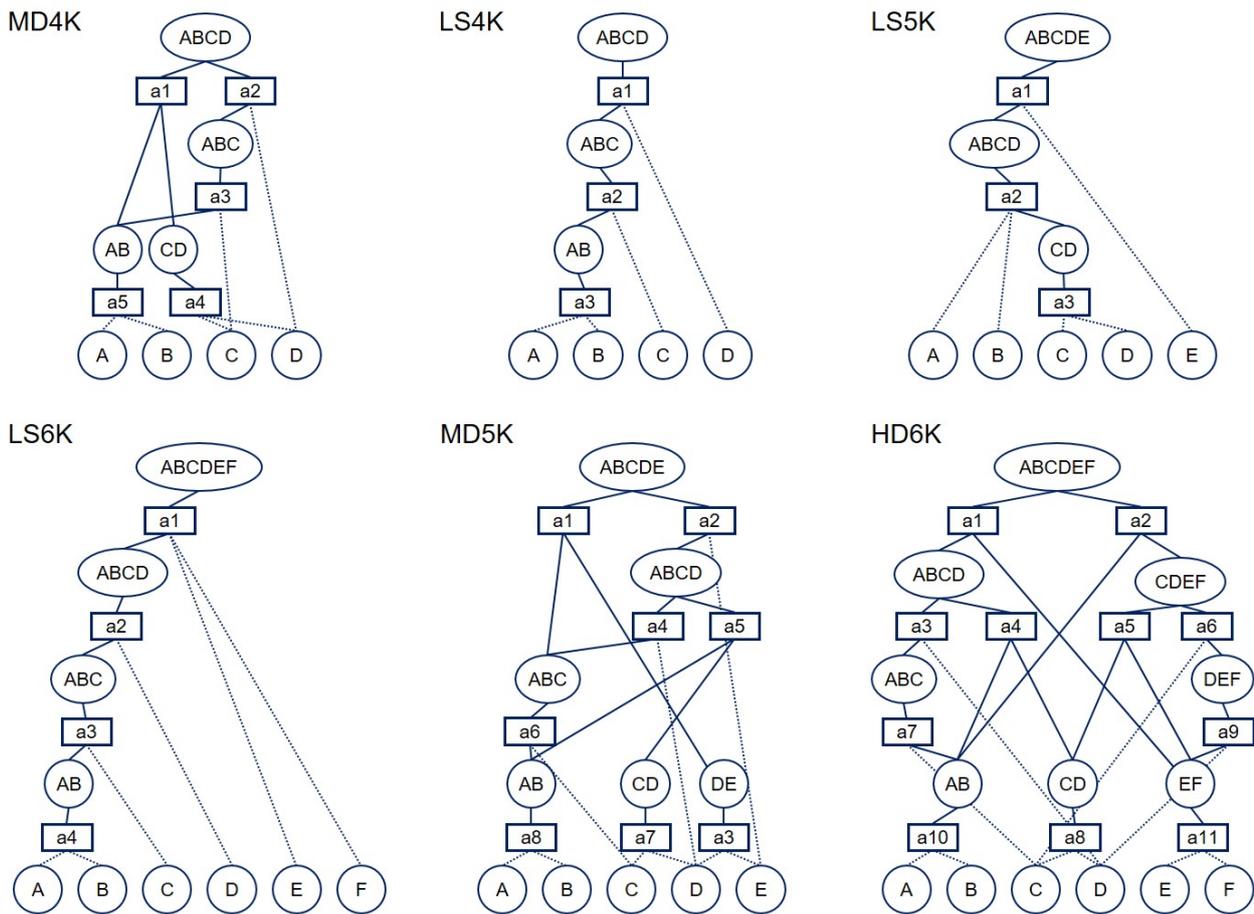


Abbildung 6.3: Demontage-Petri-Netze der Produkttypen (in Anlehnung an A_Bail 2023)

Tabelle 6.1: Übersicht über die Produkttypen (in Anlehnung an A_Bail 2023)

Bezeichnung	Beschreibung	Qualitätsklassen
LS4K	Lineare Struktur - 4 Komponenten	q1.1, q1.2, q1.3
LS5K	Lineare Struktur - 5 Komponenten	q2.1, q2.2, q2.3
LS6K	Lineare Struktur - 6 Komponenten	q3.1, q3.2, q3.3
MD4K	Moderate Divergenz - 4 Komponenten	q4.1, q4.2, q4.3
MD5K	Moderate Divergenz - 5 Komponenten	q5.1, q5.2, q5.3, q5.4, q5.5
HD6K	Hohe Divergenz - 6 Komponenten	q6.1, q6.2, q6.3, q6.4

6.1.2 Spezifikation der Ressourcen- bzw. Stationstypen

Aus Ressourcensicht gelten die in Abschnitt 5.1.2 definierten Annahmen. Die Eigenschaften der Stationstypen sind in Tabelle 6.2 nochmals zusammengefasst. Für die AS werden vier DV-Typen definiert mit den Bezeichnern DV1, DV2, DV3, DV4. Es gilt die Annahme, dass

Tabelle 6.2: Ressourcenübersicht (in Klammern dargestellte Werte werden im mehrperiodigen Fall variiert)

Merkmal		MS	FRS	AS / DVx
Ressourcentypen R		MS	FRS	DV1, DV2, DV3, DV4
Backup-Stationstyp st		n\A	MS	n\A
Stochastizität der Operationsdauer		Beta-verteilt	Beta-verteilt	deterministisch
Eingangspufferkapazität $n_{ep,s}^{max}$	[Stück]	20	20	20
Ressourcenkostensatz $c_{r,btrb}$	[GE/min]	1	0,15 (variabel)	0,1
Ressourcenaufbaukosten $c_{r,+}$	[GE/Station]	50 (300)	100 (1500)	200 (1500)
Ressourcenabbaukosten $c_{r,-}$	[GE/Station]	25 (100)	50 (500)	100 (500)
Erfolgswahrscheinlichkeit p_{erfolg}	[%]	100	≤ 100	100
Reaktionszeit ϵ_r	[Perioden]	0	0	0

je AS nur eine Demontagevorrichtung installiert werden kann. Die Kapazität von Eingangs- und Ausgangspuffer wird für alle Stationen auf 20 festgelegt. Die Kostensätze für Betrieb und Rekonfiguration variieren. Um die Fiktivität der Anwendungsfälle hervorzuheben, werden Kostensätze generisch mit GE (für Geldeinheit) anstatt einer konkreten Währungseinheit angegeben. Lediglich die FRS kann scheitern. Die Backup-Aufgaben werden stets von MS übernommen. Abschließend ist die Annahme einer idealen Kapazitätsflexibilität hervorzuheben, die eine ad-hoc Rekonfiguration aller Stationstypen im mehrperiodigen Fall erlaubt.

6.1.3 Spezifikation der Demontageoperationen

Zur Komplettierung der Instanziierung des Simulationsmodells aus Operationssicht gemäß Unterkapitel 5.1 ist eine vollständige Spezifikation der Demontageoperationen erforderlich. Die Spezifikation jeder Demontageoperation op umfasst, wie bereits in Abschnitt 5.1.4 definiert, die Festsetzung der Fähigkeit κ_{op} , der Ausführungsdauer t_{op} und der Erfolgswahrscheinlichkeit $p_{erfolg,op}$. Um die Unsicherheit der Demontageprozesse abzubilden, wird der Ausführungsdauer in der Simulation eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Grunde gelegt. Eine Ausnahme ist der AS-Typ mit deterministischen Zeiten. Analog zu den Annahmen von Guide & Srivastava et al. (1997) und Hrdina & Zülch (2017) wird die Ausführungsdauer der Demontageoperationen an der MS und der FRS jeweils mit einer **betaverteilten, stetigen Zufallsgröße** $X = BV(\alpha, \beta, t^{min}, t^{max})$ angenähert. Für die Dichtefunktion von X gilt mit der Betafunktion $B(\alpha, \beta)$ dabei:

$$f_X(t) = f_{BV(\alpha, \beta, t^{min}, t^{max})}(t) := \begin{cases} \frac{(t-t^{min})^{\alpha-1} * (t^{max}-t)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta) * (t^{max}-t^{min})^{\alpha+\beta-1}}, & \text{wenn } t^{min} \leq t \leq t^{max} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad 6.1$$

Der Modus t^{modus} der Verteilungsfunktion ergibt sich wiederum aus:

$$t^{modus} := t^{min} + (t^{max} - t^{min}) * \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2} \quad 6.2$$

Dabei stellen α und β Formparameter dar. t^{min} und t^{max} sind **Zeitschranken**¹. Die minimale Ausführungszeit t^{min} entspricht einer natürlichen Schranke bzw. einer idealen, real ggf. nicht erreichbaren Ausführungszeit. Die wahrscheinlichste Ausführungszeit entspricht dem Modus t^{modus} der Verteilungsfunktion. Die obere Schranke t^{max} entspricht der maximalen Dauer vor dem Abbruch einer Operation. Die Verteilungskurve wird mit einem zur Minimalzeit hin versetzten Modus ausgeführt. Im Endeffekt bedeutet dies, dass eine erhöhte Demontagedauer möglich ist, diese aber mit der Höhe des Ausschlags immer unwahrscheinlicher wird. Es wird durchgängig $\alpha = 1,5$ zu Grunde gelegt. β ist wiederum abhängig vom Modus. Meist ergibt sich durch die Beta-Verteilung eine nach rechts gerichtete Schiefe.

Auch die **Zustandsabweichungen** wirken sich auf die Ausführungsdauer aus. Dabei ist jedoch sowohl die Auswirkung einer Qualitätsklasse auf die Ausführungsdauer als auch die Zuteilung einer Produktinstanz zu einer Qualitätsklasse selbst, in hohem Maße unsicherheitsbehaftet. Um sich dennoch realen Bedingungen anzunähern, wird folgend eine auf der Beta-Verteilung basierte Systematik zur Integration von Qualitätsklassensystemen für die Parametrisierung von Demontageoperationen vorgestellt (vgl. A_Sprenger 2024). Dabei werden zwei Typen von Zustandsabweichungen unterschieden:

1. Zustandsabweichungen mit zugehörigen Qualitätsklassen, die **keine trennscharfe Klassifikation** erlauben bzw. mit ungewisser Auswirkung auf die Ausführungsdauer. Ein Beispiel ist Korrosion, die sich tendenziell negativ auf die Ausführungsdauer auswirkt, ggf. aber auch keinen Einfluss nehmen kann. In der Beta-Verteilung wird diese unscharfe Klassifikation durch eine Modus-Verschiebung modelliert. Hierzu wird der Formparameter β durch die Umstellung von Formel 6.2 angepasst. Abbildung 6.4a zeigt dies plakativ anhand zweier Qualitätsklassen $q1$ und $q2$. Im Beispiel wirkt sich $q2$ negativ auf die Ausführungsdauer aus. Durch die Modus-Verschiebung wird eine höhere Demontagedauer wahrscheinlicher.

¹ Ein Vorteil dieser Modellierung ist die Praktikabilität bei fehlenden Plandaten, d.h. unbekannte Ausführungszeiten bzw. einer unbekanntenen Verteilung. So können die optimistische (t^{min}), pessimistische (t^{max}) und wahrscheinlichste (t^{modus}) Ausführungszeit einer Operation relativ einfach geschätzt und direkt als Input für die Beta-Verteilung verwendet werden (Hrdina & Zülch 2017, S. 72).

2. Zustandsabweichungen mit zugehörigen Qualitätsklassen, die eine **eindeutige Klassifikation** erlauben und die sich zweifelsfrei auf die Ausführungsdauer auswirken. Ein Beispiel sind fehlende Bauteile, die i.d.R. die Ausführungsdauer reduzieren. In der Modellierung erfolgt für eindeutige Merkmale eine proportionale Verschiebung von t^{min} , t^{max} und t^{modus} . α und β bleiben konstant. Abbildung 6.4b zeigt diesen Effekt plakativ für die zusätzliche Qualitätsklasse $q3$, die eine proportionale Verschiebung der Verteilungskurve von $q1$ zu niedrigeren Ausführungsdauern markiert.

a) Unscharfe Klassifikation bzw. Auswirkung

b) Eindeutige Klassifikation bzw. Auswirkung

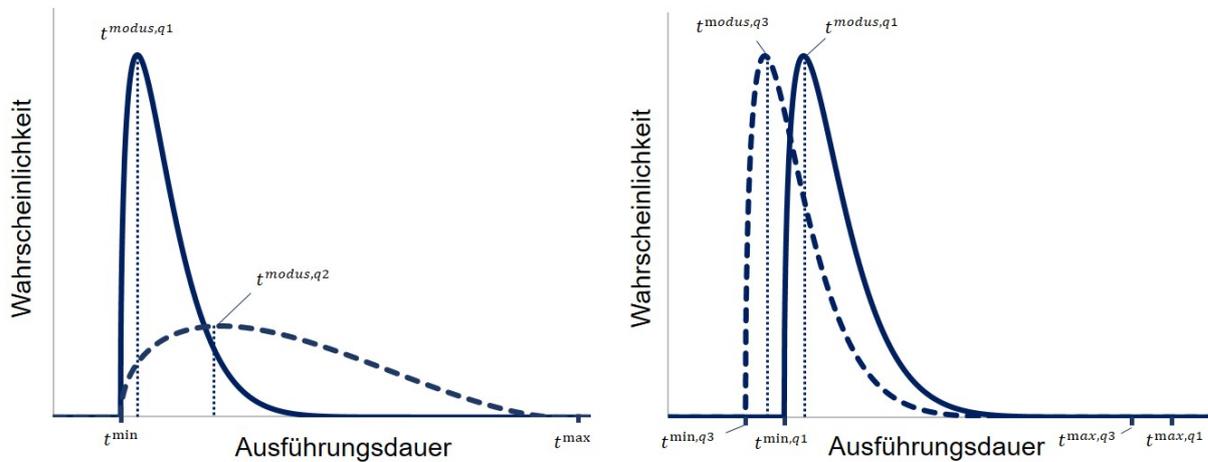


Abbildung 6.4: Plakative Wahrscheinlichkeitsdichte der Ausführungsdauer einer Demontageoperation für drei Qualitätsklassen einer Produktvariante am selben Stationstyp

Vereinfachend gelten die gleichen Beta-Verteilungen für die Ausführungsdauer von erfolgreichen als auch von fehlgeschlagenen Prozessen. Die Erfolgswahrscheinlichkeit selbst ist wiederum Bernoulli-verteilt mit p_{erfolg} als Bernoulli-Parameter und der von p_{erfolg} abhängigen Zufallsvariablen $X \sim \mathcal{B}(p_{erfolg})$ mit $X \in \{0, 1\}$, wobei $X = 1$ erfolgreiche und $X = 0$ gescheiterte Operationen markiert.

Letztlich erfordert eine vollständige Instanziierung für jede zulässige Operation die Festlegung von t^{min} , t^{max} , t^{modus} und p_{erfolg} . Die vollständige Definition der Operationen befindet sich in Anhang A2.

6.1.4 Spezifikation der Systemstruktur- und logistik

Auch die nur indirekt an der Demontage beteiligten Systemkomponenten der Logistik sowie die Systemstruktur müssen spezifiziert werden. Hierfür gelten die folgenden Annahmen:

1. **Einheiten:** Als Zeiteinheit werden Minuten [min] verwendet. Räumliche Abstände werden in Metern [m] angegeben.
2. **Systemlayout:** Das Layout des Produktionssystems wird durchgängig als ein quadratisches Matrix-Layout (12x12) mit 144 Stellplätzen für die Stationen ausgeführt. Der vertikale bzw. horizontale Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Stellplätzen beträgt 5m. Der Abstand zwischen zwei beliebigen Stellplätzen ergibt sich vereinfachend nach der Manhattan-Metrik². Die jeweilige Position der Stationen kann variieren. Der Abstand zwischen zwei Stationen entspricht dem Stellplatzabstand. Abbildung A3.1 zeigt das Systemlayout mit einer exemplarischen Stellplatzbelegung.
3. **Handhabungsaufwand:** Neben dem vom Stationsabstand abhängigen Transportaufwand entsteht jeweils ein Handhabungsaufwand für die Übergabe der Aufträge zwischen Stationen, Quellen und Senken und den Transportressourcen. Dieser beträgt konstant 5s. Etwaiger Handhabungsbedarf, vor und nach Durchführung einer Demontageoperation, ist in der Demontageoperationsdauer inkludiert.
4. **Layoutplanung:** Sowohl die vordefinierten, als auch die automatisch generierten Systemlayouts ergeben sich durch eine quasi willkürliche Verortung der Stationen. Dabei wird das Layout nach aufsteigendem Stellplatzindex mit Stationen befüllt.

Bei Bedarf werden die Demontageaufträge den Transportressourcen als Transportaufträge zugewiesen. Dabei agieren diese als eigenständige Agenten. Wie bereits angemerkt, geht ein Produktionssystem in Matrixstruktur mit einem erhöhten Transportaufwand einher (Ciupek 2006, S. 69). Dies wird durch eine Untersuchung des Transportmanagements unter Annahme eines FTF-gebundenen Materialtransports in Anhang A3 bestätigt. Hierbei wurde ein einfaches Systemlayout sowie eine industrieübliche Verfahrgeschwindigkeit von $v_{tr} = 60m/min$ für die Transportressourcen gewählt. Die Grobanalyse zeigt eine erhebliche Verschlechterung der Systemausbringung und der Auftragsdurchlaufzeit bei mangelnder Transportkapazität, vgl. Abbildung A3.2. Durch Maßnahmen, welche das Transportsystem entlasten, wie die systematische Bündelung von Aufträgen zu Batch-Transporten mit Transportkapazitäten $c_{tr} > 1$, können die Zielgrößen verbessert werden.

Die Layoutplanung und die Optimierung des Transportkonzepts stehen nicht im Fokus dieser Arbeit. Um eine negative Beeinflussung der Untersuchung durch Transportengpässe auszuschließen, wird in den Hauptuntersuchungen dieser Arbeit eine praktisch **unkapazitierte Transportleistung** gewählt mit 50 Transportressourcen und einer Transportgeschwindigkeit v_{tr} von 600 m/min . Dadurch wird der Einfluss des Layouts und der Transportsteuerung

² Nach Manhattan-Metrik ergibt sich der Abstand zwischen zwei Punkten aus der Summe der Abstände der Einzelkoordinaten

minimiert und sichergestellt, dass der Auftragstransport nicht die Systemleistung limitiert. Dennoch geht ein Transportvorgang mit einem geringen zeitlichen Mehraufwand einher, der die Vermeidung von Transportoperationen begünstigt.

6.1.5 Definition einperiodiger Anwendungsfälle

Die Instanziierung eines Anwendungsfalls wird durch eine **Systemkonfiguration** und ein abzuarbeitendes **Produktionsprogramm** bzw. einen Auftragsbestand komplettiert. In dieser Arbeit werden somit sechs Anwendungsfälle definiert. Drei Anwendungsfälle mit einem jeweils auf eine Produktvariante beschränkten Produktionsprogramm und kleiner Systemgröße sowie drei weitere Anwendungsfälle mit durchmischem Produktionsprogramm bei Variation der Systemkonfiguration. Abbildung A4.1 in Anhang A4 spezifiziert die sechs Anwendungsfälle mit Produktionsprogramm und Systemkonfiguration im Detail. Die einperiodigen Anwendungsfälle liegen den Untersuchungen der Unterkapitel 6.2 bis 6.4 zu Grunde.

6.1.6 Definition mehrperiodiger Anwendungsfälle

Die Untersuchung der Kapazitätsplanungsverfahren (Unterkapitel 6.5) und der integrierten DPS (Unterkapitel 6.6) erfolgt in mehrperiodiger Betrachtung. Dazu sind mehrperiodige Anwendungsfälle mit mehrperiodigem Produktionsprogramm erforderlich. Hierbei liegen die zuvor in Unterkapitel 6.1.1 definierten Produkttypen zu Grunde.

Es werden **vier Stückzahl Szenarien** über jeweils 100 Perioden mit einer Länge von je 480 min untersucht, die sich in Schwankungsbreite und -frequenz sowie im Trend unterscheiden, jedoch im Mittel alle einer erhöhten Volatilität unterliegen. Die arbiträren Stückzahlverläufe wurden mittels überlagerter Sinus- und Trendfunktionen zufällig generiert. Abbildung 6.5 visualisiert jeweils den Verlauf der Gesamtstückzahl. Die detaillierten Produktionsprogramme, aufgeschlüsselt nach Produktvarianten- und Produktzuständen, zeigen die Abbildungen A5.1 und A5.2 im Anhang A5. Es gelten die Kostensätze aus Tabelle 6.2. Weiterhin wird von einer vollkommenen Kapazitätsflexibilität ausgegangen, d.h. die Reaktionszeit ist null. Eine Rekonfiguration kann für jeden Stationstyp unmittelbar zum aktuellen Periodenübergang erfolgen. Investitionskosten werden vernachlässigt bzw. als Teil der Betriebs- und Rekonfigurationskosten verrechnet. Für die Rekonfigurationskosten (RKK) wird ein niedriger und ein erhöhter Kostensatz (vgl. eingeklammerte Kostensätze in Tabelle 6.2) untersucht. Aus den **vier Stückzahl Szenarien** und den **zwei RKK-Kostensätzen**, ergeben sich folglich zunächst **acht Anwendungsfälle**. Die Verzugskosten werden einheitlich mit je 10 GE je Auftrag je Periode beaufschlagt.

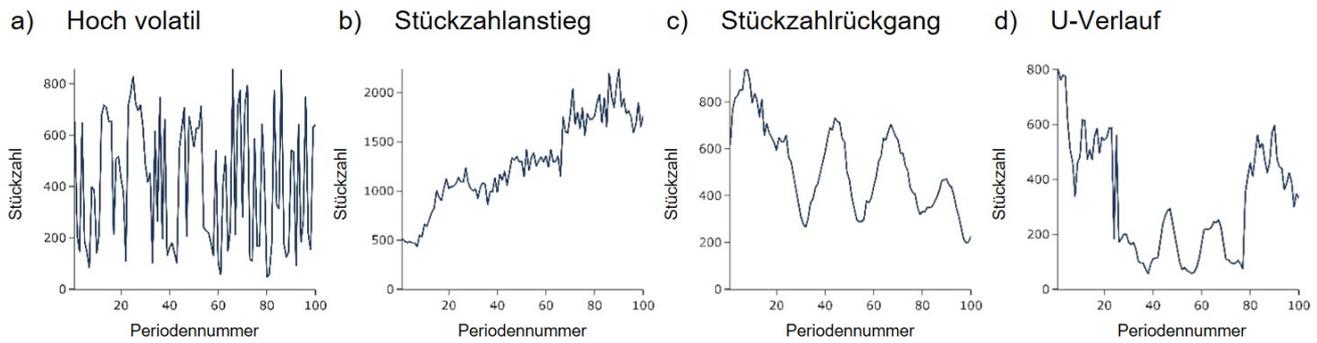


Abbildung 6.5: Gesamtstückzahlverlauf der vier untersuchten Produktionsprogramme a)-d)

6.2 Untersuchung der Auftragsfreigabe

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Auftragsfreigabeverfahren aus Abschnitt 5.4.2. Dazu wird die auftragsorientierte (OIP) mit der komponentenorientierten (CIP) Bestandsregelung verglichen und der Einfluss des Conwip-Koeffizienten k_{cw} analysiert. In einem ersten Schritt erfolgt eine logistische Kennlinienanalyse zur Visualisierung des Zusammenhangs zwischen Leistung, Durchlaufzeit und Umlaufbestand (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 36). Diese wird ergänzt durch eine qualitative Analyse der Auftragsbelegungspläne bei Variation des Umlaufbestandsniveaus. Abschließend erfolgt eine Grobabstimmung des Auftragsfreigabeverfahrens für die nachfolgenden Untersuchungen.

6.2.1 Logistische Kennlinienanalyse

Die Qualität einer Auftragsfreigabelogik äußert sich in der Vermeidung von Über- und Unterlast sowie in einem gleichmäßigen Systembetrieb. Für eine adäquate Konfiguration der Auftragsfreigabe wird dazu folgend für die OIP- und CIP-basierten Conwip-Verfahren eine systematische Variation des, den Umlaufbestand regelnden, Conwip-Koeffizienten k_{cw} durchgeführt. Im Fokus steht dabei die Systemleistung in Form der Systemausbringung $n^{k,ausb}$ des Systems sowie die i.d.R. gegenläufige mittlere Auftragsdurchlaufzeit $\overline{t_{DLZ}}$, vgl. Unterkapitel 5.3. In Vorversuchen wurden der Parameterbereich von k_{cw} untersucht. Mit den Skalierungskonstanten $k_{skal} = 1$ für OIP und $k_{skal} = 2$ für CIP ergeben sich vergleichbare Kennlinien für k_{cw} in einem sinnvollen Parameterbereich. Die Skalierungskonstanten werden entsprechend fixiert.

Die Untersuchung erstreckt sich über **vier Anwendungsfälle**, wobei k_{cw} kleinschrittig variiert wurde. Drei der Anwendungsfälle beschränken sich jeweils auf eines der Produkte MD4K, LS6K und HD6K bei kleiner Systemgröße M3R3A2, vgl. Abbildung A4.1. Im vierten Anwendungsfall (Mix-M12R12A6) wird ein gemischtes Produktionsprogramm und eine mittlere Systemgröße gewählt. Die Periodenlänge beträgt acht Stunden. Die vollständige

Definition der einperiodigen Anwendungsfälle zeigt Abbildung A4.1 in Anhang A4³. Für die Auftragsallokation wird unikriteriell nach NPA-Regel (Niedrigste Pufferauslastung) entschieden. Für ein stochastisch-repräsentatives Abbild wurde jeder Simulationslauf mit variierendem Simulations-Keim 200-fach repliziert.

Abbildung 6.6 stellt die Ergebnisse der Parametervariation über die vier Anwendungsfälle dar. Gemäß dem **Dilemma der Ablaufplanung** (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 4) zeigt sich eine für Produktionssysteme **typische Kennlinie** für beide Zielgrößen über alle Anwendungsfälle. Bei niedrigem k_{cw} kann die potentielle Systemleistung aufgrund des geringen Umlaufbestands nicht vollständig abgerufen werden. Leistungseinbußen führen zu einer verringerten Ausbringung. Das System läuft auf **Unterlast**. Gleichzeitig können durch geringe Umlaufbestände Wartezeiten für die Aufträge vermieden und kurze Durchlaufzeiten realisiert werden. Mit Erhöhung von k_{cw} steigt die Systemleistung und damit die Ausbringung. Gleichzeitig konkurrieren mehr Aufträge um die Stationen im System. Wartezeiten für die Aufträge sind die Folge und die Durchlaufzeit steigt stetig und nahezu linear. Wird der Umlaufbestand weiter erhöht, geht die Ausbringung für alle Anwendungsfälle in einen Sättigungsbereich über und erreicht schließlich einen Hochpunkt, welcher die maximal abrufbare Systemleistung markiert⁴. Schlussendlich erreicht das System bei weiterer Erhöhung des Umlaufbestands den **Überlastbereich**. Die Ausbringung nimmt nach Erreichen des Hochpunkts wieder leicht ab. Die Aufträge im System blockieren sich gegenseitig, aufgrund der unkapazitierten Ausgangspuffer der Stationen erfolgt jedoch keine schwerwiegende Systemblockade.

Es zeigt sich in allen Anwendungsfällen eine ausgeprägte **Dominanz der komponentenorientierten Freigabelogik** gegenüber der OIP-Freigabelogik. Entweder ergibt sich eine bessere Ausbringung bei vergleichbarer Durchlaufzeit (Abbildung 6.6 a),d)), eine niedrigere Durchlaufzeit bei vergleichbarer Ausbringung (Abbildung 6.6 c)) oder eine strenge Dominanz in beiden Kriterien (Abbildung 6.6 b)).

Basierend auf der Zielgewichtung (Systemleistung > Durchlaufzeit) ergibt sich der **optimale Umlaufbestand** bei theoretisch optimaler Kennlinie am Übergangspunkt zur Überlastphase (Lödding 2016, 64ff.). Der Grund ist die strenge Dominanz der Lösungen durch ansteigende Durchlaufzeiten bei weiterer Erhöhung des Umlaufbestands. Die vorliegende, gemessene Kennlinie verzeichnet jedoch einen Leistungsrückgang (Ausnahme OIP für LS6K-M3R3A2) sowie einen Leistungshochpunkt, welcher entsprechend den optimalen Betriebspunkt markiert.

³ Um sicherzustellen, dass ausreichend Aufträge zur Verfügung stehen, wurde die Auftragsanzahl proportional für alle Produkte um den Faktor 10 erhöht. Die Werte entsprechen damit Verhältniszahlen.

⁴ Einzige Ausnahme ist die OIP-Auftragsfreigabe in LS6K-M3R3A2. Die Kennlinie für die Systemausbringung erreicht hier im betrachteten k_{cw} -Bereich (noch) keinen Hochpunkt.

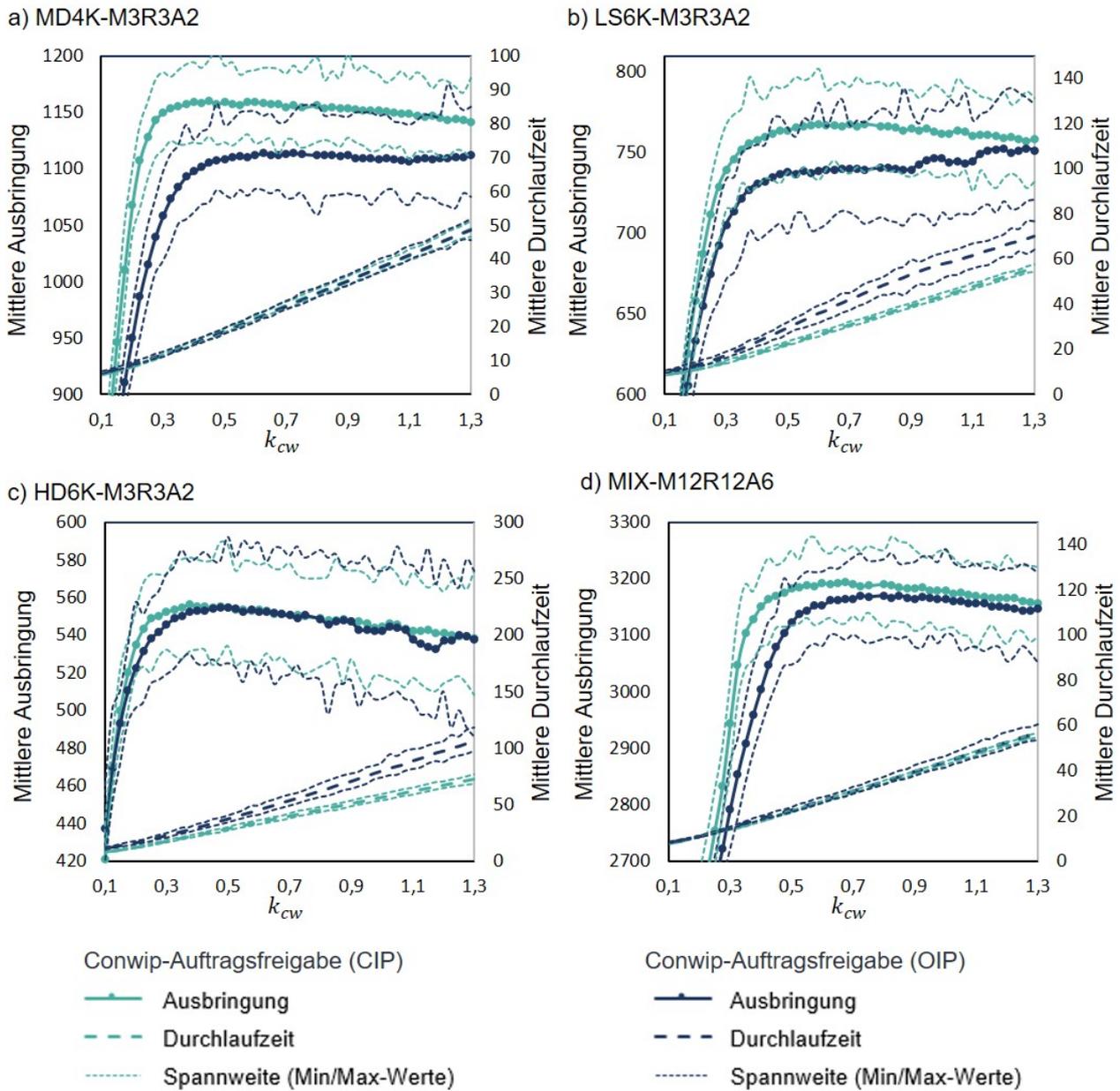


Abbildung 6.6: Mittlere Ausbringung und mittlere Durchlaufzeit bei Variation der Conwip-Grenze durch schrittweise Erhöhung des Conwip-Koeffizienten k_{cw} - Vergleich der auftragsorientierten (OIP) und der komponentenorientierten (CIP) Conwip-Auftragsfreigabe anhand vier verschiedener Anwendungsfälle (a-d)

6.2.2 Qualitative Analyse der Auftragsbelegungspläne

Abbildung 6.7 zeigt einen Vergleich der beiden Freigabeverfahren anhand von **Auftragsbelegungsplänen**. Dazu ist für den HD6K-M3R3A2-Anwendungsfall jeweils ein Simulationslauf im Unterlastbereich ($k_{cw} = 0,1$), im Übergangsbereich ($k_{cw} = 0,5$) und im Überlastbereich ($k_{cw} = 1$) visualisiert. Die Belegungspläne zeigen den gleichen Zeitabschnitt, den Demontagebetrieb zwischen 06:00 Uhr - 08:00 Uhr und decken damit u.a. die Einlaufphase vollständig ab. Die Visualisierung zeigt die Belegungszeiten der Demontageaufträge auf der y-Achse. Jedes Kästchen steht für eine Demontageoperation, wobei alle Operationen dem zu Grunde liegenden Hauptauftrag zugeordnet werden. Die Farbe der Kästchen steht wiederum für die ausführende Station.

Für das konventionelle OIP-Verfahren sticht die stoßartige Auftragsfreigabe hervor, die mit einem abrupten Bestandsaufbau einhergeht und sich mit einer darauf folgenden längeren Abarbeitungsphase (ohne weitere Auftragsfreigabe) abwechselt. Dies ist auf die Vernachlässigung der automatischen Erzeugung und Freigabe der Unteraufträge zurückzuführen, die entkoppelt von der Hauptauftragsfreigabe abläuft und ein schwankendes Bestandsniveau bzw. einen Bullwhip-Effekt erzeugt. Des Weiteren folgt die stoßartige Auftragsfreigabe, wie in a1 zu erkennen, nach der Einlaufphase und dem Einschwingen des Systems einer festen Frequenz. Dies erklärt die Wellenform der OIP-Ausbringungskurve in Abbildung 6.6c in der Überlastphase. Insgesamt zeigt sich für die OIP-Freigabelogik ein unruhigeres Bild als für die CIP-Freigabelogik. Letztere überwindet die Einlaufphase für alle k_{cw} deutlich schneller und geht in einen stabilen Bearbeitungsmodus über. Im Gegensatz zum OIP-Verfahren ist dies, wie Abbildung 6.6 unterstreicht, mit einem produktiveren Systembetrieb in Form einer höheren Ausbringung verbunden. Dies könnte auf Auslastungsverluste durch Materialflussabrisse an einzelnen Stationen im System bei Anwendung der OIP-Freigabe zurückgeführt werden.

6.2.3 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Auftragsfreigabelogik können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Das konventionelle, auftragsorientierte Conwip-Verfahren verursacht durch den divergierenden Materialfluss im AHDS einen **Bullwhip-Effekt**.
2. Das **komponentenorientierte Conwip-Verfahren** erlaubt einen **stabileren Betrieb** mit einer höheren Leistung bzw. kürzeren Auftragsdurchlaufzeiten.
3. Die **Systemleistung erreicht einen Hochpunkt** in der Übergangsphase zwischen Über- und Unterlast. Bei Annahme eines Skalierungsfaktors von $k_{skal} = 2$ ergibt

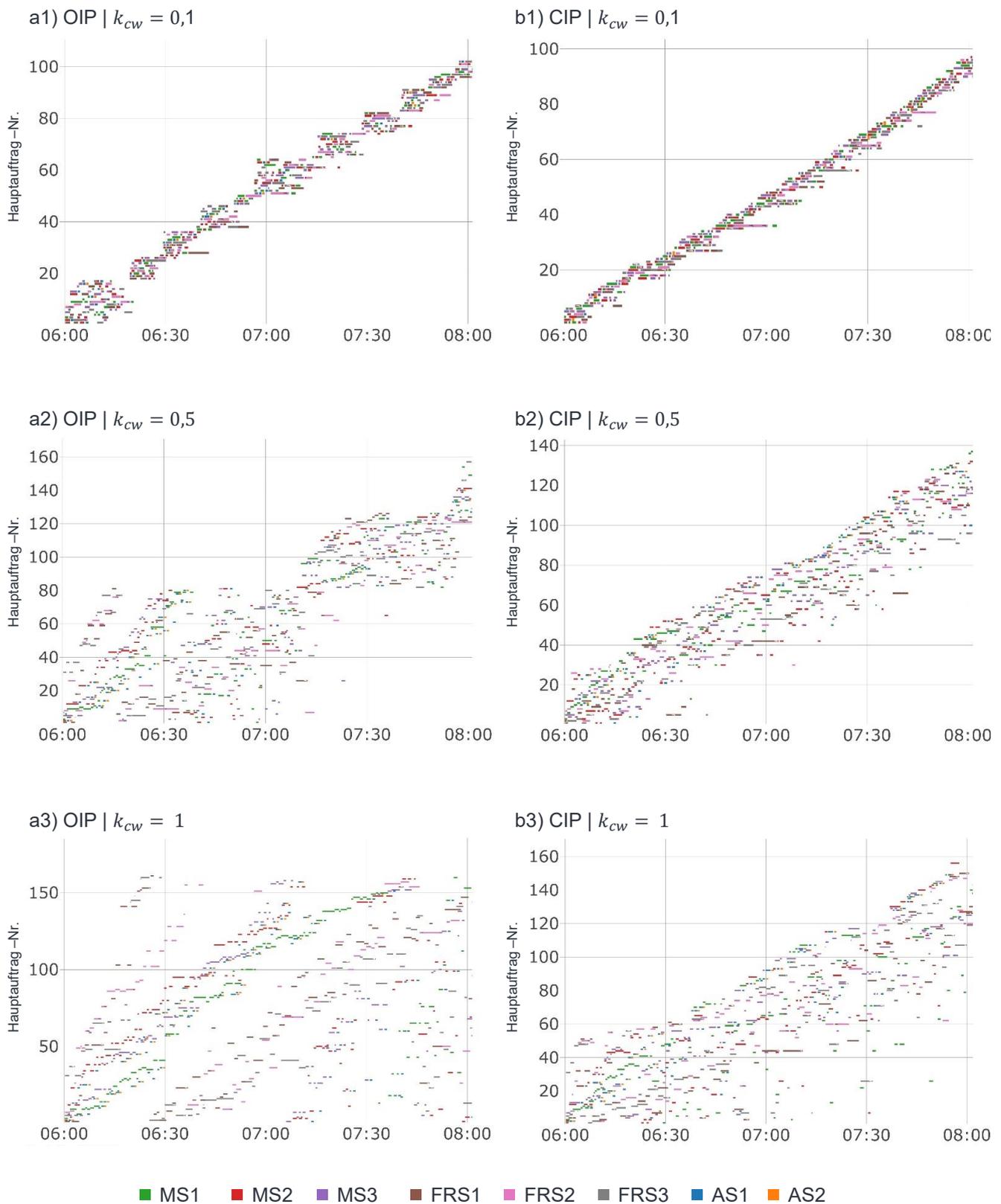


Abbildung 6.7: Vergleich der OIP- und CIP-Auftragsfreigabe bei Unterlast ($k_{cw} = 0,1$), im Übergangsbereich ($k_{cw} = 0,5$) und bei Überlast ($k_{cw} = 1$) - Zweistündige Ausschnitte aus den Demontageauftragsplänen jeweils eines exemplarischen Simulationslaufs in HD6K-M3R3A2.

sich in den untersuchten Anwendungsfällen der Übergangsbereich und der für die Systemausbringung ideale Conwip-Koeffizient mit $k_{cw} \in [0,3,0,7]$.

Im weiteren Verlauf wird die CIP-Freigabelogik als Standard festgelegt. Für einen Systembetrieb im Übergangsbereich wird außerdem vereinfachend durchgehend $k_{cw} = 0,5$ gewählt.

6.3 Untersuchung des Auftragsallokationsverfahrens

Als zweite Komponente der Systemsteuerung wird in diesem Kapitel das in Abschnitt 5.4 präsentierte Auftragsallokationsverfahren untersucht. Zunächst wird hierzu die Effektivität der Einzelregeln bewertet. Anschließend wird der Mehrwert durch Regelkombinationen sowie der zugehörige Anteil der Einzelregeln untersucht. Im zweiten und im dritten Schritt folgt eine detaillierte Untersuchung der dreidimensionalen Lösungsräume des Multi-Prioritätsregelverfahrens (MPV) bei statischem sowie systematisch variiertem Anwendungsfall. Das Vorgehen zur Untersuchung der dreidimensionalen Lösungsräume baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Bail 2023 auf.

6.3.1 Bewertung der Regeleffektivität

Zunächst werden die Regeln *Niedrigste Pufferauslastung* NPA, *Kürzeste Operationszeit* KOZ, *Niedrigster Transportaufwand* NTA, *Höchste Erfolgswahrscheinlichkeit* HEW und *Niedrigste Stationskosten* NSK **qualitativ im unikriteriellen Einsatz** untersucht. Abbildung 6.8 zeigt hierzu ausschnittsweise die Stationsbelegung für den isolierten Einsatz der Regeln (a-e) sowie einer zufallsbasierten Allokation (f). Es liegt der Anwendungsfall MD4K-M3R3A2 zu Grunde. Die dargestellten Ausschnitte fokussieren jeweils die erste Betriebsstunde, welche die Einlaufphase inkludiert. Blaue Kästen symbolisieren erfolgreiche, rote Boxen fehlgeschlagene Operationen.

Wie zu erwarten, generieren einzelne Regeln isoliert nur ungünstige Lösungen. Lediglich die schon zuvor verwendete NPA-Regel erzielt eine gleichmäßige Stationsauslastung. Durch NSK-Allokation wird effektiv der Betrieb an den verhältnismäßig teureren MS vermieden. Im Gegensatz dazu, zeigt sich in allen anderen Fällen eine Präferenz für die manuelle Station (MS). Die NTA- und die Zufalls-Allokation vernachlässigt den Stationstyp. Die in Relation gesehen höhere Auslastung der MS ist auf den umfangreichen Fähigkeitsraum der MS zurückzuführen. Auch die KOZ- und HEW-Regel priorisieren die MS, diese allerdings jeweils aufgrund der höheren Effizienz (KOZ) bzw. Effektivität (HEW). Weiterhin zeigt sich für beide Regeln nach kurzem Einlauf die Wirkung der Datensammlung und Verarbeitung zu Ausführungsdauer und Erfolgswahrscheinlichkeit. So erfolgt zu Beginn mangels Datenbasis noch eine Allokation der FRS. Die HEW-Regel reduziert im weiteren Verlauf erwartungsgemäß

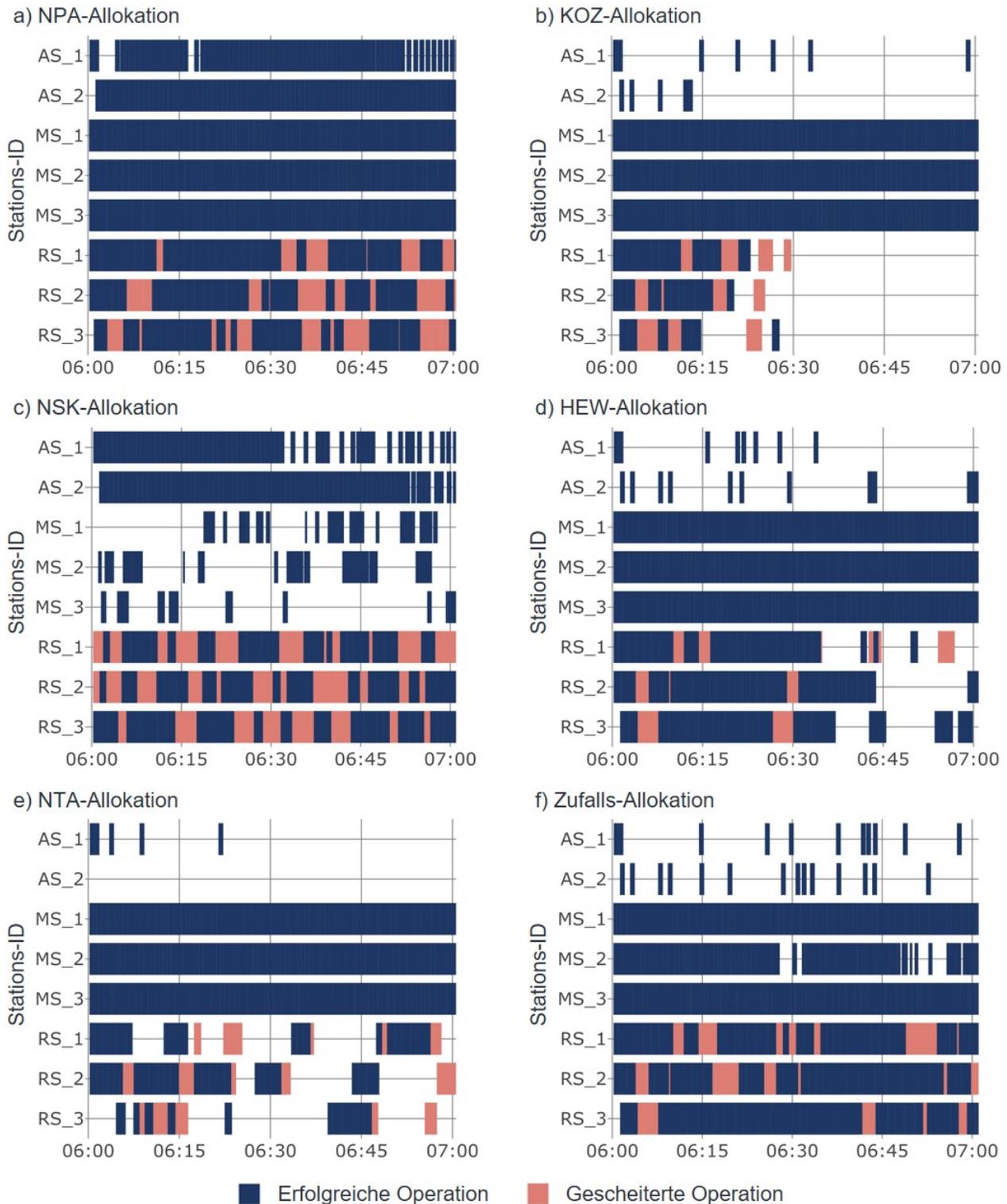


Abbildung 6.8: Stationsbelegungspläne exemplarischer Simulationsläufe bei variiertem unkriteriellem Prioritätsregeleinsatz a) - e) sowie einer zufallsbasierten Auftragsallokation f) anhand von HD6K-M3R3A2 - Einstündige Ausschnitte mit erfolgreichen (blau) und fehlgeschlagenen Operationen (rot).

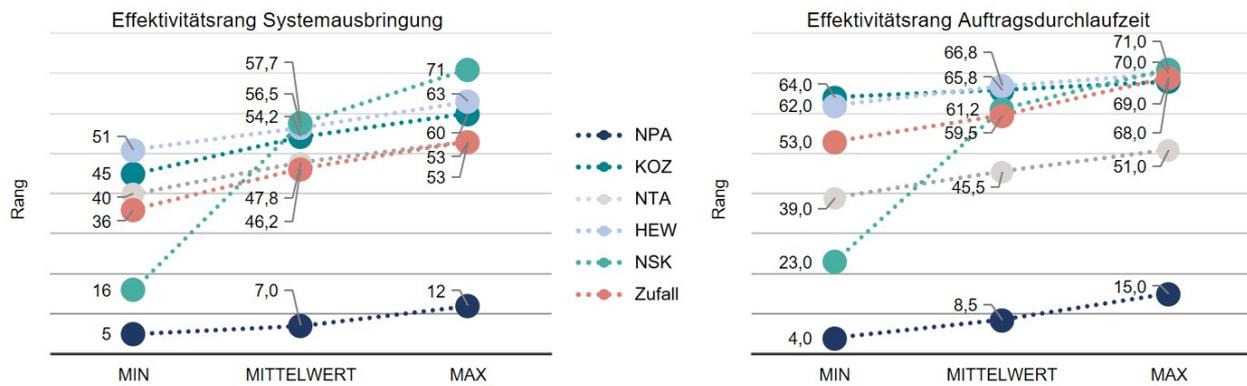


Abbildung 6.9: Rangfolge der Regeleffektivität bei unikriterieller Entscheidung für die Zielgrößen Ausbringung und Durchlaufzeit: Durchschnittsrang und Rangspanne

zuvor gescheiterte FRS-Operationen. Auch mit der KOZ-Regel wird der Anteil der FRS-Operationen minimiert.

Mit Abbildung 6.8 lässt sich die Funktionalität der Regeln qualitativ verifizieren. Offen bleibt die Frage nach der individuellen Effektivität gegenüber den Zielgrößen sowie dem Mehrwert durch Regelkombination (RK). Hierzu wird folgend der **Effekt der uni- und multikriteriellen Allokation** auf die Ausbringung und Durchlaufzeit **quantitativ untersucht**. In diesem Zuge wurden sämtliche Kombinationen der fünf Regeln mit variierender Gewichtungskonfiguration (GK) bei einem Inkrement von 0,25 gebildet und auf allen sechs Anwendungsfällen bei 50 Replikationen simuliert. Untersucht wurden somit 70 GK sowie die Zufallsallokation. Die vollständigen Ergebnisse, d.h. die Entwicklung der mittleren Ausbringung und Durchlaufzeit, befinden sich in den Tabellen A6.1 - A6.4 in Anhang A6. Abbildung 6.9 zeigt den mittleren, den besten und den schlechtesten Rang der Einzelregeln im direkten Vergleich aller GK.

Bei **unikriterieller Entscheidung** zeigt sich ein deutliches, über beide Zielgrößen weitestgehend komplementäres Bild für die Regeleffektivität. NPA zeichnet sich mit einem mittleren Rang von 7 bzw. 8,5 eindeutig als effektivste Regel ab und steht damit im Einklang zur qualitativen Bewertung von Abbildung 6.8a. Es folgen mit großem Abstand NTA bei einem mittleren Rang von 47,8, dann KOZ dicht gefolgt von HEW und NSK für die Ausbringung. Für die Durchlaufzeit folgt zunächst NTA auf mittlerem Rang 45,5 und erst mit mittlerem Rang >60 NSK, KOZ und schließlich HEW. Die relative Rangfolge ist für alle Regeln über alle Anwendungsfälle weitestgehend gleich. Eine Ausnahme stellt NSK dar, mit einer deutlich größeren Spannweite. Eine besondere Eignung zeigt sich für Mix-M5R10A15, was auf die Effektivität der Regel bei Verknappung der MS schließen lässt. Neben dieser sich in der Theorie ausbildenden Rangfolge muss insbesondere die Verortung der **Zufallsallokation** beachtet werden. Diese kann als **Effektivitätsgrenze** verstanden werden, d.h. sämtliche

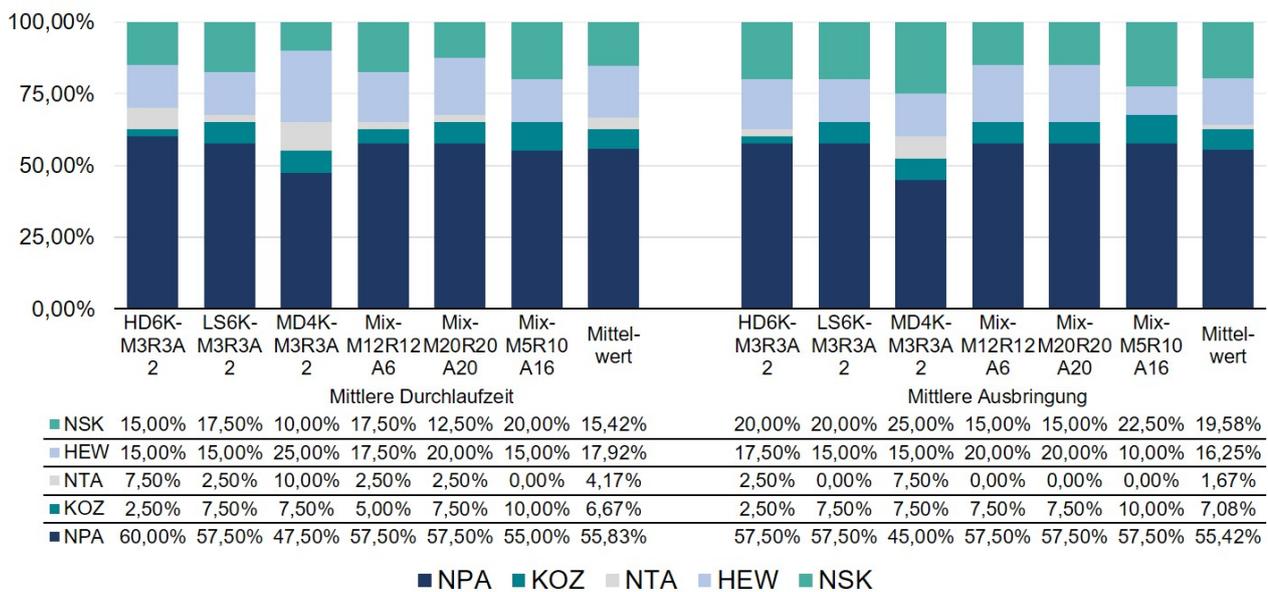


Abbildung 6.10: Relative kumulierte Gewichtungsanteile der Einzelregeln an den nach Rang besten zehn Gewichtungskonfigurationen: Durchlaufzeit (links) und Systemausbringung (rechts).

Entscheidungskriterien mit Rang oberhalb dieser Grenze sind hinsichtlich der Zielgrößen ineffektiv. Auf dieser Grundlage zeichnet sich bei vereinfachter Betrachtung der Rangdurchschnittswerte eine Kontraproduktivität für alle Regeln in unikriterieller Entscheidung ab, mit Ausnahme der NPA-Regel, die eine effektive Vermeidung von Engpässen ermöglicht. Eine weitere Ausnahme stellt die NTA-Regel dar, die trotz der idealisierten Transportkapazität eine effektive Reduktion der Auftragsdurchlaufzeit erlaubt. Dies kann u.a. auch auf die Vermeidung des Handhabungsaufwands zurückgeführt werden, der mit jeder Transportoperation verbunden ist. In Einzelfällen sind auch weitere Regeln nach der obigen Definition effektiv, z.B. NSK für die Systemausbringung in Mix-M5R10A16.

Das Untersuchungsergebnis deutet bereits das sich durch Regelkombination ergebende Potential an. So generiert NPA zwar signifikant bessere Ergebnisse als alle anderen Regeln, bereits bei grobgranularer Regelkombination mit Inkrement 0,25 ist jedoch eine Optimierung des Systembetriebs möglich. Je nach Anwendungsfall zeigt sich für die Ausbringung ein Optimierungspotential von mindestens 1,5-6 % (s. angehängte Tabelle A6.1) sowie für die Durchlaufzeit von mindestens 2,5-8 % (s. angehängte Tabelle A6.3).

Abbildung 6.10 zeigt den kumulierten Gewichtungsanteil jeder Regel an den nach Rangwert besten zehn GK je Anwendungsfall. Im Einklang mit den angehängten Tabellen A6.1 und A6.3 sowie Abbildung 6.11 zeigt sich die **Bedeutung von NPA** mit einem kumulierten Gewichtungsanteil von über 50 % sowie einer Beteiligung an allen Konfigurationen. Die

zweite Hälfte verteilt sich auf die restlichen vier Regeln. Trotz des schlechten Rangs in Einzelwertung, liegt HEW im Mittel über allen Anwendungsfällen in der Kombination an dritter Stelle und ist dabei fast gleich auf mit NSK auf Platz zwei. Bemerkenswert ist der geringe Mehrwert von NTA, welche trotz der Effektivität bei unikriterieller Betrachtung, jeweils den geringsten Anteil ausmacht. Eine in der Einzelbetrachtung effektive Regel liefert folglich nicht zwingend einen Mehrwert in der Regelkombination.

Aufgrund der potentiell ungleichen Verteilung der Prioritätsregelwerte im normalisierten Wertebereich und der ausgleichenden Funktion der Regelgewichtung (vgl. Abschnitt 5.4.3.2) ist die Aussagekraft des relativen Regelgewichtungsanteils über die Effektivität und Relevanz dieser Regel mit Vorsicht zu betrachten. Konkret bedarf es dazu einer genaueren Analyse der Lösungsräume.

6.3.2 Lösungsraumanalyse bei dreifacher Regelkombination

Für eine detailliertere Untersuchung des sich aus den verschiedenen GK zusammengesetzten Lösungsraums wird im Folgenden die Schrittweite auf 0,05 abgesenkt. Um eine aussagekräftige graphische Analyse für eine Zielgröße zu ermöglichen, wird die Anzahl der gleichzeitig kombinierten Regeln zunächst auf drei limitiert. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Untersuchungen, wird NPA als fester Bestandteil der RK und als gegeben angesetzt. Statt $\binom{5}{3} = 60$ ergeben sich so lediglich $\binom{4}{2} = 6$ Kombinationen. Die Visualisierung der Lösungsgüte erfolgt in Form von Dreiecksdiagrammen. Aufgrund des vergleichbaren Verhaltens der zwei Zielgrößen sowie dem primären Fokus auf die Systemleistung, werden Durchlaufzeiten ab hier vernachlässigt. Abbildung 6.11 bewertet die aufgespannten Lösungsräume für MD4K-M3R3A2 mit 50 Replikationen je Datenpunkt. Die individuelle mittlere Ausbringung ist mittels einer über alle sechs RK konstant skalierten Farbachse berücksichtigt.

Für alle sechs RK zeichnet sich eine mehrheitlich **stetige Entwicklung der Lösungsgüte** ab. Die sich ausbildende Fläche ist parabolischer Form, wobei sich neben einem globalen Optimum auch lokale Optima zu ergeben scheinen, z.B. in f). Wie auch der Tabelle A6.1 zu entnehmen, liefert unter allen Regeln NPA die beste unikriterielle Lösung mit im Mittel 1016,14 abgeschlossenen Aufträgen. In allen sechs Fällen ergibt sich jedoch eine Verbesserung durch die Kombination von zwei oder mehr Regeln. Insbesondere die Kombination aus NPA und HEW erweist sich als effektiv. Die beste Dreierkombination ergibt sich mit NTA (b) im Punkt $(w_{NPA} = 0,55; w_{NTA} = 0,15; w_{HEW} = 0,3)$ mit im Mittel 1086,96 fertiggestellten Hauptaufträgen und damit einer gut sieben prozentigen Verbesserung zu NPA unikriteriell. Das zweitbeste Resultat liefert die Kombination mit KOZ (c) mit 1077,96 fertiggestellten Aufträgen im Mittel. An dritter Stelle steht die Kombination mit NSK. Die restlichen Kombinationen (d-f)

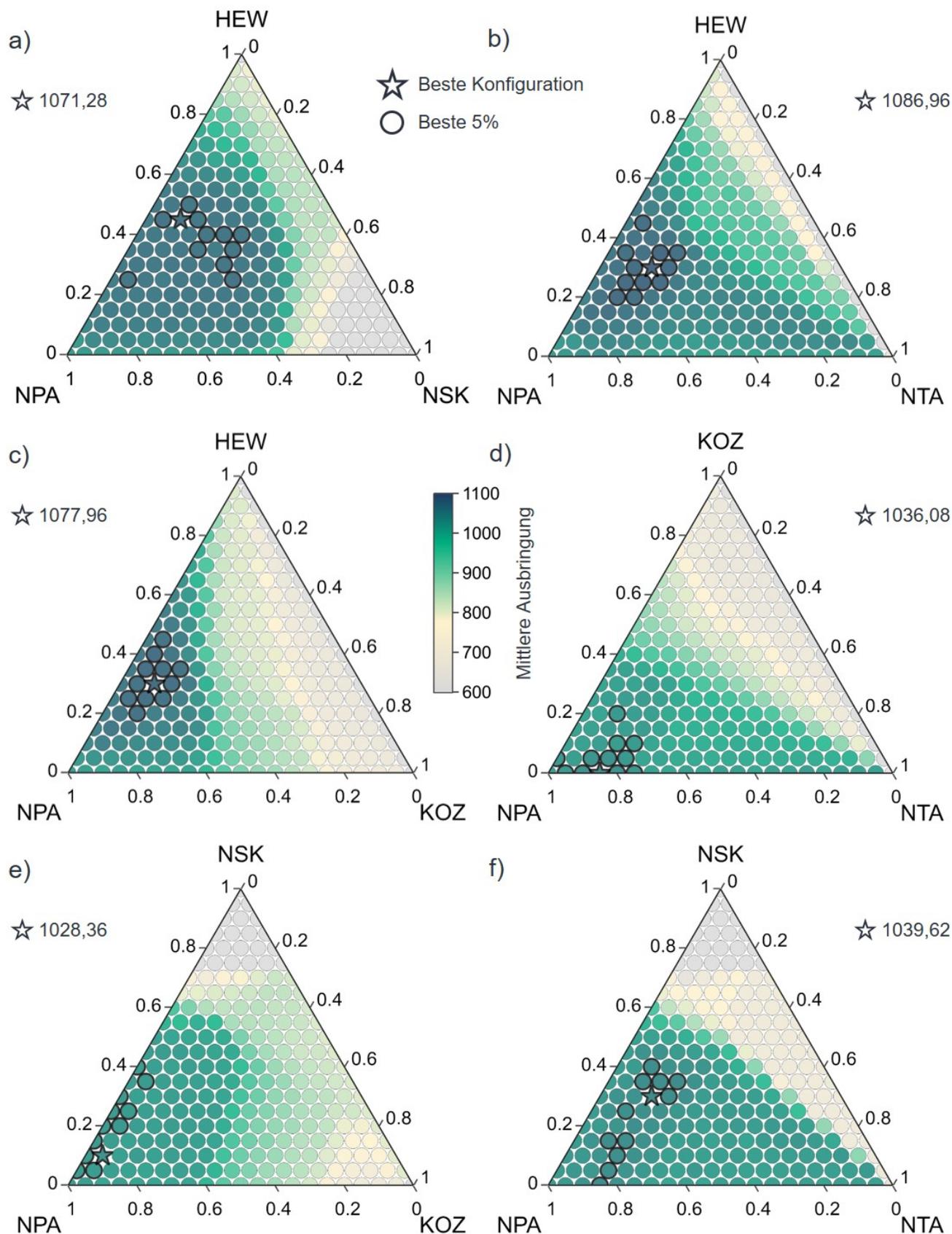


Abbildung 6.11: Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den MD4K-M3R3A2-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsva-
 riation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA

bewegen sich im Anwendungsfall um eine mittlere Ausbringung von 1028 - 1040 Aufträgen. Die Ergebnisse zeigen, dass Nuancen in der Variation der GK eine entscheidende Optimierung der Lösungsgüte herbeiführen können. Außerdem können in unikriterieller Bewertung unbedeutende Prioritätsregeln bei richtig dosiertem, kombinierten Einsatz eine Steigerung der Lösungsgüte ermöglichen. Die feingranulare Betrachtung des Lösungsraums ist folglich sinnvoll.

Analog zum MD4K-M3R3A2-Fall wurde der Verlauf der Lösungsgüte für Mix-M5R10A16 und Mix-M20R20A20 untersucht. Die Ergebnisse befinden sich mit Abbildung A6.1 und A6.2 in Anhang A6. Die Auswertung zeigt eine deutliche Verschiebung der GK mit höchster Lösungsgüte sowie eine Verschiebung der 5 %-Bereiche. So liefert im Mix-M5R10A16-Fall die NPA-HEW-NSK Kombination die höchste Ausbringung, was auf die Verknappung der kostspieligen MS zurückgeführt werden kann. Weiterhin geht diese, zu Lasten der NPA-Gewichtung, mit einer deutlichen Verschiebung der Lösungen zu einer verstärkten NSK-Gewichtung einher (vgl. Abbildung A6.1). Auch im Mix-M20R20A20-Fall zeigt sich eine Verschiebung der Gewichtungskonfiguration. Die höchste mittlere Lösungsgüte liefert hier NPA-HEW-KOZ (vgl. Abbildung A6.2).

6.3.3 Sensitivitätsanalyse bei schrittweiser Anwendungsfallvariation

Wie bereits die Untersuchung im Abschnitt 6.3.2 gezeigt hat, verschiebt sich bei einer Veränderung des Anwendungsfalls die optimale GK. Welchen Einfluss dabei die Systemkonfiguration nehmen kann, soll exemplarisch die folgende Untersuchung zeigen. Basierend auf einer schrittweisen Adaption von Mix-M5R10A16 ergibt sich der variable Anwendungsfall Mix-MxR10A16, wobei die Anzahl der MS schrittweise von zwei Stationen auf neun Stationen erhöht wird. Die Kapazitätsskalierung über die Anzahl der direkten Mitarbeiter stellt analog dazu auch in der Praxis eine gängige Maßnahme und Herausforderung dar.

Abbildung 6.12 zeigt das Ergebnis mit den jeweils einer **vollfaktoriellen Analyse** mit 50 Replikationen entnommenen optimalen GK-Punkten. Untersucht werden die zwei besten RK aus der M5R10A16-Analyse, vgl. Abbildung A6.1: NPA-HEW-KOZ mit der Farbe Grün und NPA-HEW-KOZ mit der Farbe Blau. Um die Analyse zu vereinfachen, wurden die Einzelpunkte nach aufsteigender MS-Anzahl sortiert und miteinander verbunden. Ergänzend hebt Tabelle A6.5 für die fallspezifisch-besten GK die Ausbringungsverluste bei statischer Parametrierung hervor.

In beiden Kurven ist eine Verschiebung der besten GK auszumachen. Die blaue Kurve bewegt sich in einem kleineren Bereich. Der Verlauf der Verbindungslinie folgt keinem klaren Trend und bewegt sich nur grob entlang der HEW-Achse bei relativ gleichbleibender KOZ-Gewichtung hin zu einer stärkeren Gewichtung von HEW. Die KOZ-Gewichtung bewegt

sich in einem Bereich zwischen 0,05 und 0,25. Für die Systemkonfiguration mit 5 - 9 MS konsolidieren die GK in einem engen Bereich. Insgesamt zeichnet sich kein klarer Trend für NPA-HEW-KOZ ab. Die Ausbringungsverluste fallen verhältnismäßig gering aus und belaufen sich auf maximal 8,2 %.

Anders bei der grünen Kurve. Hier zeichnet sich ein Schweif mit signifikanter Übergewichtung von NSK bei niedriger MS-Anzahl ab, welche auf die hohe Effektivität von NSK bei Kapazitätsengpässen in manuellen Stationen durch Übergewichtung von FRS und AS zurückgeführt werden kann. NSK übernimmt dabei die ausgleichende Funktion von NPA. Außerdem zeigt sich ein Trend zu einer Gewichtungsverschiebung von NPA zu HEW mit steigender MS-Anzahl, welcher den Trend zur NSK-Übergewichtung überlagert. Die Ausbringungsverluste sind deutlich ausgesprägter und erreichen fast 40 % (siehe Tabelle A6.5).

Die Analyse zeigt in Teilen eine **deutliche Schere** zwischen den optimalen Gewichtungskonfigurationen auf. Weiterhin ist die optimale GK wechselseitig in der KOZ- und in der NSK-Kombination verortet. Die NSK-GK generiert bei verstärktem MS-Engpass die beste Ausbringung, insbesondere für MxR10A16 mit $x \in \{2, 3, 4\}$. Diese Konfigurationen führen jedoch bei Erhöhung der MS-Anzahl zu den zuvor benannten deutlichen Leistungseinbußen (<40 %) verglichen mit den besten NSK-GK. Die robusteste GK im vorliegenden Anwendungsfall ist eine KOZ-GK mit $w_{NPA} = 0,55$, $w_{HEW} = 0,35$ und $w_{KOZ} = 0,1$ sowie der höchsten Ausbringung bei 6 MS. Der gemittelte mittlere Ausbringungsverlust fällt hier in der Gesamtheit am geringsten aus. Außerdem liegt der individuelle Leistungsverlust bei maximal 3,15 %. An zweiter Stelle steht eine NSK-GK mit $w_{NPA} = 0,4$, $w_{HEW} = 0,4$ und $w_{NSK} = 0,2$ mit nur minimal höherem gemitteltem mittlerem Ausbringungsverlust.

Es zeigt sich, dass eine zuvor identifizierte adäquate GK mit robuster Parametrierung auch bei wechselnder Systemkonfiguration einen leistungsstarken Systembetrieb ermöglichen kann. Ein leistungsoptimierter Systembetrieb erfordert jedoch mit jeder Systemänderung eine Anpassung der GK und RK, insbesondere bei umfangreicher Systemrekonfiguration.

6.3.4 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung des MPV können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die definierten Prioritätsregeln variieren bei unikriteriellem Einsatz stark in Ihrer Effektivität. Die auf Pufferausgleich fokussierte Regel **NPA** liefert unikriteriell die **besten Resultate** und sollte in jede RK mit aufgenommen werden.

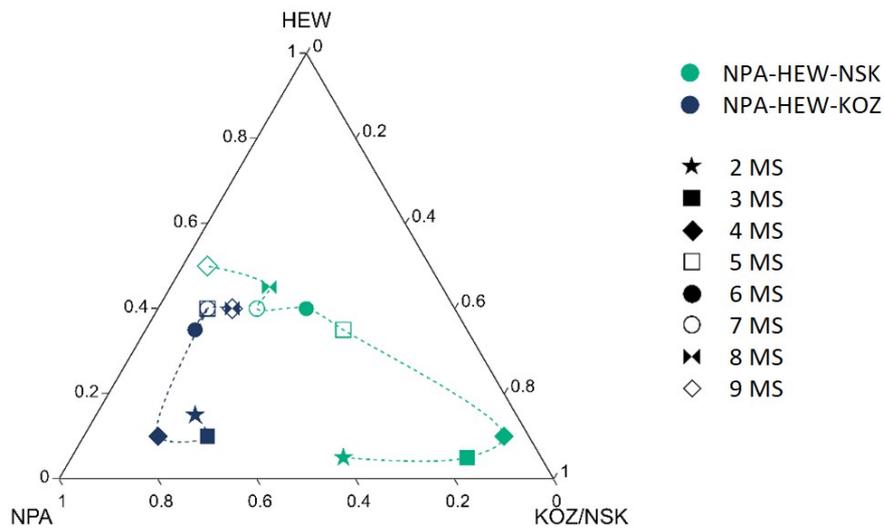


Abbildung 6.12: Verschiebung der besten Gewichtungskonfiguration im Mix-MxR10A16-Fall bei systematischer Erhöhung der manuellen Stationszahl - Vergleich der NPA-HEW-NSK- (grün) und NPA-HEW-KOZ-Regelkombination (blau)

2. Alle **anderen Prioritätsregeln** sind mit wenigen Ausnahmen im unikriteriellen Einsatz **ineffektiv**. Eine **RK mit NPA** ermöglicht jedoch bei geeigneter GK eine weitere Leistungssteigerung.
3. Die Berücksichtigung der Erfolgswahrscheinlichkeit mit **HEW** stellt nach NPA das wichtigste Bewertungskriterium dar. **NSK** eignet sich effektiv für Systemkonfigurationen mit kostenintensiven Stationen als Engpass.
4. Die Kombinationen mehrerer Prioritätsregeln begünstigt die **positive Emergenz** im System. Eine **Zweier-RK** mit NPA ist immer besser als NPA unikriteriell. Weiterhin sind **Dreier-RK** in den meisten Fällen besser als Zweier-RK. Die beste Dreier-RK variiert für unterschiedliche Anwendungsfälle. Für eine Leistungsmaximierung bei wechselnder Systembelastung könnte entsprechend die Betrachtung von mehr als drei Regeln sinnvoll sein.
5. Die **effektivste Regelgewichtung** variiert je nach Anwendungsfall, Systemkonfiguration und fokussierter Zielgröße. Es existieren robuste GK, für eine Leistungsoptimierung sollte bei Systemrekonfiguration aber eine simulationsbasierte Anpassung der GK erfolgen.
6. Die Visualisierung der evaluierten dreidimensionalen GK-Lösungsräume bei Dreier-RK legen mehrheitlich die Klassifikation als **konvexes Optimierungsproblem** nahe.

6.4 Untersuchung der Parametrierungsverfahren

Das folgende Unterkapitel beschäftigt sich mit der adaptiven Anpassung der Auftragsallokation durch die gezielte Verbesserung der GK mittels der in Unterkapitel 5.5 und Anhang A1 eingeführten metaheuristischen Optimierungsverfahren. Das übergeordnete Ziel der GK-Optimierung ist dabei eine schnelle, wirkungsvolle und robuste Parametrierung der Auftragssteuerung für beliebige Systemkonfigurationen. Die Leitfragen dieses Unterkapitels lassen sich dabei wie folgt untergliedern:

- **Effektivität:** Welches Optimierungsverfahren liefert die beste Lösungsgüte bzw. den größten Zielerreichungsgrad? Wie wirkt sich eine weitere Erhöhung der Regelanzahl >3 und der damit verbundene Lösungsraum auf die Erreichung der logistischen Ziele aus?
- **Effizienz:** Welches Verfahren bei welcher Verfahrenskonfiguration konvergiert am schnellsten zu einer hinreichend guten GK?

Es folgt zunächst eine Grobanalyse bzw. eine Auswahl der Hyperparameter anhand MD4K-M3R3A2. Anschließend wird die Untersuchung auf die komplexeren Anwendungsfälle Mix-M5R10A16 und Mix-M20R20A20 erweitert mit Fokus auf Verfahrenseffektivität und -effizienz. Es werden alle Prioritätsregeln für die GK freigegeben, wodurch sich folglich ein fünfdimensionaler Lösungsraum ergibt. Das Vorgehen in diesem Unterkapitel baut im Kern auf den Untersuchungen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Bail 2023 auf.

6.4.1 Auswahl der Hyperparameter

Anders als die GK w oder andere Laufzeitvariablen, werden die Hyperparameter der Optimierungsverfahren zur Laufzeit nicht verändert. Sie werden vielmehr vorab konfiguriert und bestimmen das Verhalten der Algorithmen. Ihre Parametereinstellung kann die Ergebnisqualität maßgeblich beeinflussen. Der Suche nach den optimalen Hyperparametern kommt daher eine hohe Bedeutung zu und wird auch als **Hyperparametertuning** bezeichnet.

Im Rahmen einer **Rasteruntersuchung** wurde für die drei vorgestellten Optimierungsverfahren eine grobe Analyse des Hyperparametereinflusses auf die Lösungsgüte anhand des MD4K-M3R3A2-Anwendungsfalls durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Untersuchungsaufbaus sowie die Ergebnisse befinden sich in Anhang A7. Auch wenn sich im gewählten Untersuchungsrahmen **keine eindeutigen Muster** für besonders geeignete **Hyperparameterkonfigurationen** abzeichnen, belegt die Vorstudie bereits grundsätzlich die Effektivität der Suchheuristiken. Basierend auf der Analyse, werden je Verfahren jeweils für alle RK-Dimensionen die folgenden HPK gewählt. Für Simulated Annealing wird $k_{kühl} = 0,95$

und für die populationsbasierten Verfahren wird $n_{pop} = 20$ genutzt. Weiterhin wird $\tau = 1$ und $n_{limit}^{abc} = 8$ gesetzt.

6.4.2 Konvergenzverhalten bei Variation der Regelanzahl

Für einen direkten Vergleich des Konvergenzverhaltens der Verfahren wird die Untersuchung folgend auf den Mix-M5R10A16 sowie den Mix-M20R20A20-Anwendungsfall ausgedehnt. Die Anzahl der Simulationsläufe wird auf 1000 angesetzt. Weiterhin wird die Anzahl der Prioritätsregeln variiert. Die RK entspricht dabei jeweils den in Abschnitt 6.3.2 identifizierten effektivsten Regeln. Erneut wird, um eine effektive Suche zu gewährleisten, jede Evaluation einer GK zwanzigfach repliziert. Die Optimierungsläufe als Ganzes werden wiederum fünfmal repliziert. Die Abbildungen 6.13a)-f) zeigen den Verlauf der Lösungssuche für die drei Optimierungsverfahren. Konkret ist neben dem Verlauf der mittleren besten Ausbringung für jedes Optimierungsverfahren jeweils flächig im transparenten Farbton die Spanne zwischen Minimal- und Maximalwerten der Optimierungsreplikationen visualisiert. Zur Orientierung sind außerdem jeweils die verfahrensübergreifend beste Ausbringung sowie die zugehörigen 99 %- und 97,5 %-Schwellen aufgetragen.

Auch bei **Skalierung der Systemgröße** und **Produktvarianz** zeigt sich die Dominanz von PSO und ABC gegenüber SA und stützt somit die Ergebnisse der Hyperparametervariation. Lediglich im Fall a) und c) erzielt SA kompetitive Resultate. Demgegenüber steht ein im Mittel stark verspätetes Wachstum in b) und erheblichen Lösungsdefizite in d) mit einer mittleren global-besten Ausbringung von nur ca. 4497,3 Aufträgen nach 1000 Iterationen. Hier ist von einem lokalen Optimum auszugehen, aus dem sich der Algorithmus nicht herausnavigieren kann. In beiden Mix-Fällen mit fünf Regeln kann SA die 99 %-Schwelle innerhalb von 1000 Simulationsläufen nicht erreichen. PSO findet im kleineren System die bessere Lösung, ABC im größeren. Die Lösungsqualität unterscheidet sich wiederum nicht wesentlich, sodass sich keine klare Differenzierung zwischen den Verfahren zeigt. Während PSO jeweils weniger streut und damit eine robustere Suche ermöglicht, wird die global-beste Ausbringung mit ABC erzeugt. Entgegen der Annahme der Voruntersuchung, konvergiert im Mittel auch nach 1000 Simulationsläufen keines der Optimierungsverfahren vollständig, d.h. auch im Bereich 800-1000 Simulationsläufe werden noch immer Verbesserungen, wenn auch in marginalem Umfang erzielt. Dies lässt sich zumindest anteilig auf stochastische Effekte und die Betrachtung des gemittelten Lösunganstiegs zurückführen, wobei die Wahrscheinlichkeit für eine Verbesserung der mittleren besten Lösung proportional mit jedem replizierten Optimierungslauf steigt.

Bereits nach 50-100 Simulationsläufen erreichen alle Verfahren im Mittel, die im Rahmen der vollfaktoriellen Lösungsraumanalyse mit drei Regeln gefundenen Bestwerte (vgl. Ab-

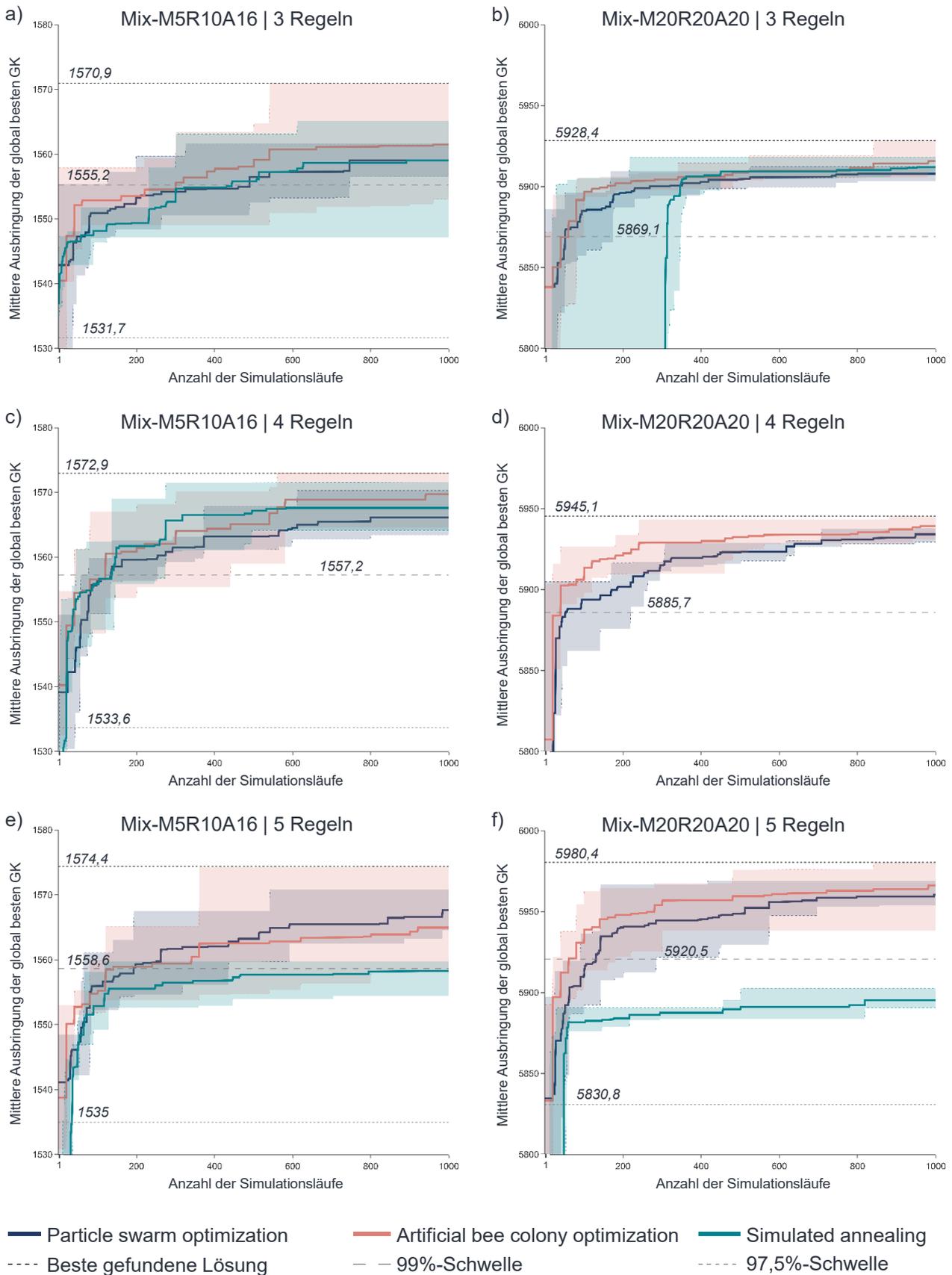


Abbildung 6.13: Lösungsanstieg der Optimierungsverfahren im Vergleich für die Anwendungsfälle Mix-M5R10A16 a)c)e) und Mix-M20R20A20 b)d)f) - Mittelwerte und Lösungsspanne

bildung A6.1 und A6.2). Neben dem Optimierungspotential durch die Feinabstimmung im kontinuierlichen GK-Raum, kann die Verbesserung bei drei Regeln gegenüber den Bestwerten in Abbildung A6.1 und A6.2 auch auf eine stärkere Streuung aufgrund der geringeren Replikationszahl zurückgeführt werden. Wie die Ergebnisse schlussendlich zeigen, sind Ausbringungsgewinne durch Erweiterung der RK auf mehr als drei Regeln möglich. Diese sind zwar relativ klein, verlangsamen für PSO und ABC jedoch auch nicht wesentlich den Suchprozess.

6.4.3 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der metaheuristischen Optimierungsverfahren können für die untersuchten Anwendungsfälle wie folgt zusammengefasst werden:

1. **Alle Optimierungsverfahren** ermöglichen eine **effektive** Suche und Optimierung der GK.
2. Die Verfahren mit **gerichtetem Suchverhalten** (PSO, ABC) liefern im konvexen Lösungsraum bessere Ergebnisse als Simulated Annealing mit einer rein zufallsbasierten Nachbarschaftssuche.
3. Der Einfluss einer Feinabstimmung der **Verfahrenshyperparameter** auf Suchgeschwindigkeit und Effektivität ist **begrenzt**.
4. Eine **Rastersuche** bzw. eine breit-gefächerte Zufallssuche versprechen ein akzeptables Ergebnis (oberhalb der 97,5 %-Schwelle) bei geringem Simulationsaufwand.
5. Die Erhöhung der Regelanzahl (> 3) ermöglicht eine leichte Verbesserung der Ausbringungsmenge, die zusätzlichen Ausbringungsgewinne fallen jedoch deutlich geringer aus als die zuvor erfassten Verbesserungen durch Kombination mit Regelanzahl ≤ 3 .

6.5 Untersuchung der Kapazitätsplanung und Systemrekonfiguration

In diesem Kapitel erfolgt eine Untersuchung der Kapazitätsplanungsverfahren aus Unterkapitel 5.6 sowie des Rekonfigurationsverhaltens des Systems. Dazu wird zunächst das heuristische Kapazitätsplanungsverfahren erprobt. Konkret erfolgt eine Analyse der Ressourcenallokationsstrategie bei Variation des FRS-Allokationsanteils. Anschließend folgt die Identifikation des optimalen λ -Werts bei schrittweiser Erhöhung der FRS-Betriebskosten. Darauf aufbauend wird die MILP-basierte Kapazitätsplanung untersucht und mit dem heuristischen Verfahren bei optimierter Roboterstrategie anhand verschiedener Anwendungsfälle gebenchmarked. Hierbei werden verschiedene MILP-Konfigurationen gewählt um den Einfluss der Vorausschau sowie der gezielten Bildung von Auftragsrückstand abzubilden.

Um die Ausbringungsmenge bei Verknappung der manuellen Kapazität zu optimieren, werden für die Ablaufsteuerung ohne Optimalitätsanspruch die Gewichte $w_{NPA} = 0,6$, $w_{HEW} = 0,2$, $w_{NSK} = 0,2$ gewählt.

6.5.1 Einfluss der Roboterstrategie

Eine Kernfrage der Kapazitätsplanung ist die Aufteilung der erforderlichen Systemkapazität auf die Ressourcentypen. In diesem Abschnitt wird konkret der Einfluss des Verhältnisses von Roboter- zu Gesamtsystemkapazität untersucht. Die Entkopplung von der Kostenbewertung sowie die Parametrierbarkeit und die Nachvollziehbarkeit der inhärenten Allokationsstrategie machen die analytisch-heuristische Kapazitätsdeckungsrechnung dabei zum geeigneten Verfahren. Nachdem die übergeordnete Allokationsstrategie in Abschnitt 5.6.2 bzw. Abbildung 5.14 dargelegt wurde, wird folgend die Roboterstrategie mit dem Verteilfaktor λ genauer untersucht, der eine risikokonforme Anpassung des Roboteranteils in der Gesamtkapazität des Systems erlaubt. Als größter Risikofaktor kann die Verstopfung des Demontagesystems mangels ausreichender MS-Kapazität aufgefasst werden. So ermittelt das heuristische Verfahren valide Systemkonfigurationen unter Idealbedingungen, d.h. die perfekte Synchronisation der Allokationsentscheidungen in Kapazitätsplanung und Ablaufsteuerung. Mit der Kürzung der MS-Kapazität als Universalressource wird der **Spielraum für Diskrepanzen in der Auftrags- und Aufgabenallokation**, d.h. die Allokation einer Demontageaufgabe in der Steuerung entspricht nicht der Allokation in der Planung, reduziert. Es steigt das Risiko für die Ausbildung von Engpässen.

Zunächst wird in allen acht Anwendungsfällen λ sukzessive von 0 (alle möglichen Demontageaufgaben auf FRS) auf 1 (keine FRS-Allokation) mit einem Inkrement von 0,05 erhöht. Abbildung 6.14 zeigt im Ergebnis die mittleren Gesamtkosten aus jeweils zehn Replikationen je Parametereinstellung. Es zeigt sich in allen Fällen eine starke Übergewichtung der Betriebskosten. Mit Reduktion des MS-Allokationsanteils ergibt sich außerdem eine Zunahme der Verzugskosten, die im Randbereich sogar die Betriebskosten übersteigen. Dies kann auf die Ausprägung eines MS-Engpasses zurückgeführt werden, der einen kontinuierlich wachsenden Auftragsrückstand nach sich zieht.

Die Ergebnisse unterstreichen die zuvor dargelegte Risikodefinition. Für hohe λ -Werte überwiegen die Betriebskosten. Wird der λ -Wert reduziert, d.h. der FRS-Anteil erhöht, steigen die Verzugskosten ab einem bestimmten Punkt exponentiell. Dies ist auf einen zunehmenden MS-Engpass sowie einen Einbruch der Systemleistung zurückzuführen. Das Defizit zwischen Ideal- und Realbetrieb wächst, die Steuerung kann Systemkonfigurationen mit kleinem λ -Wert nicht mehr abbilden. Weiterhin ergibt sich für die Betriebskosten in sieben von acht Fällen jeweils ein zentrumnahes Minimum. Der Anstieg rechts vom Minimum ist auf

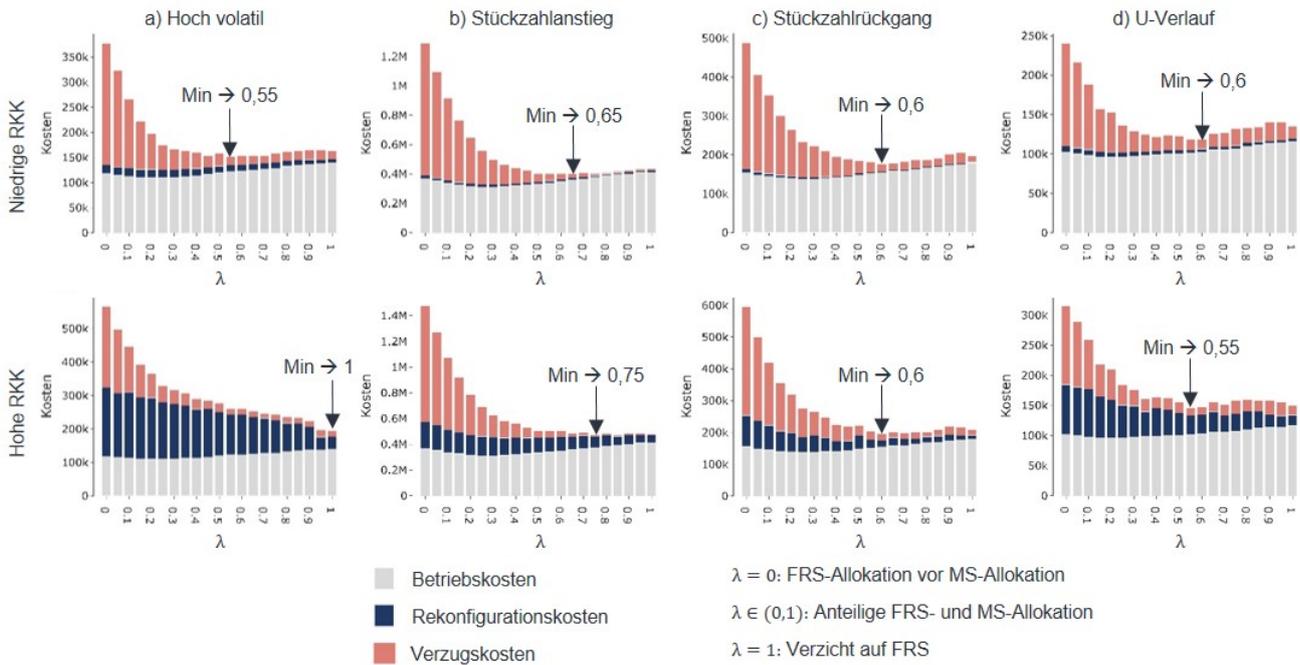


Abbildung 6.14: Kostenverlauf bei Einsatz der heuristischen Kapazitätsplanung und Variation des MS-Allokationsanteil – Mittlere Kosten aus jeweils zehn Replikationen in acht Anwendungsfällen

den höheren MS-Kostensatz zurückzuführen, der Anstieg links, auf einen generell erhöhten Ressourcenbedarf in der Planung durch einen erhöhten stetig wachsenden Auftragsrückstand aufgrund von Auftragsverzug. Bei niedrigen RKK ist der Verteilfaktor mit Kostenminimum λ^{min} zwischen 0,55 und 0,65 verortet. Die Erhöhung der RKK-Kostensätze schlägt sich auch im Kostengefüge nieder. Der Umfang ist dabei jedoch abhängig vom Stückzahlenszenario. So ist der Einfluss bei hoher Volatilität der Gesamtstückzahl auf Makroebene (Fall a) am höchsten. Die RKK machen hier über ein Drittel der Gesamtkosten aus. Auch die im Vergleich zur MS höheren FRS-RKK fallen dabei ins Gewicht, sodass die geringsten Gesamtkosten mit einem generellen FRS-Verzicht verbunden sind. Aus demselben Grund, ergibt sich auch im Fall eines Stückzahlanstiegs eine Verschiebung zu höheren λ -Werten. Im Fall *Stückzahlrückgang* ist keine Auswirkung auf den λ -Wert erkennbar. Im Fall *U-Verlauf* ergibt sich trotz erhöhtem RKK-Anteil sogar ein kleinerer λ^{min} -Wert 0,55, die Kostendifferenz zu $\lambda = 0,6$ beträgt jedoch, sowohl bei niedrigem als auch hohem RKK-Kostensatz, jeweils lediglich 0,1 %.

Wie Gleichung 5.24 näherungsweise beschreibt, hängt die Auswahl der kosteneffizientesten Demontageoperation für eine Demontageaufgabe vom Stationskostensatz, der Erfolgswahrscheinlichkeit und der Ausführungsdauer ab. Weiterführend wird entsprechend die Verschiebung des kostenoptimalen Verteilfaktors λ^{min} bei Variation des FRS-Stationskostensatz untersucht. Hierzu wurde $C_{btrb,FRS}$ bei einer Schrittweite von 0,05 GE/ZE von 0,1 auf 0,6

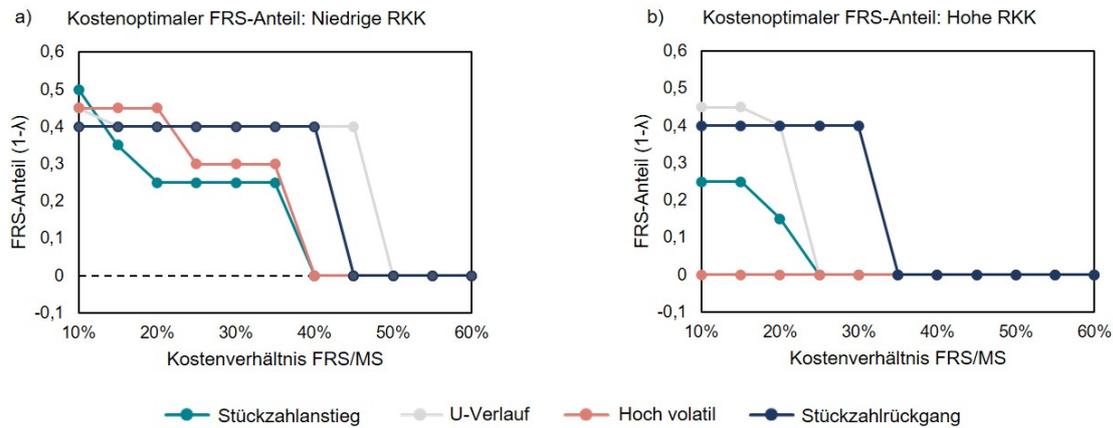


Abbildung 6.15: Verschiebung des optimalen Verteilfaktors λ bei Variation der FRS-Kosten - a) Niedrige Rekonfigurationskosten, b) Hohe Rekonfigurationskosten

GE/ZE erhöht. Abbildung 6.15 stellt den Verlauf des optimalen Verteilfaktors λ^{min} für niedrige und hohe RKK (rechts) einander gegenüber.

Auch bei zehnfach geringeren Betriebskosten der FRS sollte eine gleichmäßige Verteilung der FRS-befähigten Aufgaben auf FRS und MS erfolgen. Nimmt das Kostenverhältnis FRS/MS zu, steigt auch λ^{min} stetig. Die exklusive MS-Allokation ($\lambda^{min} = 1$) wird in allen Fällen unabhängig vom RKK-Kostensatz noch vor der 50 %-Kostenschwelle erreicht. D.h. bei gegebenem Zeitprofil, Scheitereigenschaften und Kostensätzen ist die ökonomische Berechtigung der FRS erst gegeben, wenn diese im Betrieb weniger als halb soviel kostet als die MS. Bei hohen RKK ist die Grenze der Wirtschaftlichkeit in allen Fällen schon früher erreicht, was auf die absolut gesehen, ebenfalls höheren RKK der FRS verglichen mit der MS zurückzuführen ist. Aus gleichem Grund ist der Einsatz von FRS bei hohen RKK im rekonfigurationslastigen Anwendungsfall *hoch volatil* durchgängig ungeeignet.

6.5.2 Vergleich der Planungsverfahren

Nachfolgend wird die Kapazitätsplanung basierend auf der exakten Optimierung untersucht. Dazu werden exemplarisch **drei Konfigurationen des MILP** erprobt: eine Variante ohne Vorausschau, die analog zum heuristischen Verfahren jeweils myopisch nur die Folgeperiode plant (*milp1*), eine Konfiguration mit rollierendem Planungshorizont mit der Länge $|K^{plan}| = 10$ (*milp10*) sowie analog eine weitere vorausplanende Variante *milp10R* ($|K^{plan}| = 10$) mit der Möglichkeit zur Belastungverschiebung durch Bildung von ex ante vorgesehenem Auftragsrückstand ($b_{v,q}^{k,rück} \geq 0$). Auf eine explizite Manipulation des Ressourcengefüges mittels Nebenbedingung 5.37 wird zunächst in allen Verfahren verzichtet. Basierend auf den Erkenntnissen der vorherigen Untersuchung (Abbildung 6.15) wird jeweils die Instanz

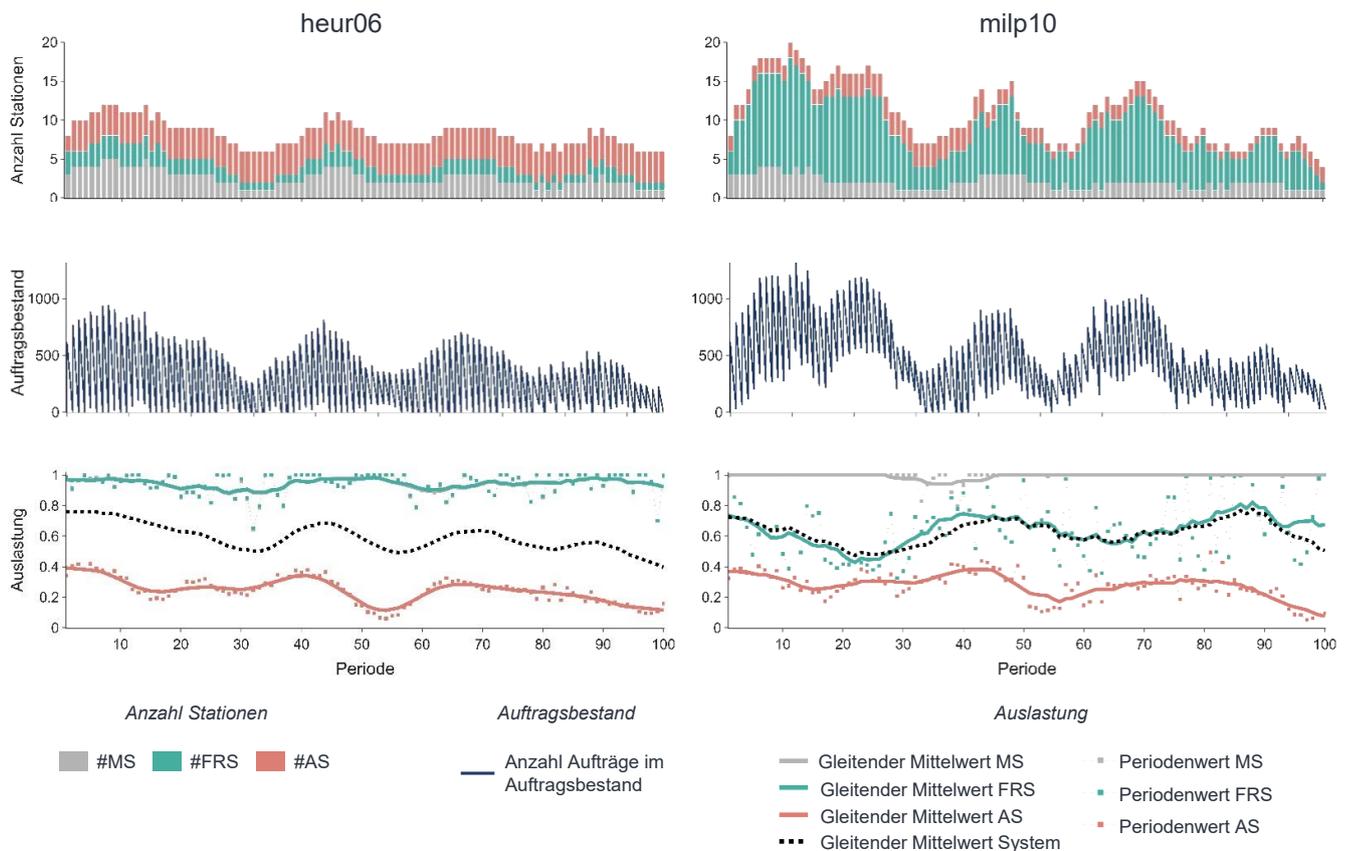


Abbildung 6.16: Mehrperiodige Systemanalyse bei heuristischer Planung mit $\lambda = 0,6$ (links) und exakter Planung bei 10 Perioden Vorausschau (rechts) für den Anwendungsfall Stückzahlrückgang mit $c_{FRS,btrb} = 0,15$ und niedrigem RKK - Verlauf des Rekonfigurationspfads (Stationsanzahl), des Auftragsbestands und der Stationsauslastung

des heuristischen Verfahrens ($heur\lambda^{min}$) mit dem besten Verteilfaktor λ als Benchmark herangezogen.

Die Untersuchung der Verfahrenskonfigurationen erfolgt erneut anhand der vier Stückzahlscenarien. Weiterhin wird der Kostensatz für FRS in vier Schritten mit $c_{btrb,FRS} \in \{0,15, 0,3, 0,45, 0,6\} [GE/min]$ variiert. Außerdem wird die Auswirkung mit den zwei Stufen für die RKK-Kostensätze erprobt. Somit ergeben sich 32 Anwendungsfälle.

In einem ersten Schritt folgt eine **qualitative Analyse anhand zweier ausgewählter Anwendungsfälle**. Exemplarisch zeigt Abbildung 6.16 den Verlauf der Systemkonfiguration, des Auftragsbestands sowie der Systemauslastung für *heur06* und *milp10* im Vergleich für den Fall *Stückzahlrückgang* bei $c_{btrb,FRS} = 0,15$ und niedrigem RKK-Kostensatz. Der FRS-Anteil für *milp10* ist deutlich höher, die FRS-Auslastung liegt jedoch lediglich zwischen 40 und 80 %. Die MS sind in fast allen Perioden vollständig ausgelastet. Gleichzeitig liegt in vielen Perioden ein

erhöhter Auftragsverzug vor, ein eindeutiges Anzeichen für einen MS-Engpass. Der Auftragsrückstand für *heur06* ist vergleichsweise gering. Die FRS hat durchgängig den geringsten Anteil in der Systemkonfiguration. Weiterhin ist die Auslastung der MS und FRS durchweg auf einem hohen Niveau (>90 %). Die Gesamtauslastung des Systems wird jedoch von den AS reduziert, die stets einen großen Anteil in der Systemkonfiguration einnehmen, aber wie Abbildung 6.16 nicht voll ausgelastet werden können. Aufgrund der hohen Produktivität und der verhältnismäßig geringen Kosten, ist der Einsatz der AS dennoch sinnvoll.

In einem weiteren Beispiel zeigt Abbildung 6.17 analog zu Abbildung 6.16 eine Analyse des Systembetriebs für den Fall *U-Kurve* und $C_{btrb,FRS} = 0,45$ bei hohem RKK-Kostensatz, wobei *heur1* der *milp10R*-Konfiguration gegenübergestellt wird. *heur1* verzichtet vollständig auf FRS. Gleichzeitig werden kontinuierlich vier AS eingesetzt, auch bei starkem Stückzahlrückgang. Hier zeigt sich eine potentielle Schwäche der gewählten Allokationsstrategie, welche bei entsprechender Befähigung stets AS-Stationen allokiert, ungeachtet einer präzisionsniedrigen Stationsauslastung. Dieses Verhalten führt zu einer sehr niedrigen Systemauslastung in der Stückzahltalesohle, die erst bei erneutem Stückzahlanstieg wieder zunimmt. Die kostenbasierte Planungslogik der MILP-Konfiguration schneidet hier insbesondere bei niedrigen Stückzahlen deutlich besser ab. So wird die Systemkonfiguration in der Talesohle auf lediglich eine MS reduziert. Gleichzeitig liegt im Vergleich zum vorherigen Fall ein niedrigerer FRS-Anteil in der Systemkonfiguration vor. Die Gesamtauslastung des Systems bleibt somit durchweg auf einem hohen Niveau. In beiden Fällen entsteht kein Systemengpass. Die Steuerung kann die Systemkapazität, wie in der Planung vorgesehen, weitestgehend abrufen.

Für eine ganzheitliche **quantitative Analyse** zeigen die gestapelten Balkendiagramme in Abbildung 6.18 die aufgeschlüsselten mittleren Kosten aus zehn replizierten Simulationsläufen für alle 16 Anwendungsfälle bei niedrigem RKK-Kostensatz. Auch hier dient das heuristische Verfahren mit der jeweils aus Abbildung 6.15 bekannten optimalen Parametrierung λ^{min} als Vergleich für die MILP-Verfahren.

Wie bereits aus Abbildung 6.16 hervorgeht, kommt es im Fall c1 vermehrt zu einem Auftragsverzug. Dies spiegelt sich in erhöhten Verzugskosten in der Kostenstruktur wider. Dabei sind alle MILP-Verfahren in Reihe 1 und im geringeren Umfang auch in Reihe 2 betroffen. Dies kann auf die niedrigeren FRS-Kosten zurückgeführt werden, die eine verstärkte FRS-Allokation herbeiführen. Analog zu heuristischen Verfahren mit niedrigem λ -Verteilfaktor (vgl. Abschnitt 6.5.1) entstehen so Systemkonfigurationen mit einer im Realbetrieb nicht voll abrufbaren Systemleistung.

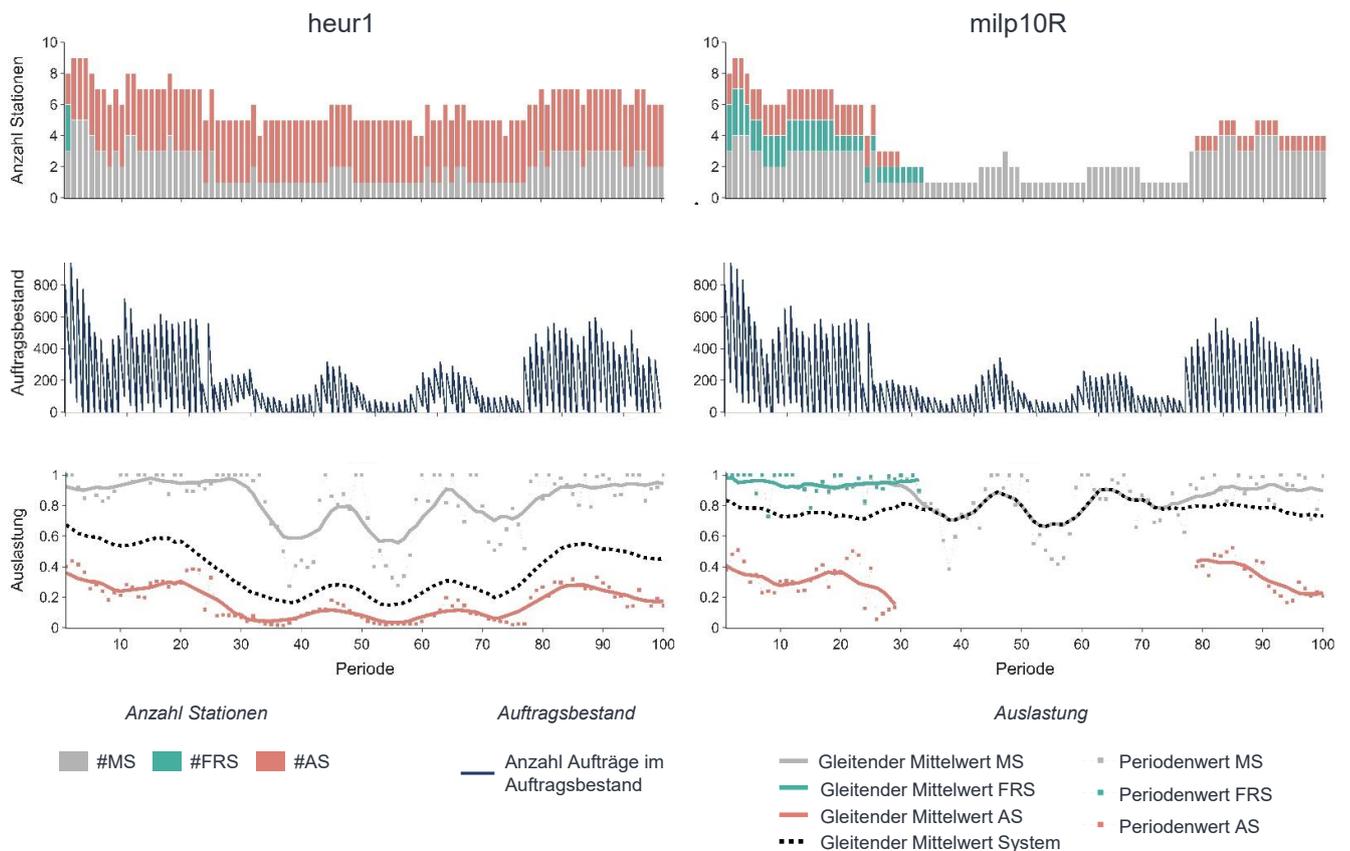


Abbildung 6.17: Mehrperiodige Systemanalyse bei heuristischer Planung mit $\lambda = 1$ (links) und exakter Planung bei 10 Perioden Vorausschau und Auftragsrückstands-bildung (rechts) für den Anwendungsfall U-Verlauf mit $c_{FRS,btrb} = 0,45$ bei erhöhten RKK - Verlauf der Stationsanzahl, des Auftragsbestands und der Stationsauslastung

Die Erhöhung des FRS-Kostensatzes führt automatisch zu einer Reduktion des FRS-Anteils bzw. einem kostengetriebenen Anstieg des MS-Sekundärbedarfs. Trotz der gestiegenen FRS-Kosten können die Gesamtkosten durch Reduktion der Verzugskosten sogar reduziert werden. Im Falle großer Planabweichung mit erhöhten Verzugskosten ermöglicht auch die exakte Planung mit Vorausschau (*milp10*) keine Kostenreduktion. Die Möglichkeit zum Aufbau eines Backlogs (*milp10R*) ist sogar kontraproduktiv und führt in fast allen Fällen in Reihe 1 und 2 zu noch höheren Verzugskosten.

In zehn von 16 Fällen, liefert das heuristische Verfahren mit fallspezifisch-optimierter Parametrierung die geringsten Gesamtkosten. In mindestens vier der Fälle (a1, b1, c1, d1) kann dabei von einer ineffektiven MILP-Planung ausgegangen werden. Mit realisierbarem Idealbetrieb (Reihe 3 und 4) steigt auch die Planungsgüte der MILP-Verfahren. Die MILP-Resultate sind mit den Benchmark-Ergebnissen vergleichbar und übertreffen diese in sechs von acht Fällen

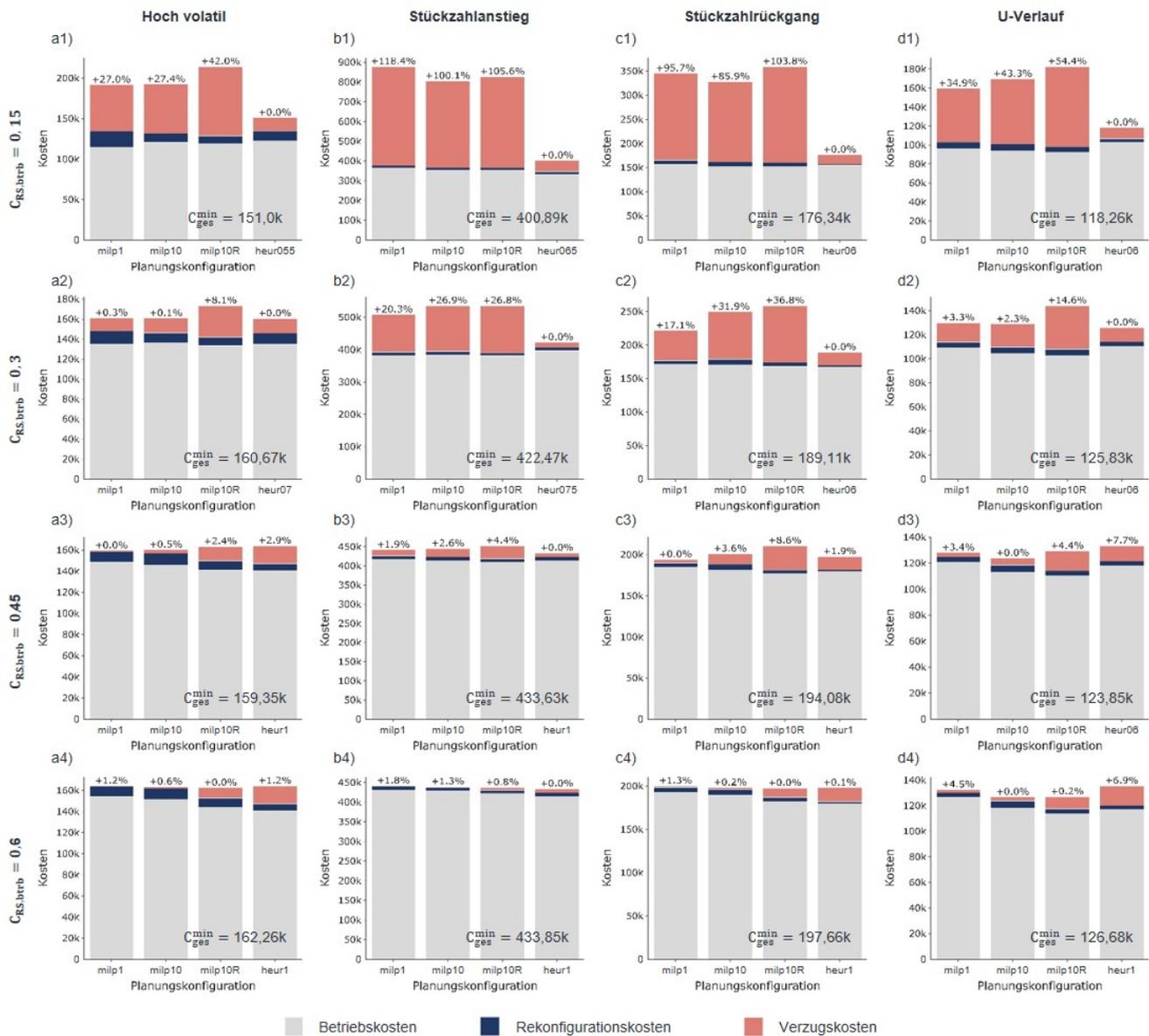


Abbildung 6.18: Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der milp1, milp10 und milp10R Konfiguration sowie des heuristischen Benchmarks (mit λ^{min}) für niedrige RKK, verschiedene Stückzahlenszenarien und bei Variation des FRS-Betriebskostensatz

sogar (a3, c3, d3, a4, c4, d4). Die Vorausschau bringt bei der vorliegenden Kostenstruktur jedoch keine relevanten Verbesserungen.

Nebenbedingung 5.37 ermöglicht die Kopplung der FRS- an die MS-Kapazität in der Planung. Damit ist eine Begrenzung des FRS-Anteils möglich. Abbildung 6.19 zeigt analog zu Abbildung 6.18 einen Vergleich der Planungsverfahren für $\gamma_{FRS}^{limit} = 1$. Der FRS-Anteil darf den MS-Anteil hier nicht übersteigen. Das Ziel dieser Parametrierung sind realisierbare Kapazitätspläne. Somit begünstigt sie Taktik 4 (hohe Systemauslastung und Vermeidung von Engpässen), vgl. Abschnitt 5.6.1. Dass dies gelingt, zeigt sich durch einen deutlichen

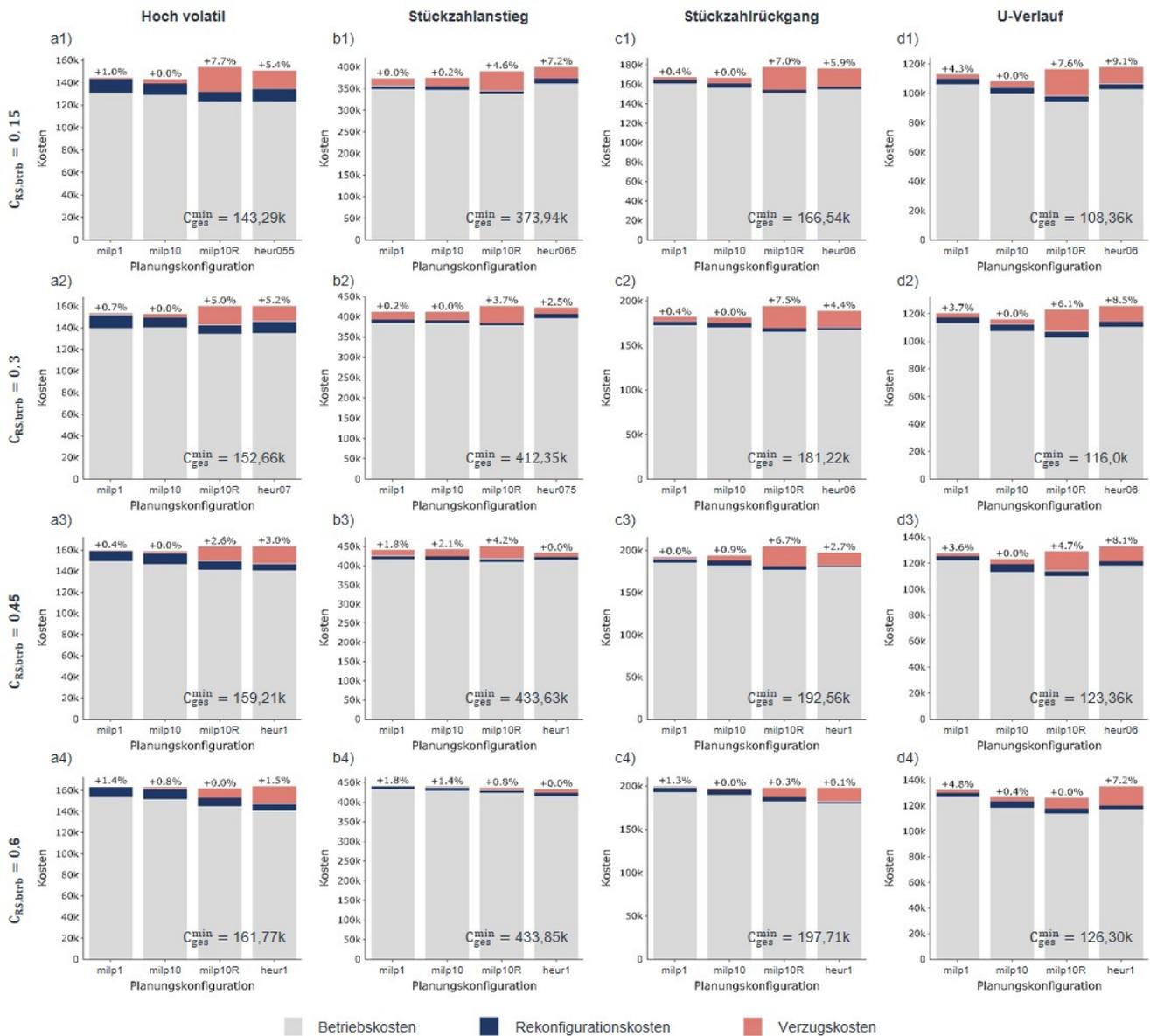


Abbildung 6.19: Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der milp1, milp10 und milp10R Konfiguration mit FRS-Limitierung sowie des heuristischen Benchmarks (mit λ^{min}) für niedrige RKK, verschiedene Stückzahlenszenarien und bei Variation des FRS-Betriebskostensatz

Rückgang der Verzugskosten bei den MILP-Konfigurationen für niedrige FRS-Kostensätze. Die MILP-Verfahren erreichen somit in 14 von 16 Fällen (Ausnahme b3, b4) die geringsten Gesamtkosten, wobei in zehn der Fälle milp10 die besten Ergebnisse liefert (a1, c1, d1, a2, b2, c2, d2, a3, d3, c4).

Im Fall des erhöhten RKK-Kostensatzes zeigt sich ein differenzierteres Bild für die Planungsverfahren, vgl. Abbildung A8.1 im Anhang A8. Die Rekonfigurationskosten nehmen in allen Stückzahlenszenarien einen höheren Anteil ein und beeinflussen die Gesamtkosten

zu Gunsten der kostensensitiven MILP-Planung, deren Konfigurationen auch ohne Nebenbedingung 5.37 in 14 Fällen die geringsten Gesamtkosten verursacht. In Dreiviertel der Fälle erfolgt ein FRS-Verzicht beim heuristischen Verfahren. Die Vorausschau ermöglicht den MILP-Konfigurationen insbesondere bei temporären Stückzahlabweichungen Kosteneinsparungen (vgl. Reihe 3 und 4). Im Vergleich mit *milp1* und *milp10* können mit *milp10R* durchweg niedrigere Betriebs- und Rekonfigurationskosten zu Lasten erhöhter Verzugskosten realisiert werden. In den Reihen 3 und 4 ergeben sich dadurch mehrheitlich geringere Gesamtkosten. So auch im bereits in Abbildung 6.17 qualitativ betrachteten Fall d3. In den Reihen 1 und 2 ist die Freigabe des Auftragsverzugs als Planungsoption wiederum kontraproduktiv. Bemerkenswert ist, dass im Gegensatz zur vorherigen Untersuchung auch bei niedrigen FRS-Kostensätzen keine negative Diskrepanz in der Auftragsallokation zu entstehen scheint. Dies kann auf die höheren FRS-RKK zurückgeführt werden, die als Nebeneffekt das Kostengefüge zu Ungunsten der FRS verändern. Der FRS-Anteil und das Risiko für MS-Engpässe sinkt.

Wie Abbildung A8.2 zeigt, wirkt sich eine Limitierung des FRS-Anteils mit $\gamma_{\text{limit}}^{\text{FRS}} = 1$ im Falle erhöhter RKK eher negativ auf die Gesamtkosten aus. In vier Fällen ergibt sich eine deutliche Verschlechterung (Reihe 1), in sieben Fällen eine leichte Verschlechterung (Reihe 2, a3, c3, c4). Lediglich in fünf Fällen (b3, d3, a4, b4, d4) ergibt sich eine marginale Verbesserung der Ergebnisse, die potentiell auch auf stochastische Effekte zurückgeführt werden könnte. Die Einschränkung des Lösungsraums mittels Nebenbedingung 5.37 ist damit im ungünstigen Fall kontraproduktiv. Liegt kein Risiko für eine Planungslücke vor, sollte auf manipulative Nebenbedingungen dieser Form eher verzichtet werden.

6.5.3 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Kapazitätsplanungsverfahren können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Aufgrund der Entkopplung der Steuerung von der Planung sinkt mit steigendem FRS-Anteil die Realisierbarkeit des Idealbetriebs.
2. Für das heuristische Planungsverfahren existiert abhängig vom Kostengefüge ein **kostenminimierender**, den FRS-Kapazitätsanteil begrenzender λ -Wert für FRS-fähige Aufgaben. Bei gegebenen Ausführungszeiten und Scheiterraten gilt $\lambda^{\text{min}} \geq 50\%$, d.h. der MS-Allokationsanteil an FRS-befähigten Aufgaben sollte in allen Fällen mindestens die Hälfte oder mehr betragen.
3. Beim kostenorientierten MILP-Verfahren führen niedrige FRS-Kosten zu einer verstärkten FRS-Allokation in der Planung. Der hohe FRS-Anteil übersteigt aufgrund von sich

- ausbildenden MS-Engpässen die Tragfähigkeit im Realbetrieb, vgl. Punkt 1. Eine erzwungene Begrenzung des FRS-Allokationsanteils (vgl. Nebenbedingungen 5.37) kann dies verhindern (analog zu λ im heuristischen Verfahren).
4. Durch ihre **opportunen Eigenschaften** generieren die MILP-Konfigurationen im Fall einer realitätsnaher bzw. realisierbarer Kapazitätsplanung bessere Lösungen als der heuristische Benchmark, insbesondere bei verstärkter Stückzahlvolatilität und erhöhten Rekonfigurationskosten.
 5. Durch die **Vorausschau** in der rollierenden Planung können die **Ressourcenbetriebskosten effektiv gesenkt** werden, führen aufgrund von Kompromissen in der Systemkapazität jedoch in vielen Fällen zu erhöhtem Auftragsverzug. Die resultierenden Gesamtkosten sind dann nicht zwingend niedriger.
 6. Alle MILP-Konfigurationen erlauben bei realisierbarer Planung eine effektive Reduktion der manuellen Arbeitslast und der Gesamtkosten bei hoher Systemauslastung und hohem Auftragserfüllungsgrad. Eine durchgängig beste Konfiguration kann jedoch nicht ausgemacht werden.
 7. Die **MILP-Konfigurationen generalisieren** besser als die Heuristik, welche eine λ -Voreinstellung erfordert und sind daher in der Praxis zu präferieren. Für große Systeme mit komplexen Ressourcentypen oder für die Charakterisierung der FRS-Tragfähigkeit eines Systems stellt das heuristische Verfahren eine gute Alternative dar.

6.6 Integrierte Untersuchung der DPS-Verfahren

Zum Abschluss der Verfahrensanalyse erfolgt in diesem Kapitel eine integrierte Untersuchung des entwickelten Demontageplanungs und -steuerungsansatzes (DPS-Ansatz) in der mehrperiodigen Anwendung. Diese umfasst die Strukturadaption mittels Kapazitätsplanung und Systemrekonfiguration bei aktiver metaheuristischer Reparametrierung des Multi-Prioritätsregelverfahrens. Zur Bewertung des integrierten Lösungsansatzes erfolgt ein Vergleich mit einer robusten, aber statisch gewichteten Ablaufsteuerung.

6.6.1 Einfluss der DPS-Handlungsfelder

Wie bereits in Abschnitt 6.3.3 und Abbildung 6.12 nachgewiesen werden konnte, variiert die optimale GK mit der Systemstruktur. Entsprechend ist anzunehmen, dass auch in den zuvor untersuchten mehrperiodigen Anwendungsfällen eine Leistungssteigerung durch Reparametrierung der Steuerung erreicht werden kann. Um dies zu Erproben, wird das Parametrierungsverfahren direkt an den Systemkonfigurator gekoppelt. Der Optimierungsprozess erfolgt

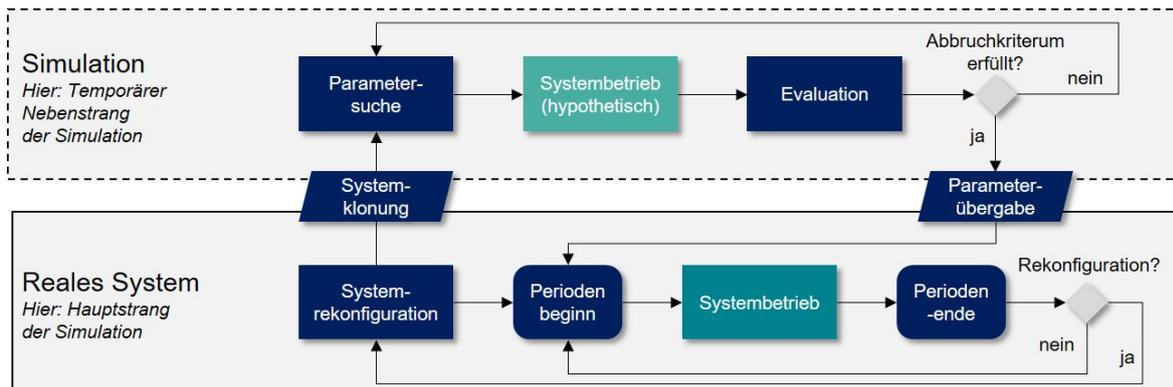


Abbildung 6.20: Funktionsweise des mehrperiodigen Systembetriebs im Hauptstrang der Simulation und Reparametrierung nach Rekonfiguration in temporär geöffneten Nebensträngen

im unmittelbaren Anschluss an die Systemrekonfiguration in einem Nebenstrang des Simulationsmodells, vgl. Abbildung 6.20. Im Realbetrieb könnte diese Optimierung der Steuerung in einem digitalen Zwilling des Demontagesystems oder einem sonstigen simulationsfähigen digitalen Abbild erfolgen. Der Hauptstrang wird dazu pausiert und erst nach Optimierung mit neuer GK reaktiviert. Die Optimierung im Nebenstrang läuft dabei jeweils auf einem Systemklon mit identischem Systemausgangszustand. Nach einperiodigen Evaluationsläufen werden diese terminiert und wieder verworfen.

Folgend wird die **integrierte DPS** mit **alternativen Konfigurationen der DPS** verglichen. In Tabelle 6.3 werden die zu vergleichenden DPS-Konfigurationen gelistet. Für die Parametrierung im integrierten Betrieb (**ps0**) wird PSO eingesetzt. Im Fokus stehen die Regeln NPA, HEW, NSK und KOZ. Als direkter Vergleich dient die bereits in Unterkapitel 6.5 verwendete robuste GK (**rp1**) mit NPA-, HEW- und NSK-Anteil. Außerdem wird als zusätzliche robuste Parametrierung (**rp2**) des MPV, die im Mittel beste GK aus Abschnitt 6.3.3 mit KOZ-Anteil statt NSK-Anteil in den Vergleich mit einbezogen. Für eine weiterreichende Einschätzung der realisierten Produktivitätssteigerung wird weiterhin eine reine NPA-Allokation (**npa**), eine Zufallsallokation (**zuf**) und eine Zufallsallokation bei unstrukturierter sofortiger Auftragsfreigabe (Lödding 2016, S. 340) ohne Freigabekriterium (**sof**) herangezogen. Die Untersuchung erfolgt anhand des Anwendungsfalls *U-Verlauf* bei $c_{FRS,btrb} = 0,45$ mit *milp10R* für die Kapazitätsplanung.

Abbildung 6.21 zeigt aufgeschlüsselt die mittleren Kosten der DPS-Konfigurationen auf. Neben den absoluten Gesamtkosten ist der relative Kostenunterschied im Verhältnis zur integrierten Konfiguration (**ps0**) aufgeführt. Die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse werden erwartungsgemäß durch zufallsbasierte Auftragsallokation (**zuf**) und sofortige Auftragsfreigabe (**sof**) erzeugt. Die Systemausbringung ist eingeschränkt, verbunden mit einem enormen

Tabelle 6.3: Spezifikation der betrachteten DPS-Konfigurationen für den Anwendungsfall U-Verlauf bei $c_{FRS,btrb} = 0,45$

DPS-Kürzel	DPS-Handlungsfeld			
	Auftragsfreigabeverfahren	Auftragsallokation	Steuerungsadaption	Kapazitätsplanung
sof	Sofortige Freigabe	Zufall	-	milp10R
zuf	Conwip $k_{cw} = 0,5$	Zufall	-	milp10R
npa	Conwip $k_{cw} = 0,5$	$w_{NPA} = 1$	-	milp10R
rp1	Conwip $k_{cw} = 0,5$	$w_{NPA} = 0,6$ $w_{HEW} = 0,2$ $w_{NSK} = 0,2$	-	milp10R
rp2	Conwip $k_{cw} = 0,5$	$w_{NPA} = 0,55$ $w_{HEW} = 0,35$ $w_{KOZ} = 0,1$	-	milp10R
ps0	Conwip $k_{cw} = 0,5$	dynamisch	PSO	milp10R

Anstieg der Verzugskosten, die zu 2,5- bzw. 3,5-fach höheren Gesamtkosten führen. Es liegt eine erhebliche Diskrepanz zwischen Ideal- und Realbetrieb vor. Die vier verbliebenen DPS-Konfigurationen liegen wiederum in einem engeren Kostenfeld. Der Betrieb erfolgt in allen Fällen nahe am Idealbetrieb, was am verhältnismäßig kleinen Anteil der Verzugskosten zu erkennen ist. Die Steuerungsverfahren nehmen dabei, im Gegensatz zu **sof** und **zuf**, keinen negativen Einfluss auf die Betriebskosten, die sich in einem Band $<1,5k$ GE bewegen. Der größte Kostensprung ergibt sich durch den Übergang von einer unikriteriellen (**npa**) zu einer multikriteriellen Auftragsallokation (**rp1**). Die robuste GK mit KOZ-Anteil (**rp2**) stellt sich als die bessere statisch-multikriterielle Alternative heraus. Das Verbesserungspotential durch Reparametrierung (**ps0**) hinsichtlich der Gesamtkosten fällt mit 0,08 % dabei verschwindend gering aus. Dies kann auf das Kostengefüge zurückgeführt werden, indem die Verzugskosten verglichen mit den Betriebskosten einen geringeren Anteil bilden. So kann sich im vorliegenden Fall eine sehr gute Steuerung nicht über die Betriebskosten von einer lediglich guten Steuerung absetzen (sunk costs, vgl. Unterkapitel 5.3). Erst durch erhebliche Auslastungsverluste, verursacht durch eine schlechte Steuerung, hier z.B. **zuf**, sammelt sich über mehrere Perioden ein erhöhter Auftragsrückstand an. Dieser erhöht ab einem gewissen Umfang den Kapazitäts- und Ressourcenbedarf in der Planung, was sich negativ in den Betriebskosten niederschlägt. Für gute Steuerungen muss die Differenzierung demnach jedoch über die Verzugskosten erfolgen. Mit **ps0** ergibt sich eine eindeutige Reduktion des Auftragsverzugs im Vergleich mit **npa** (159,8 %) und **rp1** (47,68 %). Verglichen mit **rp2** fallen knapp 7 % geringere Verzugskosten an.

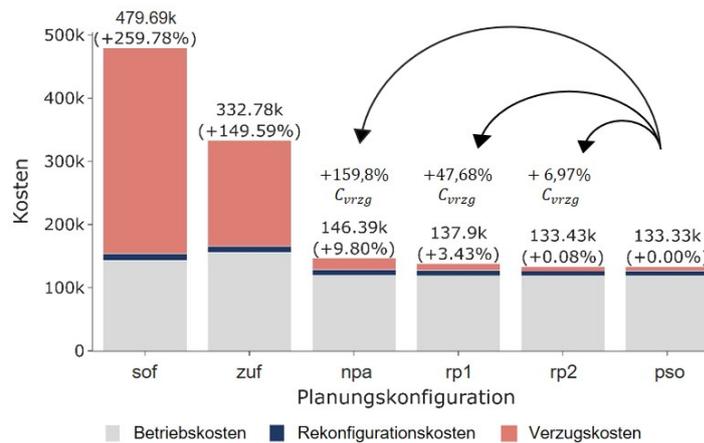


Abbildung 6.21: Vergleich der resultierenden Kosten für die in Tabelle 6.3 spezifizierten DPS-Konfigurationen und den Anwendungsfall U-Verlauf bei $c_{FRS,btrb} = 0,45$

6.6.2 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse der integrierten Untersuchung der DPS-Verfahren können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Der Verzicht auf eine strukturierte Auftragsfreigabe bzw. eine systematische Auftragsallokation geht mit einem Leistungsdefizit und erheblich höheren Verzugskosten einher.
2. Eine dynamische Reparametrierung des Multi-Prioritätsregelverfahrens ermöglicht eine effektive Optimierung der Systemleistung und eine Annäherung an den Idealbetrieb bei mehrperiodiger Betrachtung. Je nach Kostengefüge ist der Einfluss auf die Gesamtkosten vergleichsweise gering.

6.7 Zwischenfazit zum Lösungsansatz

Nach umfänglicher Erprobung in den vorangegangenen Kapiteln folgt in diesem Abschnitt eine zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse mit Fokus auf das gehobene Optimierungspotential der DPS. Der erprobte DPS-Ansatz basiert auf einem Steuerungsansatz für den Systembetrieb sowie auf einer Kapazitätsplanung für die Systemadaption. Die Besonderheit des Ansatzes liegt dabei in der strengen **Entkopplung beider Logikkomponenten** mit einer prädiktiven Kapazitätsplanung und einer rein reaktiven Steuerung. Wie die Ergebnisse zeigen, wird so ein **robuster Systembetrieb im volatilen, störanfälligen Demontageumfeld** möglich. Wie in Abschnitt 5.6.1 geschildert, ergibt sich gleichzeitig eine **Planungslücke** zwischen dem, der Planung für die Systemadaption zu Grunde liegenden Idealbetrieb, d.h. die vollständige Nutzung der Ressourcenkapazität unter Vernachlässigung des tatsächlichen Betriebsablaufs und dem von der Steuerung realisierten Realbetrieb. Die Folge der

Diskrepanz zwischen Ideal- und Realbetrieb sind Leistungsverluste. Unvermeidliche von der Steuerung nicht beeinflussbare Leistungsverluste (*steuerungsunabhängige Leistungsverluste* in Abbildung 6.22) entsprechen dem Defizit zwischen einem nicht realisierbaren Idealbetrieb und dem bestmöglichen Realbetrieb. Vermeidbare Leistungsverluste entstehen dadurch, dass das volle, tatsächlich abrufbare Potential einer Systemkonfiguration nicht abgerufen wird. Hierfür ist die Steuerung verantwortlich, weshalb diese steuerungsabhängigen Leistungsverluste hier auch kurz als **Steuerungsverluste** bezeichnet werden, vgl. Abbildung 6.22a.

Das Ziel in der Auslegung der Systemsteuerung ist folglich die **Minimierung der Steuerungsverluste** im Systembetrieb und damit verbunden die **Annäherung an den optimalen Realbetrieb**. Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Leistungsfähigkeit der systematischen Auftragsfreigabe durch Begrenzung des Komponentenumlaufs sowie der multikriteriellen Auftragsallokation. Weiterhin vergleicht Abbildung 6.22a in qualitativer Form verschiedene zuvor erprobte Auftragsallokationsverfahren mit einer **zufallsbasierten Auftragsallokation** (ZA) als Benchmark. So zeigt sich mit den Ergebnissen bereits ein erhebliches Einsparpotential durch **unikriterielle regelbasierte Auftragsallokation** (UA) (mittels NPA-Regel). Durch multikriterielle Auftragsallokation mit mehreren Regeln ist eine weitere Reduktion der Steuerungsverluste möglich. Insbesondere ermöglicht eine **robuste Regelgewichtung** (RMA) auch in mehrperiodigen Anwendungsfällen eine hohe Systemleistung. Dem optimalen Realbetrieb am nächsten kommt in dieser Arbeit schließlich eine **adaptive multikriterielle Auftragsallokation** (AMA). Der Leistungssprung zur RMA ist jedoch am geringsten, weswegen der tatsächliche Mehraufwand durch periodische Reparametrierung der Regelgewichtung, mit der sich tatsächlich ergebenden Mehrleistung abzuwägen ist.

Analog zu den Steuerungsverlusten bezeichnen die **Planungsverluste** (vgl. Abbildung 6.22b) die von der Kapazitätsplanung beeinflussbaren Leistungsverluste, die sich aus den Freiheitsgraden in der Ressourcenallokation ergeben. So können zwei verschiedene Systemkonfigurationen mit der gleichen Ressourcenkapazität und der gleichen Systemleistung im Idealbetrieb zu einer unterschiedlich hohen Systemleistung im optimalen Realbetrieb führen, die potentielle Systemleistung im Realbetrieb kann variieren. Hervorzuheben ist, dass sich durch Entkopplung von Planung und Steuerung die Gefahr der Engpassbildung, aufgrund häufig auftretender Diskrepanzen zwischen der in der Planung erwarteten und der tatsächlichen Aufgabenallokation, erheblich verstärkt. Konkret hat sich insbesondere die Übergewichtung der scheiteranfälligen FRS im Verhältnis zur flexibleren und einen robusten Betrieb garantierenden MS als ungünstig für die Systemleistung und als förderlich für MS-Engpässe herausgestellt. Bei entsprechendem Kostengefüge werden die Engpässe durch eine ausschließlich **kostenorientierte Kapazitätsplanung** (KKP) verursacht, in der die FRS

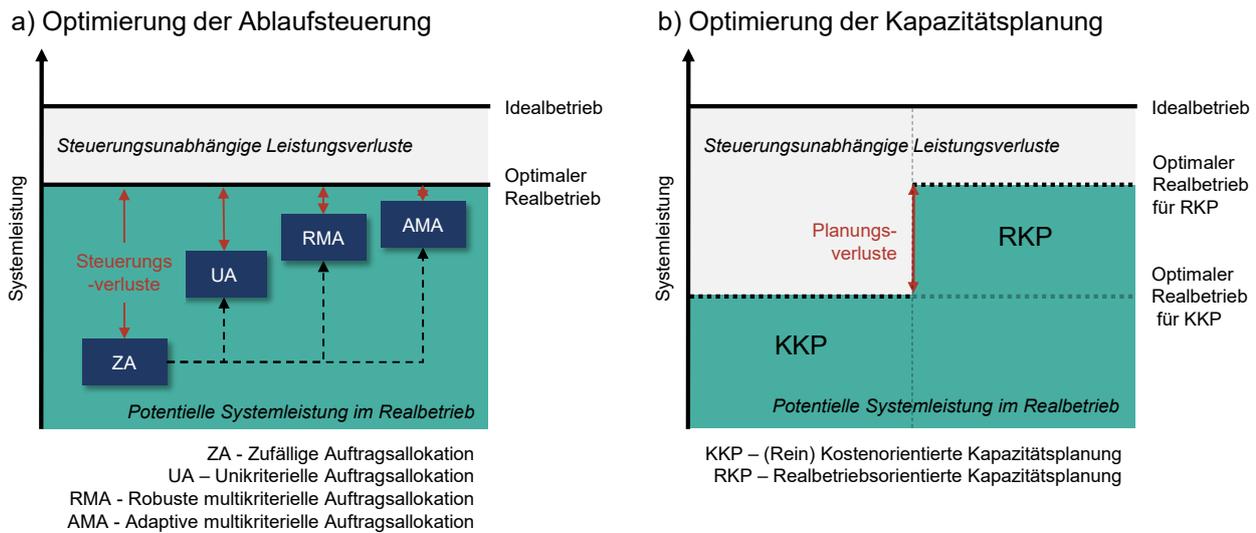


Abbildung 6.22: Zusammenfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit der DPS - a) Maßnahmen zur Reduktion von Steuerungsverlusten in der Auftragsallokation b) Vermeidung von Planungsverlusten durch realbetriebsorientierte Kapazitätsplanung

der MS aufgrund der geringeren Kosten vorgezogen wird. Schließlich zeigen Kapazitätsplanungskonfigurationen, die neben den Kosten auch den **Realbetrieb fokussieren** (RKP), indem die Wahrscheinlichkeit für Abweichungen in der tatsächlichen Auftragsallokation oder den Einfluss von Abweichungen reduzieren, ein deutliches Potential zur Verringerung von Planungsverlusten. Hierbei hat sich die **Limitierung der FRS-Kapazität** im Verhältnis zur MS-Kapazität sowohl im analytisch-heuristischen Planungsverfahren als auch in der exakten Kapazitätsplanung als zielführend herausgestellt.

6.8 Validierung am Anwendungsfall der Lichtmaschinendemontage

In diesem Unterkapitel wird das Referenzmodell sowie der DPS-Ansatz mittels Simulationsstudien anhand des Anwendungsfalls der Lichtmaschinenrefabrikation validiert. Dabei wird auf Realdaten aus der manuellen Lichtmaschinen-Demontage eines OE-Remanufacturers zurückgegriffen. In einem ersten Schritt erfolgt die Herleitung und Aufbereitung der Simulationseingangsdaten aus Produkt-, Ressourcen- und Operationssicht, d.h. die Abbildung des Anwendungsfalls. Danach folgt die eigentliche Validierung. Diese beginnt zunächst mit einer Analyse der Eignung der DPS für die operative Steuerung des Systembetriebs sowie für den Kapazitätsabgleich im mehrperiodigen Betrieb. Abschließend wird das Simulationsmodell für eine simulationsbasierte Szenarioanalyse genutzt. Dabei werden zwei Leitfragen untersucht:

1. Unter welchen Bedingungen lohnen sich flexible Roboterstationen?

2. Welcher Mehrwert ergibt sich durch die Berücksichtigung von Gebrauchtzuständen in der Planung und Steuerung?

Die Modellierung des Anwendungsfalls und die Szenarioanalyse baut auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Sprenger 2024 auf.

6.8.1 Modellierung des Demontagesystems

Eine Lichtmaschine ist ein kleiner elektrischer Generator für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Die Funktion einer Lichtmaschine ist die Speisung von Batterie, Zündung und weiterer Verbraucher mit elektrischer Energie. Lichtmaschinen unterliegen Verschleiß, Gebrauchtzustände haben jedoch einen hohen Restwert und können aufgearbeitet werden. Sie sind ein typisches Remanufacturing-Produkt (Matsumoto & Chinen et al. 2017b, S. 967)

Ziel dieses Kapitels ist zunächst die Abbildung des Produkts Lichtmaschine und der zu Grunde liegenden Demontageprozesse auf das in dieser Arbeit eingeführte Referenzmodell sowie eine vollständige Instanziierung der Systemkomponenten. Um ein virtuelles Modell eines hypothetischen AHDS für die Lichtmaschinendemontage zu schaffen, das valide Aussagen und Erkenntnisse zum Systemverhalten zulässt, wird dazu eine möglichst realitätsnahe, fundierte und nach Möglichkeit datenbasierte Instanziierung angestrebt. Die im Realsystem nicht existenten Systemkomponenten des AHDS werden mittels synthetisch erzeugten Daten und Expertenwissen vervollständigt. Die Details zur Modellierung sind vollständig dem Anhang A9 - A12 beigefügt. Das Vorgehen ist dabei analog zu den fiktiven Anwendungsfällen in Abschnitt 6.1 mit einer Modellierung der Produktsicht (Anhang A9), der Ressourcensicht (Anhang A10) sowie der Operationssicht (Anhang A11). Eine besondere Rolle kommt außerdem der Festlegung der MS-, FRS- und AS-Kostensätze zu. Hierzu ergänzt eine schichtsystemabhängige Stationskostensatzrechnung in Anhang A12 die Modellierung.

6.8.2 Validierung und Szenarioanalyse

6.8.2.1 Steuerung des Systembetriebs

Um zunächst das operative Verhalten des AHDS für die Demontage der Lichtmaschinen zu charakterisieren, zeigt Abbildung 6.23a einen etwa 30-minütigen Ausschnitt aus dem simulierten Demontageauftragsplan nach der Systemeinführung. Hierbei wurde die Systemsteuerung mit $k_{cw} = 0,5$ und einer robusten Parametrierung des MVP entsprechend $rp2$ in Tabelle 6.3 aus den vorherigen Untersuchungen übernommen. In die Systemkonfiguration werden drei MS, zwei FRS und für jeden der sieben DV-Typen eine AS aufgenommen. Mit der komponentenorientierten Auftragsfreigabe ergibt sich auch hier ein stabiler Systembetrieb. Es stechen mehrere, auf der Planzeitschätzung beruhende FRS-Operationen hervor, jeweils

a) Demontageauftragsplan

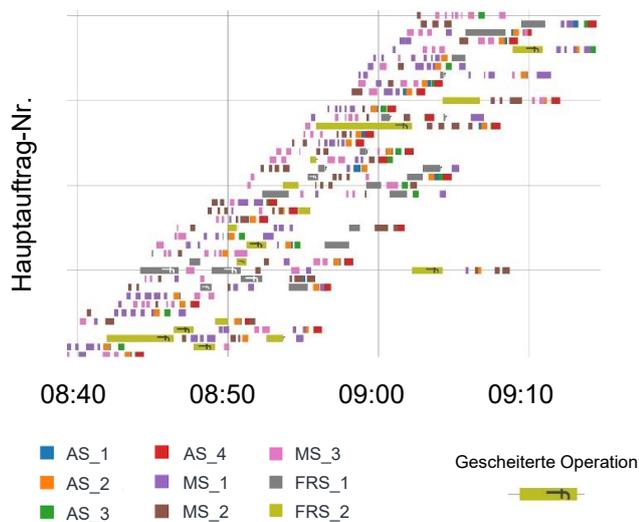
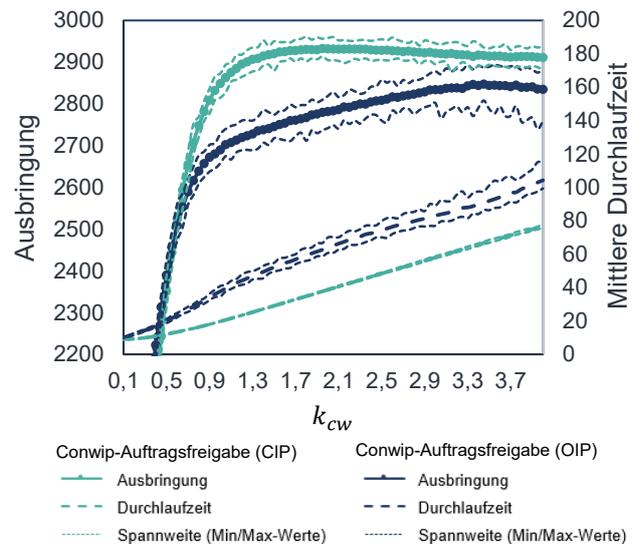
b) Sensitivität k_{cw} 

Abbildung 6.23: Operativer Systembetrieb in der Lichtmaschinendemontage: a) Ausschnitt aus dem Demontageauftragsplan für $k_{cw} = 0,5$, b) Sensitivität der Systemausbringung gegenüber dem Conwip-Koeffizient k_{cw} für die CIP- (mit $k_{skal} = 2$) und die OIP-Auftragsfreigabe (mit $k_{skal} = 1$) für jeweils 100 replizierte Simulationsläufe

in grau und gelb, welche die Operationen an den Stationen FRS_1 und FRS_2 markieren. In Einzelfällen gehen diese mit erheblich erhöhten Ausführungszeiten und einem gleichzeitig hohen Scheiterrisiko einher.

Abbildung 6.23b vergleicht analog zu Abbildung 6.6 die OIP- und CIP-Auftragsfreigabe anhand der Systemausbringung bei Variation von k_{cw} und unveränderten Skalierungsfaktoren k_{skal} . Anhand von 100 replizierten Läufen auf der ersten Produktionsperiode des Produktionsprogramms bei halbierten Periodendauern, zeigt der Fall eine strenge Dominanz des CIP und unterstreicht den Mehrwert der Komponentenorientierung für die Auftragsfreigabe. Der deutlich ausfallende Leistungsunterschied kann dabei auf die komponentenreichere Produktstruktur zurückgeführt werden. Bemerkenswert ist in diesem Zuge auch die Verschiebung des Übergangsbereichs zu höheren k_{cw} -Werten. Dies lässt vermuten, dass zwischen der Demontagetiefe bzw. der Komponentenanzahl der zu demontierenden Demontageobjekte und dem Conwip-Koeffizienten k_{cw} ein nicht-linearer Zusammenhang besteht. Eine weitere Begründung könnte in der sehr hohen Spreizung der Ausführungszeiten der Demontageoperationen zwischen verschiedenen Stationstypen liegen. Um einen leistungsstarken Betrieb zu ermöglichen, wird im weiteren Verlauf der Betriebspunkt des Systems erneut grob am Ausbringungshochpunkt orientiert und somit $k_{cw} = 2$ gewählt. Für das MPV wird weiterhin die GK aus *rp2* gewählt, s. Tabelle 6.3.

6.8.2.2 Kapazitätsabgleich im mehrperiodigen Betrieb

Im Folgenden werden das System und die DPS im mehrperiodigen Betrieb getestet. Hierbei liegt das Produktionsprogramm und die Systemparametrierung inklusive der Ablaufsteuerung aus dem vorherigen Abschnitt zu Grunde. Eine Periode wird dabei als eine Arbeitswoche definiert, deren Länge im Einschichtbetrieb 2400 Minuten oder im Zweischichtbetrieb 4800 Minuten entspricht. Vereinfachend wird von einer nahtlosen Produktion innerhalb einer Produktionsperiode ausgegangen, innerhalb derer Produktionsstillstände aufgrund von Pausen oder Schichtwechseln vernachlässigt werden. Als Ausgangskonfiguration werden 10 MS bzw. 5 MS im Ein- bzw. Zweischichtbetrieb gewählt. Untersucht werden drei Konfigurationen der DPS:

- **milp10**: Exakte Kapazitätsplanungsverfahren mit 10 Wochen Vorausschau
- **milp10nA**: Exaktes Kapazitätsplanungsverfahren mit 10 Wochen Vorausschau, Verzicht auf FRS und AS
- **stat**: Statisches System ohne Kapazitätsabgleich, Verbleib in Ausgangskonfiguration

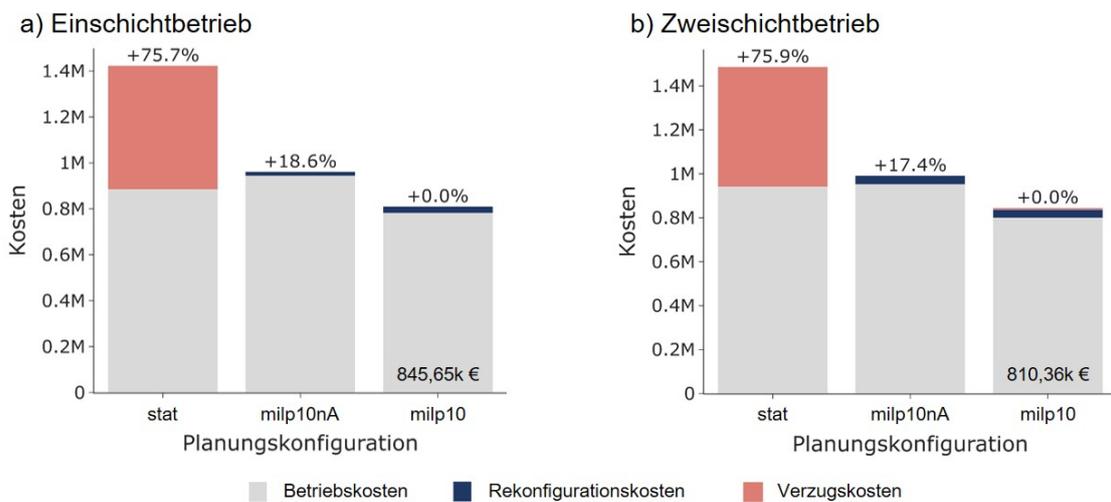


Abbildung 6.24: Vergleich der resultierenden Kosten bei vorausschauender Planung mit Automatisierung milp10 und ohne Automatisierung milp10nA sowie bei statischer Systemkonfiguration stat - a) im Einschichtbetrieb und b) im Zweischichtbetrieb

Abbildung 6.24 zeigt die resultierenden Kosten für beide Schichtsysteme, basierend auf je einem Produktionslauf. Die zugehörigen Systemanalysen sind wiederum in Abbildung 6.25 dargestellt. Erwartungsgemäß ergeben sich vermehrt Auslastungsverluste und Auftragsverzug bei Verzicht auf die Rekonfiguration des Systems, was sich in deutlich erhöhten

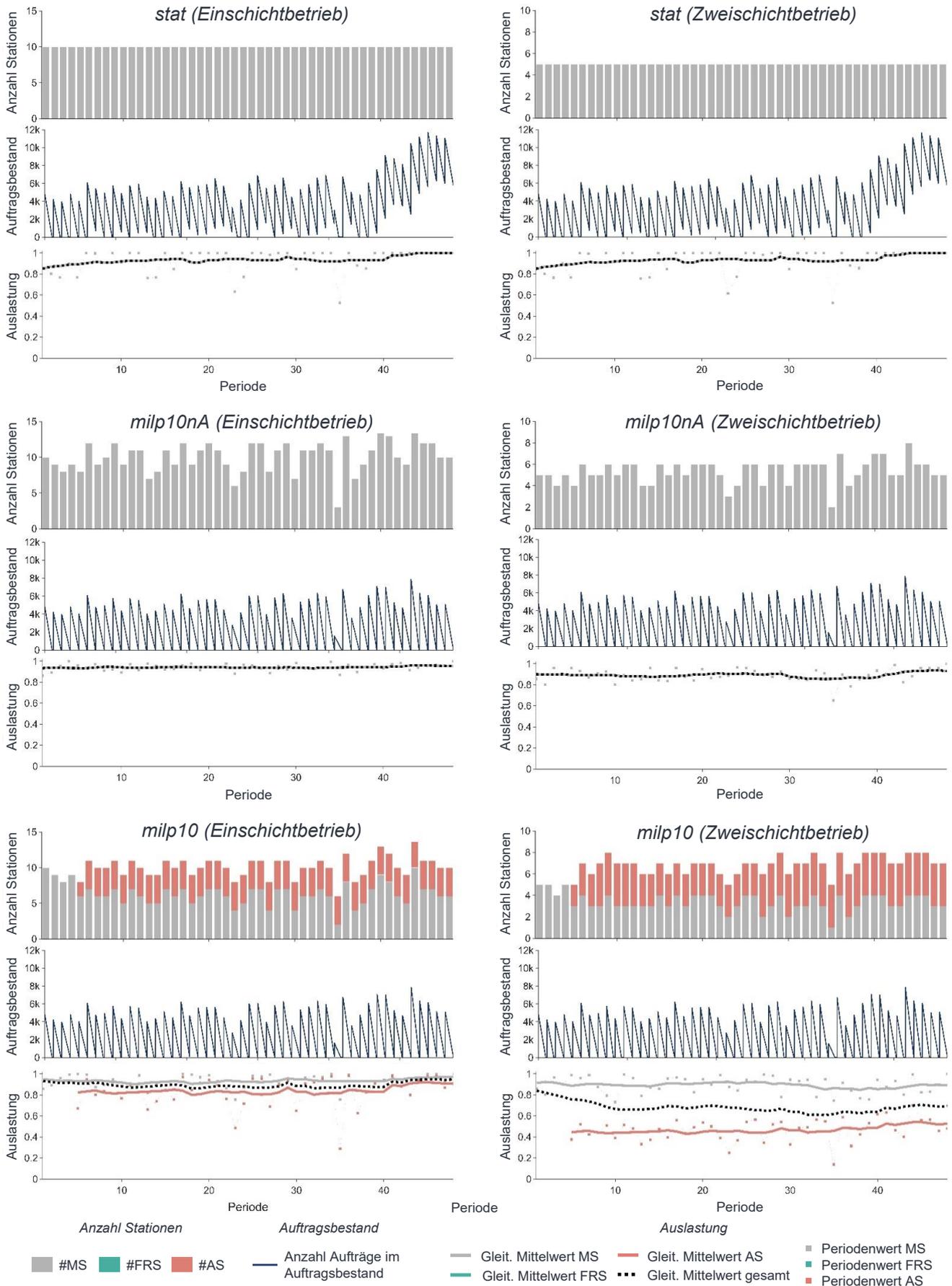


Abbildung 6.25: Mehrperiodige Systemanalyse für *stat*, *milp10nA* und *milp10* im Einschichtbetrieb (links) und im Zweischichtbetrieb (rechts)

Verzugskosten widerspiegelt. Durch Rekonfiguration können Verzugskosten wiederum vollständig vermieden werden. Mit der Verfügbarkeit von AS und FRS lassen sich jeweils zusätzlich knapp 20 % der Betriebskosten einsparen. Hierbei berücksichtigt *milp10* die ungünstige FRS-Kosteneffizienz, verzichtet vollständig auf den Einsatz von FRS und ist damit im Einklang mit der in Anhang A13 durchgeführten Kosteneffizienzanalyse für die ursprüngliche konservative Parameterschätzung der FRS-Operationen. Sowohl im Ein- als auch im Zweischichtbetrieb bleibt die Anzahl der AS weitgehend konstant. Dies ist auf die geringere Reaktionsfähigkeit der AS zurückzuführen. Auf mäßige und kurzfristige Stückzahlschwankungen reagiert das System durch Anpassung der MS-Anzahl, das System „atmet“ über die kapazitätsflexibleren MS.

Sowohl für *milp10* als auch für *milp10nA* erzielt die DPS eine durchweg hohe Systemauslastung um die 90 %, vgl. Abbildung 6.25. Eine Ausnahme stellt *milp10* im Zweischichtbetrieb dar. Hier bewegt sich die AS-Auslastung um die 40 - 50 % mit Ausreißern zu niedrigeren Auslastungen im Fall von Stückzahltiefs, vgl. Abbildung 6.25. Der im Zweischichtbetrieb vergleichsweise geringe Kostensatz rechtfertigt dennoch den AS-Einsatz. So erzielt *milp10* hier über alle Konfigurationen die niedrigsten Gesamtkosten, vgl. Abbildung 6.24.

Insgesamt unterstreicht das Untersuchungsergebnis durch die hohe realisierte Systemauslastung, die Vermeidung von Auftragsverzug sowie die kosteneffiziente Integration der AS, die **Eignung** des entwickelten Kapazitätsplanungsverfahrens, der Auftragsfreigabelogik und der Auftragsallokation **für reale Anwendungsfälle**.

6.8.2.3 Steigerung der Robotereffizienz und -robustheit

Nachdem bei ursprünglicher Parametrierung die Kosteneffizienz der FRS ungünstig ausfällt und auch die Kapazitätsplanung folgerichtig den FRS-Einsatz vermeidet, wird folgend das Rekonfigurationsverhalten der DPS sowie die Kostenentwicklung bei systematischer Steigerung der FRS-Kosteneffizienz untersucht.

In Anlehnung an Anhang A13 wird hierzu die Dauer sowie die Erfolgswahrscheinlichkeit aller Operationen pauschal nach Formel A13.1 und A13.2 verbessert. Hierzu werden der Effizienzfaktor k_{eff} und der Robustheitsfaktor k_{rbst} gleichmäßig schrittweise erhöht. Um eine Übergewichtung der FRS, insbesondere bei günstiger FRS-Kosteneffizienz, zu ermöglichen, wird Nebenbedingung 5.37, welche den Kapazitätsanteil von FRS limitiert, deaktiviert. Die Simulationsläufe werden jeweils sechsfach repliziert. Abbildung 6.26 zeigt ausschnittsweise die Systemanalysen für Einzelläufe des Systems, bei schrittweiser Steigerung der FRS-Kosteneffizienz mit $k_{eff}, k_{rbst} \in \{2,3,4,5,6,7\}$ von sechs Parametersets. Bei Halbierung von Scheiterrate ($k_{rbst} = 2$) und Ausführungsdauer ($k_{eff} = 2$) erfolgt im Einzellauf die Einplanung jeweils einer FRS in 13 Perioden. Bei weiterer Steigerung der Kosteneffizienz ergibt sich eine

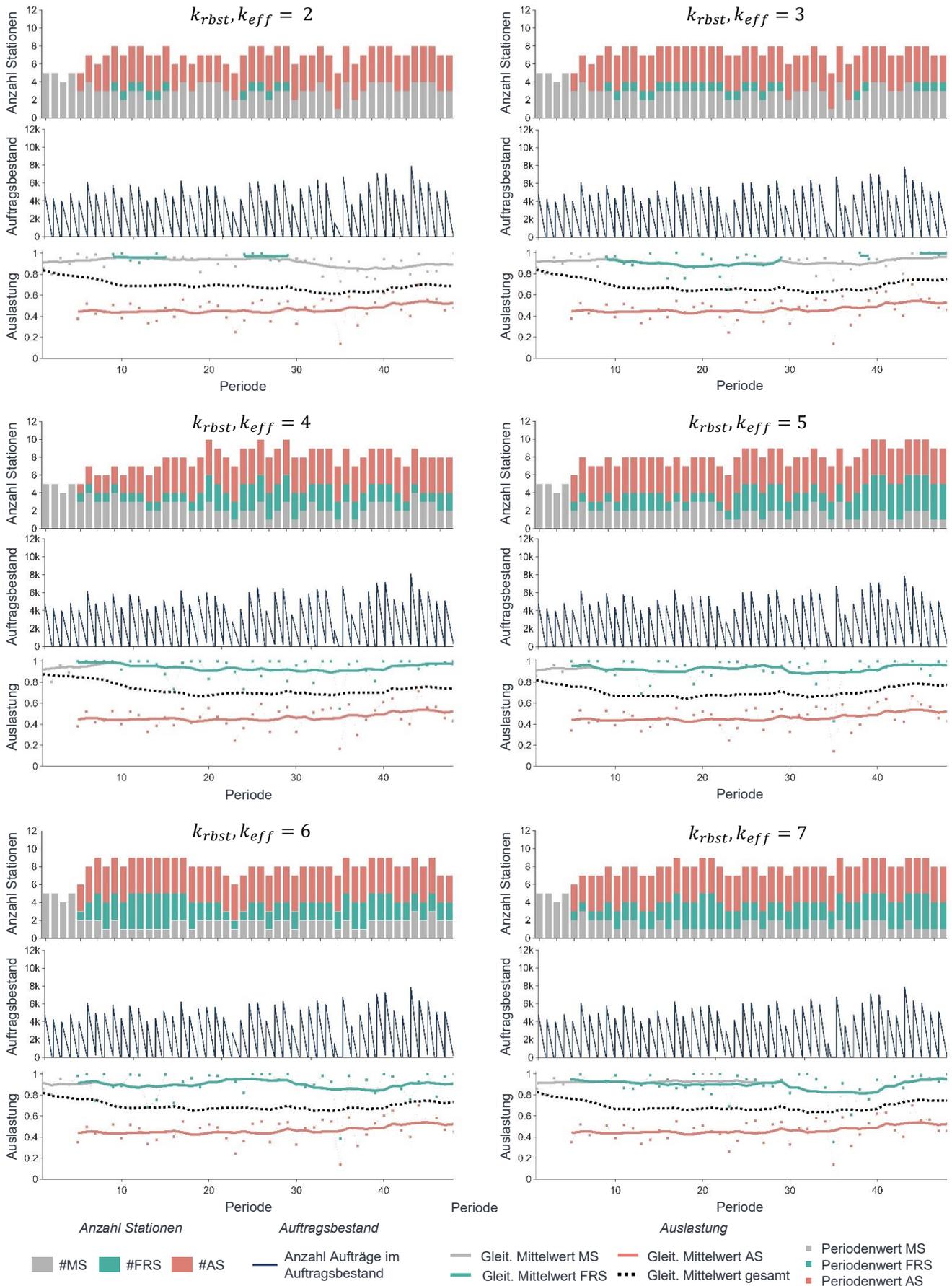


Abbildung 6.26: Mehrperiodige Systemanalyse für milp10 im Zweischichtbetrieb bei schrittweiser Steigerung der FRS-Kosteneffizienz

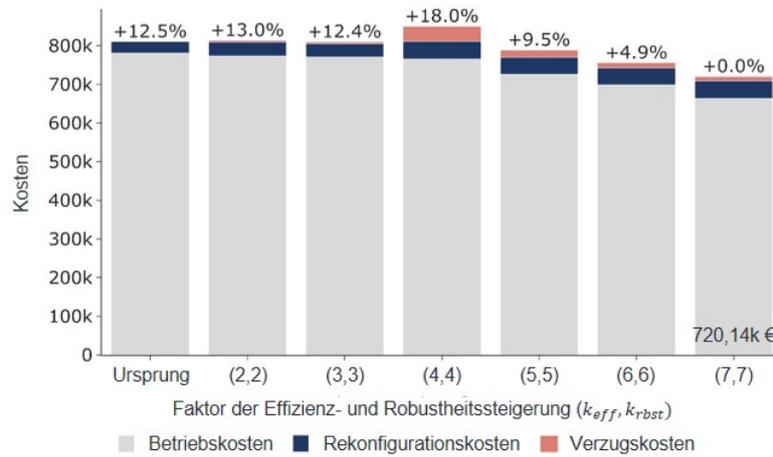


Abbildung 6.27: Vergleich der resultierenden Kosten bei schrittweiser Steigerung der FRS-Kosteneffizienz für milp10 im Zweischichtbetrieb

graduelle Erhöhung des FRS-Anteils. Abbildung 6.27 vergleicht die resultierenden Kosten der verschiedenen (k_{eff}, k_{rbst}) -Kombinationen.

Für $k_{eff}, k_{rbst} = 2$ bzw. 3 werden vereinzelt FRS eingeplant, woraus sich jedoch kein signifikant positiver Effekt auf die Gesamtkosten ergibt. Für $k_{eff}, k_{rbst} = 4$ steigt der FRS-Anteil weiter und resultiert in Teilen in einer Übergewichtung der FRS gegenüber der MS. Hierbei ergibt sich eine Planungslücke (vgl. Zwischenfazit Abschnitt 6.5.3), Auftragsverzug sowie daraus resultierende Verzugskosten, die letztlich zum Anstieg der Gesamtkosten führen. Die FRS-Kosteneffizienz begünstigt für viele Demontageaufgaben die FRS-Allokation in der Planung, führt aber insbesondere aufgrund einer verbleibenden, (zu) hohen Scheiterwahrscheinlichkeit zu einem MS-Engpass und damit einhergehend erhöhten Verzugskosten. Mit weiterer Steigerung der FRS-Kosteneffizienz ($k_{eff}, k_{rbst} \geq 4$) sinken schließlich die Gesamtkosten stetig ab. Der FRS-Anteil steigt noch leicht an, erreicht jedoch durch den limitierten FRS-Fähigkeitsraum eine obere Grenze. Aufgrund der geringeren Scheiterwahrscheinlichkeit sinkt das Engpassrisiko, die geringere Operationsdauer erhöht die Produktivität und senkt den Ressourcenbedarf. Im Endeffekt sinken die Gesamtkosten.

6.8.2.4 Sensitivitätsanalyse zur Produktzustandstransparenz

Eine wichtige Komponente der Modellierung sowie der DPS ist das Qualitätsklassensystem. Die Kenntnis der Qualitätszustände (neben der stets gegebenen Kenntnis des zugehörigen Produkttyps bzw. der -variante) der zu demontierenden Gebrauchsgüter sowie deren Auswirkung auf die Demontageprozesse trägt maßgeblich zur Reduktion von Unsicherheit bei. Dies wird im Folgenden als Produktzustandstransparenz bezeichnet. Der Grad der Transparenz hängt dabei maßgeblich vom Umfang der Produktbefundung und der Datensammlung im Systembetrieb bzw. der Aufbereitung der Plandaten ab. In diesem Abschnitt wird der

Mehrwert untersucht, der sich durch die zusätzliche Transparenz und die differenzierte Betrachtung der Produktzustände in der DPS ergibt. Hierzu werden vier **Transparenzklassen** definiert, vgl. auch Abbildung 6.28:

1. **Grobe Plandaten (pld)**: DPS aufbauend auf produktvariantenübergreifenden aufgabenspezifischen Plandaten, keine Unterscheidung zwischen Produktvarianten und Qualitätsklassen. Statische Plandaten ergeben sich aus den Mittelwerten aller Operationen (Moduswerte und Erfolgswahrscheinlichkeiten) der 16 Demontageaufgaben.
2. **Produktspezifische Tracking-Daten (prb)**: DPS aufbauend auf dynamischen Tracking-Daten basierend auf der kontinuierlichen Überwachung von Demontageoperationen, Vernachlässigung der Produktzustände. Die Datenbasis wächst und wird genauer über die Zeit.
3. **Produktzustandsspezifische Tracking-Daten (przb)**: DPS aufbauend auf dynamischen Tracking-Daten basierend auf der kontinuierlichen Überwachung von Demontageoperationen, Berücksichtigung der Produktzustände. Die Datenbasis wächst und wird genauer über die Zeit (Hinweis: Defaultkonfiguration der Untersuchungen in Unterkapitel 6.2 bis 6.6).
4. **Perfektes Wissen (prfw)**: DPS bei genauer Kenntnis der Verteilungsfunktionen und der Verteilungsparameter aus der Modellkonfiguration des Simulationsmodells. Die Erwartungswerte werden analytisch berechnet. Die Datengrundlage ist statisch.

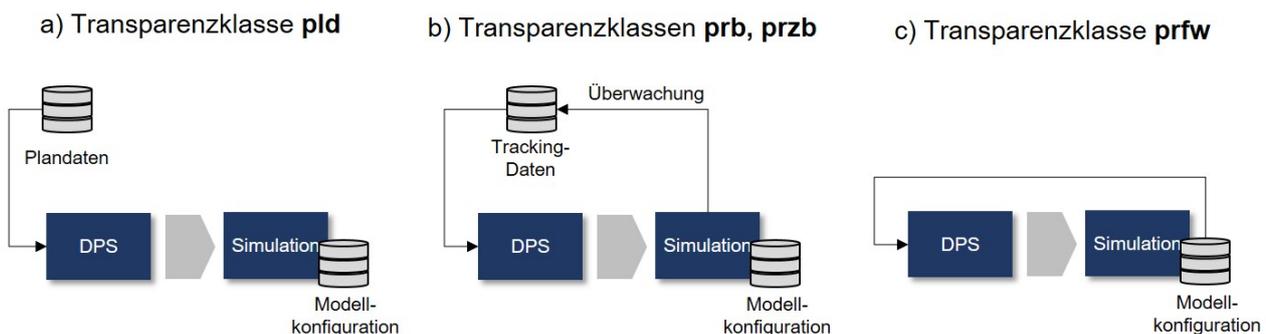


Abbildung 6.28: Herkunft der Planungsdaten für die vier Transparenzklassen: a) pld b) prb, przb und c) prfw

In heutigen Demontagesystemen in der Industrie werden meist nicht für alle Varianten Planzeitdaten erhoben. Fälle mit einem kontinuierlichen Prozesszeittracking sind dem Autor noch keine bekannt. Dies gilt auch für den betrachteten Anwendungsfall. Die Industrie kann folglich in eine Mischform der Transparenzklasse 1 und 2 eingeordnet werden.

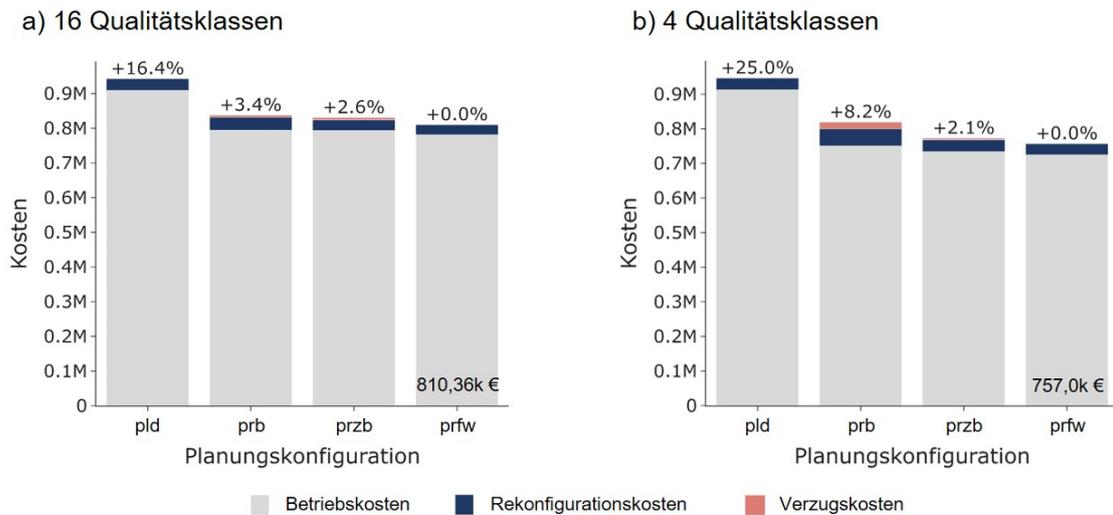


Abbildung 6.29: Vergleich der Gesamtkosten für die vier Transparenzklassen *prfw*, *przb*, *prb* und *pld* für a) 16 und b) vier Qualitätsklassen für *milp10* im Zweischichtbetrieb

Die **Untersuchung der Transparenzklassen** erfolgt anhand des Anwendungsfalls im Zweischichtbetrieb bei sonst zu Abschnitt 6.8.2.3 analoger Parametrierung ohne Modifikation der FRS-Kosteneffizienz. Das bereits zuvor verwendete Produktionsprogramm mit 16 Qualitätsklassen wird weiterhin mit einem auf vier QK reduzierten Anwendungsfall verglichen. Dabei werden lediglich die Merkmale Korrosion und Verschmutzung mit QK1, QK5, QK9 und QK13 betrachtet, wodurch die Komplexität in der Planung und die Zustandsvielfalt reduziert wird. Außerdem ergeben sich mit den gewählten QK signifikantere Unterschiede in den Produktionsprozessen.

Abbildung 6.29 zeigt die mittleren Kosten aus sechs replizierten Simulationsläufen für 16 QK (a) und vier QK (b). Die niedrigsten Kosten ergeben sich in beiden Fällen erwartungsgemäß für *prfw* bei vollständiger Operationskenntnis. An zweiter Stelle steht *przb* und die DPS mit produktzustandsbasierter Planung, welche in a im Mittel 0,8 % und in b) 6,1 % geringere Kosten als *prb* verursacht. Die mit Abstand höchsten Kosten ergeben sich aus Transparenzklasse 4 und einer DPS mit grober Planungsgrundlage.

Es zeigt sich, dass das Kosteneinsparungspotential mit steigender Transparenz und der Verbesserung der Planungsbasis zunimmt. Trotz der hochvariablen Operationen ergibt sich ein Planungsvorteil durch eine zustandsbasierte, mittels Qualitätsklassensystem realisierten Planung. Der Planungsvorteil ist umso größer, je besser die QK voneinander abgegrenzt werden können und je größer die Unterschiede zwischen verschiedenen QK gleicher Demontageoperationen ausfallen.

6.8.3 Zwischenfazit

Die Erkenntnisse aus der Validierung der DPS anhand der Lichtmaschinendemontage können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die entwickelte Referenzarchitektur ist **kompatibel** und befähigt zur Abbildung realer Remanufacturing-Produkte und Demontagesysteme.
2. Die DPS erlaubt einen **kostenoptimierten, zielgerichteten Ressourceneinsatz** und einen **leistungsstarken Systembetrieb**.
3. Bei der hier gewählten, ausgesprochen konservativen Parametrierung der FRS-Operationen (basierend auf Expertenschätzungen und der Leistungsfähigkeit in heutigen Forschungsansätzen) **unterliegt die FRS-Kosteneffizienz** deutlich der MS-Kosteneffizienz. Ein sinnvoller FRS-Einsatz ergibt sich unter den gewählten Bedingungen für die Lichtmaschinendemontage erst mit einer stärkeren Kostendifferenzierung zwischen MS und FRS, bzw. mit einer Steigerung der Robustheit und Effizienz der FRS-Operationen (hier exemplarisch jeweils um den Faktor 5).
4. Die optimistisch gewählte AS-Spezifikation führt zu einem **intensiven AS-Einsatz**, der eine signifikante Kostenreduktion gegenüber der rein-manuellen MS-basierten Demontage ermöglicht. Sowohl im Einschicht- als auch im Zweischichtbetrieb beträgt das Einsparungspotential zwischen 15 und 20 %.
5. Die Verbesserung der Planungsgrundlage durch eine kontinuierliche Erfassung von Demontageoperationen sowie die Berücksichtigung von Produktzuständen ermöglicht eine genauere Planung und bietet das Potential für eine **Kostenreduktion trotz hoher Volatilität und Unsicherheit** in der Operationsausführung. Gegenüber einer produktzustandsneutralen Planung zeigen sich Kostenersparnisse von bis zu 6 %, gegenüber einer auf statischen Planzeitdaten basierenden Planung von bis zu 22,5 %.

7 Diskussion und Ausblick

Im Anschluss an die umfängliche Erprobung und Validierung des Lösungsansatzes erfolgt in diesem Kapitel zunächst eine kritische Auseinandersetzung mit der Zielsetzung (Unterkapitel 1.3) und den Forschungsfragen (Unterkapitel 3.6) in Unterkapitel 7.1. Danach folgt in Unterkapitel 7.2 ein Ausblick auf mögliche Forschungsthemen für weiterführende Forschungsarbeiten.

7.1 Diskussion

Die hohe Komplexität der industriellen Demontage im Remanufacturing sowie der Bedarf nach einer flexiblen Prozessautomatisierung und Produktivitätssteigerung erfordert dynamische Ansätze wie **Agile Hybride Demontagesysteme (AHDS)**. So motiviert, fokussiert diese Arbeit einen Ansatz für die Systemrepräsentation, den Systembetrieb und die Systemadaption von AHDS. Die Zielsetzung wurde in Kapitel 3.6 anhand von Forschungsfragen konkretisiert und im Rahmen der Arbeit wie folgt beantwortet.

Zur Beantwortung von **Forschungsfrage 1** (*Systemrepräsentation - Wie können die Komplexitäten agiler Demontagesysteme sowie gebrauchter Produkte in einem integrierten Modell abgebildet werden?*) wird in dieser Arbeit erstmals ein auf der *Produkt-Prozess-Ressourcen*-Systematik basiertes integriertes Referenzmodell für agile hybride Demontagesysteme vorgestellt, das manuelle (MS), flexible roboterbasierte (FRS) und automatisierte (deterministische) Demontageressourcen (AS) mit variierenden Eigenschaften und Fähigkeiten differenziert sowie die Abbildung demontagespezifischer Komplexitäten erlaubt. Zu Letzteren zählen divergierende Produktstrukturen und variable Demontagereihenfolgen, die mittels Demontage-Petri-Netzen (DPN, vgl. Zussman & Zhou 1999) modelliert werden. Die Variabilität der Produktzustände wird mittels Qualitätsklassensystemen (vgl. Colledani & Battaia 2016) abgebildet. Unreife Prozessfähigkeiten flexibler Roboterstationen (FRS) finden durch die Möglichkeit des Prozessscheiterns Berücksichtigung. Die Parameter einer Demontageoperation, d.h. die ressourcenspezifische Instanz einer Demontageaufgabe, in Form der erwarteten Ausführungsdauer und der Erfolgswahrscheinlichkeit, werden von der Qualitätsklasse der Produktinstanz und vom gewählten Ressourcentyp bestimmt. Die Unsicherheiten der Demontageprozesse werden so in strukturierter Form modelliert und erlauben detailliertere Simulationen hochkomplexer Demontageumgebungen. Die Validierung durch die Abbildung der Lichtmaschinendemontage unterstreicht die Kompatibilität des Referenzmodells zu realen Produkten und Systemen.

Eine Herausforderung des gewählten Referenzmodells stellt aus Sicht der **industriellen Anwendung** der erhöhte Modellierungsaufwand dar. Hierbei ist stets ein Kompromiss zwi-

schen Aufwand und erforderlichem Detaillierungsgrad zu finden. Die Petri-Netz-basierte Produktrepräsentation erfordert, wie auch andere Ansätze für arbeitsteilige Systeme, eine sorgsame Definition unter Berücksichtigung der Demontagefähigkeiten der Demontageressourcen. Die Abgrenzung der Demontageaufgaben muss in enger Abstimmung mit der Prozessentwicklung erfolgen. Kompromisse im Detaillierungsgrad führen hierbei zu mangelnder Flexibilität im Betrieb. Eine feingranulare Definition der Demontageaufgaben ist wiederum nicht praktikabel für manuelle Operationen und kann die Werkerakzeptanz verringern. Die kontinuierliche Erfassung von Operationszeiten bietet erhebliches Potential zur Reduktion des Aufwands in der Planung, da auf vorgelagerte Zeitstudien verzichtet werden kann. Die Verfügbarkeit von Produktzustandsinformationen zu Klassifikationszwecken in Zukunft ist eine legitime Annahme und gut abgestimmt mit laufenden Initiativen wie dem digitalen Produktpass (World Business Council for Sustainable Development & Boston Consulting Group 2023). In multimodaler Kombination mit einer effizienteren Gebrauchtproduktbefundung kann eine Einteilung der Gebrauchtprodukte in Qualitätsklassen automatisiert erfolgen (Kaiser & Lang et al. 2022). Das Qualitätsklassensystem sticht dabei durch seine Eingängigkeit und der Integrierbarkeit in heutige Planungssysteme hervor und ist so mit einer hohen Industrietauglichkeit verbunden. Herausfordernd für den Anwender bleibt jedoch die Definition sinnvoller Qualitätsmerkmale sowie die Segmentierung der Instanzen einer Produktvariante in geeignete Qualitätsklassen, speziell bei hoher Unsicherheit bzgl. der Merkmalseinflüsse. Insbesondere für ein simpel aufgebautes Qualitätsklassensystem mit wenigen Klassen ist Domänenwissen erforderlich. Eine feinmaschigere Unterscheidung von Produktzuständen, z.B. durch Differenzierung auf Komponentenebene, verringert jedoch die Aussagekraft der Planzeitdaten. Für eine vollständige Nutzung des Potentials der Trackingdaten und eine differenzierte Produktzustandsbetrachtung bedarf es eines dynamischeren Systems sowie der Berücksichtigung von Zustandsrelationen und Demontageeinflüssen.

Forschungsfrage 2 (*Systembetrieb - Wie kann eine adaptive Systemsteuerung für einen robusten und leistungsmaximierenden hybriden Demontagebetrieb gestaltet werden?*) wurde in dieser Arbeit mit der Entwicklung einer dezentralen Ablaufsteuerung beantwortet. Durch die vollständige Entkopplung von der Kapazitätsplanung und den echtzeitfähigen, reaktiven Einsatz der Steuerung wird eine maximale Verfügbarkeit und ein verzögerungsfreier, robuster Systembetrieb erreicht. Dazu trägt ein auf divergierende Materialflüsse ausgelegtes neuartiges Auftragsfreigabeverfahren basierend auf einer Komponentenregelung bei. Dieses schwingt, bei geeigneter Parametrierung, die Systembelastung nach Systemanlauf in kurzer Zeit im ausbringungsoptimalen Übergangsbereich zwischen Unter- und Überlast ein. Für die Auftragsallokation wird ein Prioritätsregelverfahren eingesetzt, das sich ebenfalls durch Erklärbarkeit, Effektivität und Echtzeitfähigkeit auszeichnet. Im Gegensatz zum Einsatz von Prioritätsregeln für die Auftragsreihenfolgebildung wird hier die Priorisierung freier Stationen

fokussiert. Durch kombinierte Betrachtung mehrerer domänenspezifischer Regeln kann eine positive Emergenz im System sowie eine im Vergleich mit einer unikriteriellen Entscheidung höhere Systemleistung erzielt werden. Durch die Regelauswahl sowie die Veränderung der Regelgewichtung ist weiterhin eine Anpassung der Steuerung an unterschiedliche Zielgrößen und Anwendungsfälle möglich. In Verbindung mit dem vorgestellten Parametrierungsverfahren wird dieser Prozess automatisiert. Auch die Steuerung verbindet so eine hohe Adaptivität und Industrietauglichkeit.

Die Erprobung des Lösungsansatzes zeigt eine eindeutige Leistungssteigerung bei stufenweiser Integration der Steuerungskomponenten. Als Benchmark dient dabei jedoch lediglich ein Zufallsverfahren. Für eine objektive Bewertung der Leistungsfähigkeit sollte ein weiteres nicht triviales Benchmarkverfahren für einen stärkeren Vergleich und eine bessere Evaluation der Steuerung herangezogen werden.

Die konsequente Entkopplung der Steuerung von der Planung ermöglicht den robusten Betrieb, durch die fehlende Abstimmung entstehen oder vergrößern sich jedoch potentiell auch die Ausbringungsverluste. Erst durch die mangelnde Verbindlichkeit der Allokationsentscheidungen der Planung resultiert die Lücke zwischen Ideal- und Realbetrieb. Im Speziellen trifft dies die MS und FRS-Allokation, die für Aufgaben mit variierendem Automatisierungspotential und MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis eine streng-selektive Aufgabenzuweisung erfordert. Diese Anforderung wird von der vorliegenden reaktiven Steuerung insbesondere bei erhöhtem MS-Engpassrisiko nicht hinreichend erfüllt. Eine lose Kopplung, mit verbindlicherem Umgang mit kritischen Allokationsentscheidungen aus der Planung in der Steuerung, unter Wahrung der Robustheit, könnte eine Reduktion der Steuerungsverluste ermöglichen.

Zur Beantwortung von **Forschungsfrage 3** (*Systemadaption - Wie kann eine gezielte Systemrekonfiguration zur Anpassung der Systemkapazität für einen kostenoptimierten Betrieb erreicht werden?*) wurden in dieser Arbeit Kapazitätsplanungsverfahren entwickelt und umfangreich erprobt, die eine zielgerichtete Anpassung der Systemkonfiguration aufbauend auf dem sich aus einem bekannten Produktionsprogramm ergebenden Kapazitätsbedarf ermöglichen. Konkret adressiert der Ansatz neben Stückzahlrends das Problem von Auslastungsverlusten und Fehlmengen, die sich in der Remanufacturing-Praxis durch eine volatile Auftragslast und schwankende Produktzustände ergeben. Aufbauend auf dem eingeführten Referenzmodell, zeichnen sich die vorliegenden Kapazitätsplanungsansätze in neuartiger Form durch Beachtung der individuellen Fähigkeiten verschiedener Demontageressourcentypen aus. Hierzu zählt u.a. die Beachtung der Scheitermöglichkeit von flexiblen Demontagerobotern (FRS). Der auf linearer Programmierung basierende Planungsansatz (MILP) berücksichtigt dabei inhärent die Kosteneffizienz der Demontageressourcen zur Ableitung der wirtschaftlichsten Systemkonfiguration. Für den Einzug der Teilautomatisierung in industrielle

Demontagesysteme genießt der Lösungsansatz damit eine hohe Relevanz. Eine andere wichtige Erweiterung der aktuellen Forschungslandschaft stellt dabei die Berücksichtigung der Gebrauchtzustände in der Kapazitätsplanung dar. Die aus Abschnitt 6.8.2.4 hervorgehende Erkenntnis zur Verbesserung von Plankapazitäten und zur Kostenreduktion durch eine zustandsorientierte Planung hat dabei Relevanz, sowohl für die Praxis als auch für die weitere Forschung.

Schließlich stellt die mehrperiodige Erprobung mit einer Systemrekonfiguration zur Laufzeit, kombiniert mit einer ereignisdiskreten Ablaufsimulation eine zusätzliche Erweiterung zum Stand der Forschung dar, welche letztlich die rigorose Evaluation der Planungsverfahren unter realitätsnahen Bedingungen erst ermöglicht.

Im Gegensatz zur Berücksichtigung der Produktzustände verzichtet der Ansatz bewusst auf eine Differenzierung der Werkerfähigkeiten. Zur Vermeidung von Planungsfehlern wäre diese im Praxiseinsatz jedoch zwingend erforderlich. Für einen Übertrag in die Praxis ist darüber hinaus eine Relaxierung der vereinfachenden disjunkten Definition des FRS und AS-Typs sowie eine individuelle Betrachtung automatisierter Ressourcen erforderlich. Das Referenzmodell erlaubt hierzu grundsätzliche Erweiterungen, die jedoch mit einem nicht unerheblichen Modellierungsaufwand sowie einem sprunghaften Anstieg der Problemkomplexität in der Kapazitätsplanung verbunden sein könnten. Als Alternative zur exakten Optimierung kann in diesem Fall auf die recheneffizientere Kapazitätsplanungsheuristik unter Hinnahme suboptimaler Planungslösungen zurückgegriffen werden.

Zusammenfassend gestattet die Anwendung des integrierten Referenzmodells in Kombination mit der ereignisdiskreten Ablaufsimulation eine differenzierte und realitätsnahe Abbildung der Demontageprozesse in hybriden Systemen. Die konsequente Abbildung in einem Simulationsmodell erlaubt integrierte Untersuchungen mit operativem, als auch mittel- bis langfristigem Horizont bei hoher Abbildungsgüte und Genauigkeit. Die durchgeführten Analysen vermitteln ein umfassendes, bislang nicht vorhandenes Systemverständnis für agile hybride Demontagesysteme sowie ungehobene Planungspotentiale in Demontagesystemen mit einer Quantifizierung des Entwicklungsbedarfs für flexible Demontageroboter. Gleichzeitig liefert die Arbeit neuartige industrietaugliche Organisationswerkzeuge zur Steigerung der Produktivität und die Entlastung des Menschen, sowohl für den Systembetrieb als auch für die strukturelle Adaption von Demontagesystemen.

Trotz weiterer Entwicklungspotentiale befähigt der vorliegende Lösungsansatz letztlich erstmals eine robuste und adaptive Organisation von agilen hybriden Demontagesystemen. Die Arbeit liefert somit einen entscheidenden Beitrag für die Etablierung einer kosteneffizienteren Gebrauchtzustanddemontage sowie, damit verbunden, für eine essenzielle Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Remanufacturing.

7.2 Ausblick

Der in dieser Arbeit präsentierte Lösungsansatz erweitert den aktuellen Stand der Forschung und Technik um wichtige Erkenntnisse, das Verständnis und geeignete Werkzeuge für die Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme sowie die Beherrschung der Unsicherheit im Umgang mit Gebrauchsgüterprodukten in der Demontage im Allgemeinen. Um die Reife agiler Demontagesysteme sowie der zugehörigen DPS-Verfahren, die Kompatibilität der Werkzeuge für existierende Demontagesysteme oder die Aussagekraft der Validierung zu steigern, ergibt sich eine Reihe weiterer, an diese Arbeit **anschließende Forschungsfragen**.

Weiterentwicklung der Planungs- und Steuerungsverfahren: Durch die Weiterentwicklung der DPS könnte eine weitere Verbesserung der Systemleistung ermöglicht werden. Wie im vorherigen Unterkapitel erwähnt, könnte durch eine lose, an die Planung gekoppelte, nicht mehr rein reaktive, sondern proaktive Steuerung **zusätzliches Leistungspotential** ausgeschöpft werden. Weiterhin könnte die Integration der Auftragsfreigabe in die Reparametrierung der Steuerung sowohl die Adaptivität des Systems als auch die Systemausbringung weiter erhöhen. Konkret könnte hier die periodische Anpassung des von der Conwip-Auftragsfreigabe geregelten maximalen Umlaufbestands und die Annäherung an den leistungsoptimalen Systembetriebspunkt eine weitere Leistungssteigerung im mehrperiodigen Betrieb ermöglichen.

Erweiterung des Handlungsrahmens: Um den Fokus dieser Arbeit nicht zu verlieren, wurden der Materialtransport und der Einfluss des Systemlayouts nur am Rande untersucht (vgl. Anhang A3) und im Hauptteil dieser Arbeit durch vereinfachende Annahmen eingeschränkt. Beide Handlungsfelder beinhalten jedoch wichtige, die Systemleistung beeinflussende Freiheitsgrade. In einem weiteren Schritt sollte folglich die Auflösung dieser Annahmen erfolgen, ein Verfahren für die Layoutplanung entwickelt und das Transportkonzept ausdetailliert werden. Nach Abschluss der Verfahrensentwicklung sollte dann eine erneute Untersuchung der integrierten Verfahrenslandschaft erfolgen.

Fokus auf weitere Zielgrößen: Neben der Systemeffizienz existieren im Remanufacturing, je nach Branche und Anwendungsfall, weitere hier nicht berücksichtigte Zielgrößen mit Implikationen für die DPS. Ein gängiges Problem ist z.B. die Knappheit von verfügbaren Gebrauchsgüterprodukten. Hier rückt die Produktregenerationsrate und die Vermeidung von Ausschuss in den Vordergrund. Ein weiteres Beispiel ist die Vermeidung von Werkerermüdung als Zielgröße, zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen im Remanufacturing.

Präzisierung der Validierungsdaten: Trotz systematischem Vorgehen basieren die Validierungsergebnisse in Unterkapitel 6.8 lediglich auf Schätzwerten. Um die Aussagekraft der Simulationsstudien zu erhöhen, könnte die Genauigkeit der Instanziierung durch eine auf die

DPN-Produktrepräsentation fokussierte Spezifikation der Demontageoperationen deutlich zunehmen. Für MS-Operationen wären hierfür umfängliche Zeitaufnahmen erforderlich. Dies trifft auch für FRS-Operationen zu. Ersatzweise wäre für diese jedoch auch eine Modellierung und Simulation mittels Physik-Engine für Roboter denkbar.

Steigerung des technologischen Reifegrads: Der fokussierte AHDS-Ansatz fokussiert und kombiniert aktuelle Technologietrends im Umfeld von Produktion und Kreislaufwirtschaft. Dabei hängt dieser direkt vom Reifegrad dieser Technologien ab. Deren Entwicklung ist außerhalb des Handlungsfelds der PPS zu verorten, dennoch fungieren diese Technologien als **notwendige Befähiger** für AHDS. Hierzu zählen unter anderem eine detaillierte Produktsortierung in Rückwärtslogistiknetzwerke als Voraussetzung für Qualitätsklassensysteme, die Weiterentwicklung flexibler Demontageroboter zur Steigerung ihrer Kosteneffizienz und Tracking-Systeme auf Shopfloorebene, insbesondere für manuell-geführte Demontageaufgaben.

Relaxierung von Modellannahmen: Bis zur Erreichung der industriellen Reife erfordern agile Demontagesysteme mit flexiblen Robotern noch weitere Entwicklungsarbeit. Von besonderer Relevanz ist somit letztlich auch der **Übertrag** der DPS-Konzepte auf **existierende industrielle Demontagesysteme**. Die Systemrepräsentation und die Definition der Stationstypen ist dazu aufzuweichen und auf weitere reale Anwendungsfälle anzupassen. Mischkonzepte für die hier als disjunkt definierten flexiblen Roboterstationen (FRS) und automatisierten Stationen (AS) sollten Berücksichtigung finden. Der Mensch als großer Unsicherheitsfaktor ist dabei differenzierter zu behandeln. In manuellen Systemen (MS) sind insbesondere die individuellen Werkerfähigkeiten genauer zu betrachten (vgl. Dvorak & Wurster et al. 2023).

8 Zusammenfassung

Der operative Betrieb und die Planung von Demontagesystemen sind von Unsicherheiten und manueller Arbeit geprägt. Die Wettbewerbsfähigkeit des Remanufacturings ist somit limitiert. Agile hybride Demontagesysteme überwinden die Herausforderungen aktueller Systeme durch die Integration flexibler technischer Demontageressourcen, einer modularen rekonfigurierbaren Struktur sowie einem auftragsindividuellen Materialfluss. Sie ermöglichen Produktivitätssteigerung sowie eine Entlastung des Menschen im Remanufacturing, bedürfen dafür jedoch geeigneter Verfahren für die Aufbau- und Ablauforganisation.

Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit der Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme. Zunächst wurde hierzu ein Referenzmodell für die Systemrepräsentation eingeführt, das auf dem Produkt-Prozess-Ressourcen-Framework aufbaut. Aus Produktsicht werden Demontage-Petri-Netze und Qualitätsklassensysteme, aus Ressourcensicht verschiedene Ressourcentypen mit variierenden Eigenschaften und Fähigkeitsräumen berücksichtigt. Aus der Zusammenführung der Produkt- und Ressourcensicht ergibt sich schließlich eine umfassende Operationssicht, welche sowohl die Abbildung der Komplexität im Demontagesystem ermöglicht, als auch die Grundlage für deren Beherrschung legt. Die Modellierung wird als ereignisdiskrete Ablaufsimulation realisiert, welche der Demontageplanung und -steuerung (DPS) als Interaktionsumgebung dient.

Die Arbeit unterteilt die Organisation des agilen Demontagesystems in zwei Handlungsfelder: Die reaktive Steuerung des Systembetriebs als rein operatives Handlungsfeld und die Planung der Systemadaption, d.h. die Veränderung von Art, Anzahl und Struktur der Systemressourcen, als operativ-taktisches Handlungsfeld. Für den dezentral organisierten Systembetrieb verhindert ein auf dem Conwip-Prinzip aufbauendes Auftragsfreigabeverfahren die Über- und Unterlastung des Systems. Eine logistische Kennlinienanalyse zeigt hier die klare Dominanz einer komponentenorientierten Auftragsfreigabe gegenüber einer auftragsorientierten Variante bei multikriterieller Betrachtung von Systemausbringung und Auftragsdurchlaufzeit. An zweiter Stelle wird die Steuerung ergänzt durch ein echtzeitfähiges Multi-Prioritätsregelverfahren zur Auftragsallokation im System. Im Rahmen der Erprobung zeigt sich der Mehrwert der Regelkombination in einer positiven Emergenz im System, mit einer um bis zu 8 % höheren Systemausbringung als die beste unikriterielle Prioritätsregel *Niedrigste Pufferauslastung* (NPA) und einer um fast 80 % höheren Systemausbringung als eine zufällige Auftragsallokation. Es zeigt sich eine Verschiebung der optimalen Regelgewichtung im Falle eines Concept Drifts. Metaheuristische Optimierungsverfahren wie Particle Swarm Optimization erweisen sich dabei als geeignete Werkzeuge zur Optimierung der Regelgewichtung.

Bedarfsweise ermöglicht der vorliegende Ansatz eine zeit- und bedarfsgesteuerte Systemadaption, basierend auf einer periodig-rollierenden Planung, zur Anpassung der Systemkapazität an volatile Produktionsprogramme und Stückzahlrends. Der Kern der Planung stellt dabei ein vorausschauendes exaktes Kapazitätsplanungsverfahren dar, welches auf einem gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodell basiert und die Ermittlung der kostenminimalen Systemkonfiguration im Idealbetrieb erlaubt. Des Weiteren steht eine Planungsheuristik als Benchmarkverfahren und recheneffiziente Alternative zur Verfügung, die bei geeigneter Parametrierung vergleichbar gute Lösungen liefert. Das exakte Verfahren generalisiert wiederum besser und reduziert effektiv Auslastungsverluste sowie Verzugskosten. Obwohl die Ablaufsteuerung im Regelfall einen gleichmäßigen Systembetrieb ermöglicht, kann es durch die Entkopplung von Planung und Steuerung, je nach Kostengefüge, zur Engpassbildung kommen. Durch die Begrenzung der Kapazität der scheiteranfälligen flexiblen Roboterstationen kann dies unterbunden werden. In einer integrierten mehrperiodigen Erprobung reduzieren sich die Gesamtkosten durch Conwip-Auftragsfreigabe und unikriterieller NPA-basierter Auftragsallokation auf weniger als ein Drittel im Vergleich zu einem unorganisierten Systembetrieb. Durch adaptive Parameteroptimierung des Allokationsverfahrens können weitere 9-10 % an Kosten eingespart und der Auftragsverzug fast vollständig neutralisiert werden.

In einer abschließenden Validierung anhand der Demontage eines Remanufacturing-Produkts beweist sich die generelle Kompatibilität des Lösungsansatzes für reale Anwendungsfälle. Im Rahmen von Simulationsstudien ergibt sich durch Systemadaption eine Kostenersparnis von knapp 50 % im Vergleich von zwei manuellen Systemen mit und ohne Kapazitätsabgleich. Die Berücksichtigung von Produktzuständen in der Planung birgt wiederum ein Einsparpotential von bis zu 6 % gegenüber einer nur produktbasierten Planung. Weiterhin zeigen die Simulationsergebnisse den hohen Entwicklungsbedarf für flexible Demontageroboter. Aufbauend auf der konservativen FRS-Parametrierung ist sowohl für die Ausführungsdauer als auch die Scheiterwahrscheinlichkeit eine Absenkung um ca. den Faktor 5 erforderlich.

Im Rahmen der Arbeit konnten die in Unterkapitel 3.6 aufgestellten Forschungsfragen zu Systemrepräsentation, -betrieb und -adaption agiler hybrider Demontagesysteme umfänglich beantwortet werden. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass trotz Unsicherheit durch geeignete Planungs- und Steuerungsmethoden eine Effizienzsteigerung in Demontagesystemen möglich ist. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich der Weiterentwicklung der Lösungsansätze, der Anpassung und dem Übertrag auf die Anforderungen realer Demontagesysteme sowie der prozesstechnischen Befähigung agiler hybrider Demontagesysteme und der zugehörigen Peripherie widmen.

Liste eigener Veröffentlichungen

- Behrendt, S.; Wurster, M.; May, M. C. & Lanza, G. (2023a), „Extended Production Planning of Reconfigurable Manufacturing Systems by Means of Simulation-based Optimization“. *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023-1*. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL) (Querétaro, Mexico, 28. Feb.–2. März 2023). Hrsg. von D. Herberger & M. Hübner. Hannover: publish-Ing. DOI: 10.15488/13440.
- Behrendt, S.; Wurster, M.; Strlijic, M.; Klein, J.-F.; May, M. C. & Lanza, G. (2023b), „Interoperable Architecture For Logical Reconfigurations Of Modular Production Systems“. *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023-2*. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL) (Stellenbosch, Südafrika, 14.–17. Nov. 2023). Hrsg. von D. Herberger & M. Hübner. Hannover: publish-Ing. DOI: 10.15488/15270.
- Dvorak, J.; Wurster, M.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „A Systematic Approach to Task Assignment and Production Planning in Disassembly with Employee Skills“, *Procedia CIRP* 120, S. 958–963. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.107.
- Kaiser, J.-P.; Becker, S. N.; Wurster, M.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Framework for simulation-based Trajectory Planning and Execution of Robots equipped with a Laser Scanner for Measurement and Inspection“, *Procedia CIRP* 103, S. 292–297. DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.047.
- Kaiser, J.-P.; Lang, S.; Wurster, M. & Lanza, G. (2022), „A Concept for Autonomous Quality Control for Core Inspection in Remanufacturing“, *Procedia CIRP* 105, S. 374–379. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.062.
- Klein, J.-F.; Wurster, M.; Stricker, N.; Lanza, G. & Furmans, K. (2021), „Towards Ontology-based Autonomous Intralogistics for Agile Remanufacturing Production Systems“. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Vasteras, Sweden, 7.–10. Sep. 2021). IEEE, S. 01–07. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613486.
- 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“, *Procedia CIRP* 105, S. 446–451. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.074.
- Lanza, G.; Asfour, T.; Beyerer, J.; Deml, B.; Fleischer, J.; Heizmann, M.; Furmans, K.; Hofmann, C.; Cebulla, A.; Dreher, C.; Kaiser, J.-P.; Klein, J.-F.; Leven, F.; Mangold, S.; Mitschke, N.; Stricker, N.; Pfrommer, J.; Wu, C.; Wurster, M. & Zaremski, M. (2022), „Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am

- Beispiel der Anlasser-Demontage“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 504–516. DOI: 10.1515/auto-2021-0158.
- May, M. C.; Overbeck, L.; Wurster, M.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2021), „Foresighted digital twin for situational agent selection in production control“, *Procedia CIRP* 99, S. 27–32. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.005.
- Pfrommer, J.; Klein, J.-F.; Wurster, M.; Rapp, S.; Grauberger, P.; Lanza, G.; Albers, A.; Matthiesen, S. & Beyerer, J. (2022), „An ontology for remanufacturing systems“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 534–541. DOI: 10.1515/auto-2021-0156.
- Sprenger, K.; Klein, J.-F.; Wurster, M.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Industrie 4.0 im Remanufacturing“, *Industrie 4.0 Management* 2021.4, S. 37–40. DOI: 10.30844/I40M_21-4_S37-40.
- Wurster, M.; Bail, F.; Behrendt, S. & Lanza, G. (2023), „Adaptive Multi-Priority Rule Approach To Control Agile Disassembly Systems In Remanufacturing“. *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023-2*. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL) (Stellenbosch, Südafrika, 14.–17. Nov. 2023). Hrsg. von D. Herberger & M. Hübner. Hannover : publish-Ing. DOI: 10.15488/15278.
- Wurster, M.; Exner, Y.; Kaiser, J.-P.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Towards planning and control in cognitive factories - A generic model including learning effects and knowledge transfer across system entities“, *Procedia CIRP* 103.5, S. 158–163. DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.025.
- Wurster, M.; Häfner, B.; Gauder, D.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Fluid Automation — A Definition and an Application in Remanufacturing Production Systems“, *Procedia CIRP* 97, S. 508–513. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.267.
- Wurster, M.; Kille, V.; Binding, M. & Lanza, G. (2023), „Vorgehensmodell für die Kreislaufführung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118.9, S. 599–604. DOI: 10.1515/zwf-2023-1117.
- Wurster, M.; Klein, J.-F.; Kaiser, J.-P.; Mangold, S.; Furmans, K.; Heizmann, M.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2022), „Integrierte Steuerungsarchitektur für ein agiles Demontagesystem mit autonomer Produktbefundung“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 542–556. DOI: 10.1515/auto-2021-0157.
- Wurster, M.; Michel, M.; May, M. C.; Kuhnle, A.; Stricker, N. & Lanza, G. (2022), „Modelling and condition-based control of a flexible and hybrid disassembly system with manual and autonomous workstations using reinforcement learning“, *Journal of Intelligent Manufacturing* 33.2, S. 575–591. DOI: 10.1007/s10845-021-01863-3.

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_Bail 2023

Bail, F. (2023), „Simulationsbasierte Optimierung einer adaptiven Produktionssteuerung in einem Matrix- Produktionssystem unter der Verwendung von Metaheuristiken“. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Feuerstein 2023

Feuerstein, T. (2023), „Adaptive Kapazitätsplanung für rekonfigurierbare Matrix-Produktionssysteme im Remanufacturing“. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Hirsch 2024

Hirsch, T. (2024), „Entwicklung von Verfahren für das Transportmanagement in Demontagesystemen“. Seminararbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Mak 2022

Mak, L. (2022), „Entwicklung eines Planungstools zur Kapazitätsplanung für agile Demontagesysteme im Remanufacturing“. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Michel 2020

Michel, M. (2020), „Simulation und Steuerung von Matrix-Produktionssystemen im Remanufacturing mit Deep Reinforcement Learning“. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Müller 2022

Müller, T. (2022), „Heuristische Materialflusssteuerung für ein agiles Matrix-Produktionssystem im Remanufacturing“. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Sprenger 2024

Sprenger, K. (2024), „Simulationsbasierte Analyse hybrider, rekonfigurierbarer Produktionssysteme für das Remanufacturing von Generatoren“. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

Acker 2011

Acker, I. J. (2011), *Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie*.

- Produktion und Logistik. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. DOI: 10.1007/978-3-8349-6731-2.
- Altekin & Akkan 2012
Altekin, F. T. & Akkan, C. (2012), „Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines“, *International Journal of Production Research* 50.18, S. 4955–4976. DOI: 10.1080/00207543.2011.616915.
- Altekin & Bayındır et al. 2016
Altekin, F. T.; Bayındır, Z. P. & Gümüşkaya, V. (2016), „Remedial actions for disassembly lines with stochastic task times“, *Computers & Industrial Engineering* 99.6, S. 78–96. DOI: 10.1016/j.cie.2016.06.027.
- Andersen & Brunoe et al. 2022
Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D.; Bockholt, M. T.; Napoleone, A.; Hemdrup Kristensen, J.; Colli, M.; Vejrum Wæhrens, B. & Nielsen, K. (2022), „Changeable closed-loop manufacturing systems: challenges in product take-back and evaluation of reconfigurable solutions“, *International Journal of Production Research* 29.4, S. 1–20. DOI: 10.1080/00207543.2021.2017504.
- Andreu 1995
Andreu, J.-J. (1995), „The remanufacturing process“. Internes Paper. Manchester, Vereinigtes Königreich: Manchester Metropolitan University.
- Andrew-Munot & Ibrahim 2013
Andrew-Munot, M. & Ibrahim, R. N. (2013), „Remanufacturing Process and Its Challenges“, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 4, S. 488–495. DOI: 10.15282/jmes.4.2013.13.0046.
- 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.
- Bartel 2015
Bartel, P. (2015), *Aktuelle Herausforderungen und Strategien des Remanufacturing von Automobilteilen: Vom Jetzt in die Zukunft*. URL: http://www.ressourceneffizienzkongress.de/sites/default/files/2016-07/151007_ressourcen_forum_4.pdf (besucht am 17.05.2023).
- Belhadj & Aicha et al. 2022
Belhadj, I.; Aicha, M. & Aifaoui, N. (2022), „Product disassembly planning and task allocation based on human and robot collaboration“, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 16.2, S. 803–819. DOI: 10.1007/s12008-022-00908-y.
- Bentaha & Battaïa et al. 2014
Bentaha, M. L.; Battaïa, O.; Dolgui, A. & Hu, S. J. (2014), „Dealing with uncertainty in

disassembly line design“, *CIRP Annals* 63.1, S. 21–24. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.004.

Bentaha & Voisin et al. 2019

Bentaha, M.-L.; Voisin, A. & Marangé, P. (2019), „Disassembly Process Planning Under End-of-Life Product Quality“. *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*. Hrsg. von C. Fortin. Bd. 565. IFIP Advances in Information and Communication Technology Ser. Cham: Springer International Publishing AG, S. 325–335. DOI: 10.1007/978-3-030-42250-9_31.

Bentaha & Marangé et al. 2023

Bentaha, M.-L.; Marangé, P.; Voisin, A. & Moalla, N. (2023), „End-of-Life product quality management for efficient design of disassembly lines under uncertainty“, *International Journal of Production Research* 61.4, S. 1146–1167. DOI: 10.1080/00207543.2022.2028199.

Bentaha & Voisin et al. 2020

Bentaha, M.-L.; Voisin, A. & Marangé, P. (2020), „A decision tool for disassembly process planning under end-of-life product quality“, *International Journal of Production Economics* 219.6, S. 386–401. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.07.015.

Bentaha & Voisin et al. 2016

Bentaha, M.-L.; Voisin, A.; Marangé, P.; Battaïa, O. & Dolgui, A. (2016), „Prise en compte de l'état des produits pour la planification de leur désassemblage“, *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 49.4-5, S. 579–605. DOI: 10.3166/jesa.49.579-605.

Beumelburg 2005

Beumelburg, K. (2005), *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*. Bd. 413. IPA-IAO Forschung und Praxis. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2005. Heimsheim: Jost-Jetter. ISBN: 393694752X.

Boctor 1990

Boctor, F. F. (1990), „Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling“, *European Journal of Operational Research* 49.1, S. 3–13. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90116-S.

Breithaupt 2001

Breithaupt, J.-W. (2001), *Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen: Grundlagen und Anwendung*. Als Ms. gedr. Bd. 571. IFA, Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2000. Düsseldorf: VDI Verlag. ISBN: 3183571021.

Briskorn & Hartmann 2021

Briskorn, D. & Hartmann, S. (2021), „Anwendungen des Resource-Constrained Project Scheduling Problem in der Produktionsplanung“. *Produktionsplanung Und -Steuerung*.

- Hrsg. von T. Claus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, S. 133–157. DOI: 10.1007/978-3-662-64291-7_8.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Hrsg. (2024), *BDEW-Strompreisanalyse Februar 2024: Haushalte und Industrie (korrigierte Fassung vom 23.02.2024)*. URL: https://www.bdew.de/media/documents/240223_BDEW-Strompreisanalyse_Februar_KORR_23.02.2024.pdf (besucht am 26.06.2024).
- Casper & Sundin 2021
Casper, R. & Sundin, E. (2021), „Electrification in the automotive industry: effects in remanufacturing“, *2210-464X* 11.2, S. 121–136. DOI: 10.1007/s13243-020-00094-8.
- Charnley & Tiwari et al. 2019
Charnley, F.; Tiwari, D.; Hutabarat, W.; Moreno, M.; Okorie, O. & Tiwari, A. (2019), „Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy“, *Sustainability* 11.12, S. 3379. DOI: 10.3390/su11123379.
- Ciupek 2006
Ciupek, M. (2006), *Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte*. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Zugl.: Berlin, Univ., Diss, 2006. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. ISBN: 3816771122.
- Colledani & Battaia 2016
Colledani, M. & Battaia, O. (2016), „A decision support system to manage the quality of End-of-Life products in disassembly systems“, *CIRP Annals* 65.1, S. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.121.
- Deniz & Ozcelik 2019
Deniz, N. & Ozcelik, F. (2019), „An extended review on disassembly line balancing with bibliometric & social network and future study realization analysis“, *Journal of Cleaner Production* 225.6, S. 697–715. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.188.
- DIN 8580 2022
DIN 8580 (2022), *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. 8580:2022-12. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag. DOI: 10.31030/3217872.
- DIN 8591 2003
DIN 8591 (2003), *Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 8591:2003-09. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag. DOI: 10.31030/9500681.
- DIN SPEC 91472 2023
DIN SPEC 91472 (2023), *Remanufacturing (Reman) - Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin: Beuth Verlag. DOI: 10.31030/3434252.

Dobbs & Oppenheim et al. 2011

Dobbs, R.; Oppenheim, J.; Thompson, F.; Brinkman, M. & Zornes, M. (2011), *Resource Revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*. Hrsg. von McKinsey Global Institute. URL: https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/resource%20revolution/mgi_resource_revolution_full_report.pdf (besucht am 26.06.2024).

Domschke & Drexl et al. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. & Scholl, A. (2015), *Einführung in Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-48216-2.

Duflou & Seliger et al. 2008

Duflou, J. R.; Seliger, G.; Kara, S.; Umeda, Y.; Ometto, A. & Willems, B. (2008), „Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study“, *CIRP Annals* 57.2, S. 583–600. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.009.

Duta & Henrioud et al. 2007

Duta, L.; Henrioud, J. M. & Caciula, I. (2007), „A real time solution to control disassembly processes“, *IFAC Proceedings Volumes* 40.18, S. 789–794. DOI: 10.3182/20070927-4-R0-3905.00130.

Dvorak & Wurster et al. 2023

Dvorak, J.; Wurster, M.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „A Systematic Approach to Task Assignment and Production Planning in Disassembly with Employee Skills“, *Procedia CIRP* 120, S. 958–963. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.107.

Eberhart & Shi 2001

Eberhart, R. C. & Shi, Y. (2001), „Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms“. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. 2001 Congress on Evolutionary Computation (Seoul, Korea (South), 27.–30. Mai 2001). Piscataway, NJ: IEEE, S. 94–100. DOI: 10.1109/CEC.2001.934376.

Eguia & Lozano et al. 2011

Eguia, I.; Lozano, S.; Racero, J. & Guerrero, F. (2011), „A methodological approach for designing and sequencing product families in Reconfigurable Disassembly Systems“, *Journal of Industrial Engineering and Management* 4.3, S. 418–435. DOI: 10.3926/jiem.v4n3.p418-435.

Eickemeyer & Herde et al. 2014

Eickemeyer, S. C.; Herde, F.; Irudayaraj, P. & Nyhuis, P. (2014), „Decision models for capacity planning in a regeneration environment“, *International Journal of Production Research* 52.23, S. 7007–7026. DOI: 10.1080/00207543.2014.923122.

Ellen MacArthur Foundation 2015

Ellen MacArthur Foundation (2015), *Towards a circular economy: Business rationale for*

- an accelerated transition*. Hrsg. von Ellen MacArthur Foundation. Cowes, England. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> (besucht am 26.06.2024).
- Ellen MacArthur Foundation 2019
- Ellen MacArthur Foundation (2019), *Artificial Intelligence and the circular economy - AI as a tool to accelerate the transition*. Hrsg. von Ellen MacArthur Foundation. Cowes, England. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/artificial-intelligence-and-the-circular-economy> (besucht am 26.06.2024).
- ElSayed & Kongar et al. 2012
- ElSayed, A.; Kongar, E.; Gupta, S. M. & Sobh, T. (2012), „A Robotic-Driven Disassembly Sequence Generator for End-Of-Life Electronic Products“, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 68.1, S. 43–52. DOI: 10.1007/s10846-012-9667-8.
- Errington & Childe 2013
- Errington, M. & Childe, S. J. (2013), „A business process model of inspection in remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing* 3.1. Artikel 7. DOI: 10.1186/2210-4690-3-7.
- Fang & Liu et al. 2019
- Fang, Y.; Liu, Q.; Li, M.; Laili, Y. & Pham, D. T. (2019), „Evolutionary many-objective optimization for mixed-model disassembly line balancing with multi-robotic workstations“, *European Journal of Operational Research* 276.1, S. 160–174. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.12.035.
- Fang & Ming et al. 2020
- Fang, Y.; Ming, H.; Li, M.; Liu, Q. & Pham, D. T. (2020), „Multi-objective evolutionary simulated annealing optimisation for mixed-model multi-robotic disassembly line balancing with interval processing time“, *International Journal of Production Research* 58.3, S. 846–862. DOI: 10.1080/00207543.2019.1602290.
- Fechter 2022
- Fechter, M. (2022), *Entwicklung einer automatisierten Methode zur Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze*. Bd. 132. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, 2021. Stuttgart: Fraunhofer Verlag Mediendiensteleistungen. DOI: 10.18419/OPUS-12099.
- Fechter & Dietz et al. 2019
- Fechter, M.; Dietz, T. & Bauernhansl, T. (2019), „Cost calculation model for reconfigurable, hybrid assembly systems“. *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (Vancouver, Canada, 22.–26. Aug. 2019)*. Hrsg. von S. Reveliotis & D. Cappelleri. Piscataway, NJ: IEEE, S. 836–841. DOI: 10.1109/COASE.2019.8842848.
- Ferguson & Guide et al. 2009
- Ferguson, M.; Guide, V. D. R.; Koca, E. & Souza, G. C. (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.
- Foo & Kara et al. 2021
- Foo, G.; Kara, S. & Pagnucco, M. (2021), „An Ontology-Based Method for Semi-Automatic Disassembly of LCD Monitors and Unexpected Product Types“, *International Journal of Automation Technology* 15.2, S. 168–181. DOI: 10.20965/ijat.2021.p0168.
- Foo & Kara et al. 2022
- Foo, G.; Kara, S. & Pagnucco, M. (2022), „Artificial Learning for Part Identification in Robotic Disassembly Through Automatic Rule Generation in an Ontology“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 20.1, S. 296–309. DOI: 10.1109/TASE.2022.3149242.
- Franke & Basdere et al. 2006
- Franke, C.; Basdere, B.; Ciupek, M. & Seliger, S. (2006), „Remanufacturing of mobile phones—capacity, program and facility adaptation planning“, *Omega* 34.6, S. 562–570. DOI: 10.1016/j.omega.2005.01.016.
- Gagnon & Morgan 2014
- Gagnon, R. J. & Morgan, S. D. (2014), „Remanufacturing scheduling systems: an exploratory analysis comparing academic research and industry practice“, *International Journal of Rapid Manufacturing* 4.2/3/4, S. 179. DOI: 10.1504/IJRAPIDM.2014.066030.
- Gallina & Gal et al. 2023
- Gallina, V.; Gal, B.; Szaller, Á.; Bachlechner, D.; Ilie-Zudor, E. & Sihn, W. (2023), „Reducing Remanufacturing Uncertainties with the Digital Product Passport“. *Manufacturing Driving Circular Economy*. Hrsg. von H. Kohl; G. Seliger & F. Dietrich. Bd. 14. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 60–67. DOI: 10.1007/978-3-031-28839-5_7.
- Geiger & Zussmann et al. 1996
- Geiger, D.; Zussmann, E. & Lenz, E. (1996), „Probabilistic Reactive Disassembly Planning“, *CIRP Annals* 45.1, S. 49–52. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63015-7.
- Georgiadis & Athanasiou 2013
- Georgiadis, P. & Athanasiou, E. (2013), „Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing“, *European Journal of Operational Research* 225.1, S. 44–58. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.09.021.
- Goli & Wang et al. 2022
- Goli, F.; Wang, Y. & Saadat, M. (2022), „Perspective of self-learning robotics for disassembly automation“. *2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (Bristol, United Kingdom, 1.–3. Sep. 2022). Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICAC55051.2022.9911085.

Göppert & Schukat et al. 2021

Göppert, A.; Schukat, E.; Burggräf, P. & Schmitt, R. H. (2021), „Agile Hybrid Assembly Systems: Bridging the Gap Between Line and Matrix Configurations“. *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*. Hrsg. von P. Weißgraeber; F. Heieck & C. Ackermann. ARENA2036. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–11. DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8_1.

Greschke 2016

Greschke, P. (2016), *Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss, 2015. Essen: Vulkan Verlag. ISBN: 3802783441.

Greschke 2020

Greschke, P. (2020), *Matrix-Produktion: Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*. Norderstedt: Books on Demand. ISBN: 9783752638028.

Groß & Gerke et al. 2020

Groß, S.; Gerke, W. & Plapper, P. (2020), „Agent-based, hybrid control architecture for optimized and flexible production scheduling and control in remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing* 14.1, S. 17–43. DOI: 10.1007/s13243-020-00081-z.

Grundig 2018

Grundig, C.-G. (2018), *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 6., neu bearbeitete Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser. DOI: 10.3139/9783446454019.

Guide 2000

Guide, V. D. 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.

Guide & Jayaraman et al. 1999

Guide, V. D. R.; Jayaraman, V. & Srivastava, R. (1999), „Production planning and control for remanufacturing: a state-of-the-art survey“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15.3, S. 221–230. DOI: 10.1016/S0736-5845(99)00020-4.

Guide & Souza et al. 2005

Guide, V. D. R.; Souza, G. C. & van der Laan, E. (2005), „Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly“, *European Journal of Operational Research* 164.2, S. 341–353. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.12.015.

Guide & Spencer 1997

Guide, V. D. R. & Spencer, M. S. (1997), „Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms“, *Production Planning & Control* 8.3, S. 237–244. DOI: 10.1080/095372897235299.

Guide & Srivastava et al. 1997

Guide, V. D. R.; Srivastava, R. & Spencer, M. S. (1997), „An evaluation of capacity planning techniques in a remanufacturing environment“, *International Journal of Production Research* 35.1, S. 67–82. DOI: 10.1080/002075497195984.

Gungor & Gupta 2001a

Gungor, A. & Gupta, S. M. (2001a), „A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures“, *International Journal of Production Research* 39.7, S. 1427–1467. DOI: 10.1080/00207540110052157.

Gungor & Gupta 2001b

Gungor, A. & Gupta, S. M. (2001b), „Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm“, *International Journal of Production Research* 39.3, S. 481–509. DOI: 10.1080/00207540010002838.

Guo & Liu et al. 2016

Guo, X.; Liu, S.; Zhou, M. & Tian, G. (2016), „Disassembly Sequence Optimization for Large-Scale Products With Multiresource Constraints Using Scatter Search and Petri Nets“, *IEEE Transactions on Cybernetics* 46.11, S. 2435–2446. DOI: 10.1109/TCYB.2015.2478486.

Guo & Zhou et al. 2021

Guo, X.; Zhou, M.; Abusorrah, A.; Alsokhiry, F. & Sedraoui, K. (2021), „Disassembly Sequence Planning: A Survey“, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 8.7, S. 1308–1324. DOI: 10.1109/JAS.2020.1003515.

Gutjahr 2010

Gutjahr, W. J. (2010), „Stochastic Search in Metaheuristics“. *Handbook of Metaheuristics*. Hrsg. von M. Gendreau & J.-Y. Potvin. Bd. 146. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US, S. 573–597. DOI: 10.1007/978-1-4419-1665-5_19.

Hackstein 1989

Hackstein, R. (1989), *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. 2., überarbeitete Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 3184009246.

Hartel 1997

Hartel, M. (1997), „Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten: Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung des Lebenszyklus in der Produktentwicklung“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH).

Hartel & Lotter 2012

Hartel, M. & Lotter, B. (2012), „Planung und Bewertung von Montagesystemen“. *Montage in der Industriellen Produktion*. Hrsg. von B. Lotter. VDI-Buch Ser. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, S. 365–388. DOI: 10.1007/978-3-642-29061-9_13.

Hentschel 1996

Hentschel, C. (1996), *Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen*. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1996. Berlin: UNZE Verlagsgesellschaft. ISBN: 381674513X.

Hjorth & Chrysostomou 2022

Hjorth, S. & Chrysostomou, D. (2022), „Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 73. Artikel 102208. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102208.

Homem de Mello & Sanderson 1990

Homem de Mello, L. S. & Sanderson, A. C. (1990), „AND/OR graph representation of assembly plans“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 6.2, S. 188–199. DOI: 10.1109/70.54734.

Hrdina & Zülch 2017

Hrdina, J. & Zülch, G. (2017), „Simulationsunterstützte Entwicklung von Methoden zur reaktiven Steuerung von Demontagelinien“. *Simulation in Produktion und Logistik 2017* (Kassel, 20.–22. Sep. 2017). Hrsg. von S. Wenzel & T. Peter. Kassel: Kassel University Press, S. 325–334. ISBN: 9783737601931.

Huang & Huang 2002

Huang, Y. M. & Huang, C.-T. (2002), „Disassembly matrix for disassembly processes of products“, *International Journal of Production Research* 40.2, S. 255–273. DOI: 10.1080/00207540110079770.

Huber 2001

Huber, A. (2001), *Demontageplanung und -steuerung: Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen*. Magdeburger Schriften zur Wirtschaftsinformatik. Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2001 u.d.T.: Huber, Alexander: Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen. Aachen: Shaker. ISBN: 3826593413.

Ilgin & Gupta 2010

Ilgin, 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.

Inderfurth & Langella 2006

Inderfurth, K. & Langella, I. M. (2006), „Heuristics for solving disassemble-to-order problems with stochastic yields“, *OR Spectrum* 28.1, S. 73–99. DOI: 10.1007/s00291-005-0007-2.

Jovane & Alting et al. 1993

Jovane, F.; Alting, L.; Armillotta, A.; Eversheim, W.; Feldmann, K.; Seliger, G. & Roth, N. (1993), „A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly“, *CIRP Annals* 42.2, S. 651–658. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62530-X.

Kaiser & Lang et al. 2022

Kaiser, J.-P.; Lang, S.; Wurster, M. & Lanza, G. (2022), „A Concept for Autonomous Quality Control for Core Inspection in Remanufacturing“, *Procedia CIRP* 105, S. 374–379. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.062.

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.

Karaboga 2005

Karaboga, D. (2005), *An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization*. Hrsg. von Erciyes University, Engineering Faculty. Technical report TR06. Kayseri, Turkey.

Karaboga & Akay 2009

Karaboga, D. & Akay, B. (2009), „A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm“, *Applied Mathematics and Computation* 214.1, S. 108–132. DOI: 10.1016/j.amc.2009.03.090.

Kellner & Lienland et al. 2022

Kellner, F.; Lienland, B. & Lukesch, M. (2022), *Produktionswirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-65803-1.

Kennedy & Eberhart 1995

Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995), „Particle Swarm Optimization“. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. International Conference on Neural Networks 1995 (Perth, WA, Australia, 27. Nov.–1. Dez. 1995). Piscataway, NJ: IEEE, S. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

Kerin & Pham et al. 2022

Kerin, M.; Pham, D. T.; Huang, J. & Hadall, J. (2022), „A generic asset model for implementing product digital twins in smart remanufacturing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 124, S. 3021–3038. DOI: 10.1007/s00170-022-09295-w.

Kettner & Schmidt et al. 2010

Kettner, H.; Schmidt, J. & Greim, H.-R. (2010), *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung: Mit zahlreichen Checklisten*. Unveränd. Nachdr. der Ausg. 1984. München: Hanser. ISBN: 9783446138254.

Khan & Mineo et al. 2021

Khan, A.; Mineo, C.; Dobie, G.; Macleod, C. & Pierce, G. (2021), „Vision guided robotic inspection for parts in manufacturing and remanufacturing industry“, *Journal of Remanufacturing* 11.1, S. 49–70. DOI: 10.1007/s13243-020-00091-x.

Kim & Ciupek et al. 2006

Kim, H.-J.; Ciupek, M.; Buchholz, A. & Seliger, G. (2006), „Adaptive disassembly sequence

- control by using product and system information“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22.3, S. 267–278. DOI: 10.1016/j.rcim.2005.06.003.
- Kim & Harms et al. 2007
- Kim, H.-J.; Harms, R. & Seliger, G. (2007), „Automatic Control Sequence Generation for a Hybrid Disassembly System“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4.2, S. 194–205. DOI: 10.1109/TASE.2006.880538.
- Kim & Jeong et al. 2005
- Kim, K.; Jeong, B. & Jeong, S.-J. (2005), „Optimization Model for Remanufacturing System at Strategic and Operational Level“. *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2005* (Singapore, 9.–12. Mai 2005). Hrsg. von D. Hutchison. Bd. 3483. Lecture Notes in Computer Science. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 566–576. DOI: 10.1007/11424925_60.
- Kin & Ong et al. 2014
- Kin, S. T. M.; Ong, S. K. & Nee, A. (2014), „Remanufacturing Process Planning“, *Procedia CIRP* 15.6, S. 189–194. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.087.
- King & Burgess et al. 2006
- King, A. M.; Burgess, S. C.; Ijomah, W. & McMahon, C. A. (2006), „Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?“, *Sustainable Development* 14.4, S. 257–267. DOI: 10.1002/sd.271.
- Kirkpatrick & Gelatt et al. 1983
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D. & Vecchi, M. P. (1983), „Optimization by simulated annealing“, *Science* 220.4598, S. 671–680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.
- Klenk 2023
- Klenk, F. (2023), *Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing*. Bd. 272. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023. Düren: Shaker Verlag. DOI: 10.5445/IR/1000162398.
- Kluge 2011
- Kluge, S. (2011), *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme*. Dissertation, Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter. ISBN: 9783939890812.
- Knoth & Brandstotter et al. 2002
- Knoth, R.; Brandstotter, M.; Kopacek, B. & Kopacek, P. (2002), „Automated disassembly of electr(on)ic equipment“. *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronic and the Environment*. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (San Francisco, CA, USA, 6.–9. Juni 2002). Piscataway, NJ: IEEE, S. 290–294. DOI: 10.1109/ISEE.2002.1003282.

Kolisch & Hartmann 1999

Kolisch, R. & Hartmann, S. (1999), „Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis“. *Project Scheduling*. Hrsg. von J. Węglarz. Bd. 14. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer, S. 147–178. DOI: 10.1007/978-1-4615-5533-9_7.

Kopacek & Kopacek 2006

Kopacek, P. & Kopacek, B. (2006), „Intelligent, flexible disassembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30.5-6, S. 554–560. DOI: 10.1007/s00170-005-0042-9.

Kuhnle 2020

Kuhnle, A. (2020), *Adaptive order dispatching based on reinforcement learning: Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry*. Bd. 241. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2020. Düren: Shaker Verlag. DOI: 10.5445/IR/1000162398.

Kurilova-Palisaitiene & Sundin 2014

Kurilova-Palisaitiene, J. & Sundin, E. (2014), „Challenges and Opportunities of Lean Remanufacturing“, *International Journal of Automation Technology* 8.5, S. 644–652. DOI: 10.20965/ijat.2014.p0644.

Laili & Li et al. 2021

Laili, Y.; Li, X.; Wang, Y.; Ren, L. & Wang, X. (2021), „Robotic Disassembly Sequence Planning With Backup Actions“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 19.3, S. 2095–2107. DOI: 10.1109/TASE.2021.3072663.

Laili & Li et al. 2020

Laili, Y.; Li, Y.; Fang, Y.; Pham, D. T. & Zhang, L. (2020), „Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing“, *Journal of Manufacturing Systems* 56.3, S. 484–500. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.015.

Laili & Wang et al. 2022

Laili, Y.; Wang, Y.; Fang, Y. & Pham, D. T. (2022), *Optimisation of Robotic Disassembly for Remanufacturing*. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-81799-2.

Lang 2023

Lang, S. (2023), *Methoden des bestärkenden Lernens für die Produktionsablaufplanung*. Dissertation, Universität Magdeburg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-41751-2.

Lange 2017

Lange, U. (2017), *Ressourceneffizienz durch Remanufacturing: Industrielle Aufarbeitung*

von *Altteilen*. Hrsg. von VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Berlin. URL: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_18_Remufacturing_bf.pdf (besucht am 26.06.2024).

Lanza & Asfour et al. 2022

Lanza, G.; Asfour, T.; Beyerer, J.; Deml, B.; Fleischer, J.; Heizmann, M.; Furmans, K.; Hofmann, C.; Cebulla, A.; Dreher, C.; Kaiser, J.-P.; Klein, J.-F.; Leven, F.; Mangold, S.; Mitschke, N.; Stricker, N.; Pfrommer, J.; Wu, C.; Wurster, M. & Zaremski, M. (2022), „Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am Beispiel der Anlasser-Demontage“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 504–516. DOI: 10.1515/auto-2021-0158.

Lee & Doh et al. 2015

Lee, C.-W.; Doh, H.-H. & Lee, D.-H. (2015), „Capacity and production planning for a hybrid system with manufacturing and remanufacturing facilities“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 229.9, S. 1645–1653. DOI: 10.1177/0954405414539485.

Lee & Kang et al. 2001

Lee, D.-H.; Kang, J.-G. & Xirouchakis, P. (2001), „Disassembly planning and scheduling: Review and further research“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 215.5, S. 695–709. DOI: 10.1243/09544050111518629.

Lee & Behdad et al. 2022

Lee, M.-L.; Behdad, S.; Liang, X. & Zheng, M. (2022), „Task allocation and planning for product disassembly with human–robot collaboration“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 76. Artikel 102306. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102306.

Levesque & Lakemeyer 2008

Levesque, H. & Lakemeyer, G. (2008), „Chapter 23 Cognitive Robotics“. *Handbook of Knowledge Representation*. Bd. 3. Foundations of Artificial Intelligence. Amsterdam, Niederlande: Elsevier, S. 869–886. DOI: 10.1016/S1574-6526(07)03023-4.

Li & Khoo et al. 2005

Li, J. R.; Khoo, L. P. & Tor, S. B. (2005), „An object-oriented intelligent disassembly sequence planner for maintenance“, *Computers in Industry* 56.7, S. 699–718. DOI: 10.1016/j.compind.2005.03.005.

Li & Liu et al. 2019

Li, K.; Liu, Q.; Xu, W.; Liu, J.; Zhou, Z. & Feng, H. (2019), „Sequence Planning Considering Human Fatigue for Human-Robot Collaboration in Disassembly“, *Procedia CIRP* 83.5, S. 95–104. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.127.

Liu & Zhou et al. 2018

Liu, J.; Zhou, Z.; Pham, D. T.; Xu, W.; Yan, J.; Liu, A.; Ji, C. & Liu, Q. (2018), „An improved multi-objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97.9-12, S. 3937–3962. DOI: 10.1007/s00170-018-2183-7.

Liu & Liu et al. 2019

Liu, Q.; Liu, Z.; Xu, W.; Tang, Q.; Zhou, Z. & Pham, D. T. (2019), „Human-robot collaboration in disassembly for sustainable manufacturing“, *International Journal of Production Research* 57.12, S. 4027–4044. DOI: 10.1080/00207543.2019.1578906.

Liu & Zhang et al. 2013

Liu, W.; Zhang, B.; Li, M. Z.; Li, Y. & Zhang, H.-C. (2013), „Study on Remanufacturing Cleaning Technology in Mechanical Equipment Remanufacturing Process“. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Hrsg. von A. Y. C. Nee; B. Song & S.-K. Ong. Singapore: Springer, S. 643–648. DOI: 10.1007/978-981-4451-48-2_105.

Lödding 2016

Lödding, H. (2016), *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-48459-3.

Matsumoto & Chinen et al. 2017a

Matsumoto, M.; Chinen, K. & Endo, H. (2017a), „Comparison of U.S. and Japanese Consumers' Perceptions of Remanufactured Auto Parts“, *Journal of Industrial Ecology* 21.4, S. 966–979. DOI: 10.1111/jiec.12478.

Matsumoto & Chinen et al. 2017b

Matsumoto, M.; Chinen, K. & Endo, H. (2017b), „Comparison of U.S. and Japanese Consumers' Perceptions of Remanufactured Auto Parts“, *Journal of Industrial Ecology* 21.4, S. 966–979. DOI: 10.1111/jiec.12478.

Matsumoto & Ijomah 2013

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

Moore & Gungor et al. 1998

Moore, K. E.; Gungor, A. & Gupta, S. M. (1998), „A Petri net approach to disassembly process planning“, *Computers & Industrial Engineering* 35.1-2, S. 165–168. DOI: 10.1016/S0360-8352(98)00051-5.

Müller 2013

Müller, D. (2013), *Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-36057-2.

Neidhardt 2007

Neidhardt, U. (2007), *Einsatz von Prioritätsregeln zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen*. Schriftenreihe des Institutes für Produktionswirtschaft der Universität Rostock Betriebswirtschaft. Zugl.: Rostock, Univ., Diss., 2007. Aachen: Shaker. ISBN: 9783832264987.

Nikolaev & Jacobson 2010

Nikolaev, A. G. & Jacobson, S. H. (2010), „Simulated Annealing“. *Handbook of Metaheuristics*. Hrsg. von M. Gendreau & J.-Y. Potvin. Bd. 146. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US, S. 1–39. DOI: 10.1007/978-1-4419-1665-5_1.

Nwankpa & Eze et al. 2021

Nwankpa, C.; Eze, S.; Ijomah, W.; Gachagan, A. & Marshall, S. (2021), „Achieving remanufacturing inspection using deep learning“, *Journal of Remanufacturing* 11, S. 89–105. DOI: 10.1007/s13243-020-00093-9.

Nwankpa & Ijomah et al. 2021

Nwankpa, C. E.; Ijomah, W. & Gachagan, A. (2021), „Design for automated inspection in remanufacturing: A discrete event simulation for process improvement“, *Cleaner Engineering and Technology* 4. Artikel 100199. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100199.

Nyhuis & Wiendahl 2012

Nyhuis, P. & Wiendahl, H.-P. (2012), *Logistische Kennlinien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-92839-3.

O’Shea & Grewal et al. 1998

O’Shea, B.; Grewal, S. S. & Kaebernick, H. (1998), „State of the Art Literature Survey on Disassembly Planning“, *Concurrent Engineering* 6.4, S. 345–357. DOI: 10.1177/1063293x9800600407.

Ong & Chang et al. 2021

Ong, S. K.; Chang, M. M. L. & Nee, A. Y. C. (2021), „Product disassembly sequence planning: state-of-the-art, challenges, opportunities and future directions“, *International Journal of Production Research* 59.11, S. 3493–3508. DOI: 10.1080/00207543.2020.1868598.

Östlin 2008

Östlin, J. (2008), *On remanufacturing systems: Analysing and managing material flows and remanufacturing processes*. Bd. 1192. Linköping studies in science and technology. Thesis. Linköping: Department of Management and Engineering, Linköpings universitet. ISBN: 9789173938778.

Parker & Riley et al. 2015

Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, J.; Ramkumar, S. & Peck, D. (2015), *Remanufacturing Market Study*. Hrsg. von D. Parker & European

Remanufacturing Network. URL: <https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf> (besucht am 26.06.2024).

Parsa & Saadat 2021

Parsa, S. & Saadat, M. (2021), „Human-robot collaboration disassembly planning for end-of-life product disassembly process“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 71.12. Artikel 102170. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102170.

Paschko & Knorn et al. 2023

Paschko, F.; Knorn, S.; Krini, A. & Kemke, M. (2023), „Material flow control in Remanufacturing Systems with random failures and variable processing times“, *Journal of Remanufacturing* 13.2, S. 161–185. DOI: 10.1007/s13243-023-00126-z.

Paul & Thevenin et al. 2021

Paul, M.; Thevenin, S.; Schulz, J.; Brahimi, N.; Benderbal, H. H. & Dolgui, A. (2021), „Advancing Circular Economy: Research Roadmap for Circular Integrated Production Systems“. *Smart and Sustainable Collaborative Networks 4.0*. Hrsg. von L. M. Camarinha-Matos; X. Boucher & H. Afsarmanesh. Bd. 629. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, S. 789–796. DOI: 10.1007/978-3-030-85969-5_75.

Pfrommer & Klein et al. 2022

Pfrommer, J.; Klein, J.-F.; Wurster, M.; Rapp, S.; Grauberger, P.; Lanza, G.; Albers, A.; Matthiesen, S. & Beyerer, J. (2022), „An ontology for remanufacturing systems“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 534–541. DOI: 10.1515/auto-2021-0156.

Pfrommer & Stogl et al. 2015

Pfrommer, J.; Stogl, D.; Aleksandrov, K.; Kiril Aleksandrov; Navarro, S. E. & Beyerer, J. (2015), „Plug & produce by modelling skills and service-oriented orchestration of reconfigurable manufacturing systems“, *at - Automatisierungstechnik* 63.10, S. 790–800. DOI: 10.1515/auto-2014-1157.

Poschmann 2021

Poschmann, H. (2021), „Konzeption und Entwicklung eines Robot Cognition Processors für adaptive Demontageanwendungen“. Dissertation. TU Clausthal, Claustal-Zellerfeld. DOI: 10.21268/20210929-0.

Poschmann & Brüggemann et al. 2020

Poschmann, H.; Brüggemann, H. & Goldmann, D. (2020), „Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation“, *Chemie Ingenieur Technik* 92.4, S. 341–359. DOI: 10.1002/cite.201900107.

Prendeville & Bocken 2017

Prendeville, S. & Bocken, N. (2017), „Design for Remanufacturing and Circular Business Models“. *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design*. Hrsg. von M.

- Matsumoto; K. Masui; S. Fukushige & S. Kondoh. Singapore: Springer Singapore, S. 269–283. DOI: 10.1007/978-981-10-0471-1_18.
- Priyono & Ijomah et al. 2016
Priyono, A.; Ijomah, W. & Bititci, U. (2016), „Disassembly for remanufacturing: A systematic literature review, new model development and future research needs“, *Journal of Industrial Engineering and Management* 9.4, S. 899. DOI: 10.3926/jiem.2053.
- Raihanian Mashhadi & Behdad 2017
Raihanian Mashhadi, A. & Behdad, S. (2017), „Optimal sorting policies in remanufacturing systems: Application of product life-cycle data in quality grading and end-of-use recovery“, *Journal of Manufacturing Systems* 43.1, S. 15–24. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.02.006.
- Reisig 2010
Reisig, W. (2010), *Petrinetze*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. DOI: 10.1007/978-3-8348-9708-4.
- Ridley & Ijomah 2015
Ridley, S. J. & Ijomah, W. L. (2015), „A novel pre-processing inspection methodology to enhance productivity in automotive product remanufacture: an industry-based research of 2196 engines“, *Journal of Remanufacturing* 5. Artikel 8. DOI: 10.1186/s13243-015-0017-4.
- Riggs & Battaia et al. 2015
Riggs, R. J.; Battaia, O. & Hu, S. J. (2015), „Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach“, *Journal of Manufacturing Systems* 37.3, S. 638–648. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.11.002.
- Rocca & Rosa et al. 2020
Rocca, R.; Rosa, P.; Sassanelli, C.; Fumagalli, L. & Terzi, S. (2020), „Integrating Virtual Reality and Digital Twin in Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case“, *Sustainability* 12.6, S. 2286. DOI: 10.3390/su12062286.
- Roy & Yu et al. 2010
Roy, R.; Yu, X. & Gen, M. (2010), *Introduction to Evolutionary Algorithms*. London: Springer London. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5.
- Salomonski & Zussman 1999
Salomonski, N. & Zussman, E. (1999), „On-line predictive model for disassembly process planning adaptation“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15.3, S. 211–220. DOI: 10.1016/S0736-5845(99)00019-8.
- Scheel & Aguiñaga et al. 2020
Scheel, C.; Aguiñaga, E. & Bello, B. (2020), „Decoupling Economic Development from the Consumption of Finite Resources Using Circular Economy. A Model for Developing Countries“, *Sustainability* 12.4, S. 1291. DOI: 10.3390/su12041291.

Schlüter & Lickert et al. 2021

Schlüter, M.; Lickert, H.; Schweitzer, K.; Bilge, P.; Briese, C.; Dietrich, F. & Krüger, J. (2021), „AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing“, *Procedia CIRP* 98, S. 300–305. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.107.

Scholz-Reiter & Scharke et al. 1999

Scholz-Reiter, B.; Scharke, H. & Hucht, A. (1999), „Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15.3, S. 247–255. DOI: 10.1016/S0736-5845(99)00022-8.

Scholz-Reiter & Beer et al. 2008

Scholz-Reiter, B.; Beer, C. de; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H. & Tervo, J. T. (2008), „Dynamik logistischer Systeme“. *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Hrsg. von P. Nyhuis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 109–138. DOI: 10.1007/978-3-540-75642-2_6.

Schuh 2006

Schuh, G. (2006), *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-33855-1.

Seliger & Uhlmann et al. 2000

Seliger, G.; Uhlmann, E.; Keil, T. & Härtwig, J. P. (2000), „Realisierung eines Pilot- Demontagesystems“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 95.7, S. 20–24. ISSN: 0947-0085.

Seliger 2007

„Processes and Tools for Disassembly“ (2007). *Sustainability in Manufacturing*. Hrsg. von G. Seliger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 217–311. DOI: 10.1007/978-3-540-49871-1_5.

Seliger 2018

Seliger, G. (2018), „Montage und Demontage“. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote; B. Bender; D. Göhlich & H. Dubbel. Berlin: Springer Vieweg, S. 1503–1509. DOI: 10.1007/978-3-662-54805-9_117.

Slama & Ben-Ammar et al. 2019

Slama, I.; Ben-Ammar, O.; Masmoudi, F. & Dolgui, A. (2019), „Disassembly scheduling problem: literature review and future research directions“. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019 (Berlin, 28.–30. Aug. 2019). Hrsg. von D. Ivanov; A. Dolgui & F. Yalaoui. Bd. 52. 13, S. 601–606. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.225.

Spur & Axmann et al. 1997

Spur, G.; Axmann, B.; Elbing, F. & Seibt, M. (1997), *Fertigungsverfahren der Demontage* :

Normungsvorschlag zur Begriffserklärung in der Demontage. Skriptum des Seminars für wissenschaftliche Normung in der Demontagetechnik. Technische Universität Berlin.

Statistisches Bundesamt 2023

Statistisches Bundesamt, Hrsg. (2023), *Arbeitskosten je geleistete Stunde (Jahresschätzung): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche*. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?language=de&sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=62431-0001#abreadcrumb> (besucht am 26.06.2024).

Steinhilper 2001

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

Streim 1975

Streim, H. (1975), „Heuristische Lösungsverfahren Versuch einer Begriffsklärung“, *Zeitschrift für Operations Research* 19.5, S. 143–162. DOI: 10.1007/BF01999748.

Sun & Chen et al. 2018

Sun, H.; Chen, W.; Liu, B. & Chen, X. (2018), „Economic lot scheduling problem in a remanufacturing system with returns at different quality grades“, *Journal of Cleaner Production* 170.4, S. 559–569. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.184.

Sundin 2004

Sundin, E. (2004), *Product and process design for successful remanufacturing*. Bd. 906. Linköping studies in science and technology. Zugl.: Linköping, Univ., Diss., 2004. Linköping: Linköping University Electronic Press. ISBN: 9185295736.

Sundin 2019

Sundin, E. (2019), „The Role of Remanufacturing in a Circular Economy“. *Remanufacturing in the Circular Economy*. Hrsg. von N. Nasr. Wiley, Hoboken, NJ und Scrivener Publishing, Beverly, MA, S. 31–60. DOI: 10.1002/9781119664383.ch2.

Sutton & Barto 2020

Sutton, R. S. & Barto, A. (2020), *Reinforcement learning: An introduction*. Second edition. Adaptive computation and machine learning. Cambridge, Massachusetts und London, England: The MIT Press. ISBN: 9780262039246.

Tang & Zhou et al. 2001

Tang, Y.; Zhou, M. & Caudill, R. J. (2001), „An integrated approach to disassembly planning and demanufacturing operation“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17.6, S. 773–784. DOI: 10.1109/70.975899.

Tang & Zhou et al. 2002

Tang, Y.; Zhou, M.; Zussman, E. & Caudill, R. (2002), „Disassembly modeling, planning, and application“, *Journal of Manufacturing Systems* 21.3, S. 200–217. DOI: 10.1016/S0278-6125(02)80162-5.

Teunter & Flapper 2011

Teunter, R. H. & Flapper, S. D. P. (2011), „Optimal core acquisition and remanufacturing policies under uncertain core quality fractions“, *European Journal of Operational Research* 210.2, S. 241–248. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.06.015.

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* 66.2, S. 585–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.001.

Ullerich 2014

Ullerich, C. (2014), *Advanced Disassembly Planning*. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-03118-3.

Ullerich & Buscher 2013

Ullerich, C. & Buscher, U. (2013), „Flexible disassembly planning considering product conditions“, *International Journal of Production Research* 51.20, S. 6209–6228. DOI: 10.1080/00207543.2013.825406.

Ullrich 2014

Ullrich, G. (2014), *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8348-2592-6.

United Nations 2022a

United Nations, Hrsg. (2022a), *The Sustainable Development Goals: Report 2022*. New York: United Nations. ISBN: 9789211014488.

United Nations 2022b

United Nations, Hrsg. (2022b), *World population prospects 2022: Summary of results*. New York. URL: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (besucht am 26.06.2024).

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.

VDI 2243 2002

VDI 2243 (2002), *Recyclingorientierte Produktentwicklung*. Verein deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Berlin: Beuth Verlag.

VDI 2860 1990

VDI 2860 (1990), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Verein deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3423 2011

VDI 3423 (2011), *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung*. Verein deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Berlin: Beuth Verlag.

Vongbunyong & Chen 2015

Vongbunyong, S. & Chen, W. H. (2015), *Disassembly automation: Automated systems with cognitive abilities*. Sustainable production, life cycle engineering and management. Cham: Springer. ISBN: 9783319151823.

Vongbunyong & Vongseela et al. 2017

Vongbunyong, S.; Vongseela, P. & Sreerattana-aporn, J. (2017), „A Process Demonstration Platform for Product Disassembly Skills Transfer“, *Procedia CIRP* 61, S. 281–286. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.197.

Voudouris & Tsang et al. 2010

Voudouris, C.; Tsang, E. P. & Alsheddy, A. (2010), „Guided Local Search“. *Handbook of Metaheuristics*. Hrsg. von M. Gendreau & J.-Y. Potvin. Bd. 146. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US, S. 321–361. DOI: 10.1007/978-1-4419-1665-5_11.

Wiendahl & Scholz-Reiter et al. 2001

Wiendahl, H.-P.; Scholz-Reiter, B.; Bürkner, S. & Scharke, H. (2001), „Flexible disassembly systems-layouts and modules for processing obsolete products“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 215.5, S. 723–732. DOI: 10.1243/09544050111518520.

Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N. & Brieke, M. (2007), „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals* 56.2, S. 783–809. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

Wiendahl & Seliger et al. 1999

Wiendahl, H.-P.; Seliger, G.; Perlewitz, H. & Bürkner, S. (1999), „A general approach to disassembly planning and control“, *Production Planning & Control* 10.8, S. 718–726. DOI: 10.1080/095372899232542.

Wiendahl & Begemann et al. 2018

Wiendahl, H.-P.; Begemann, C.; Cieminski, G. von; Fischer, A. & Vogel, M. (2018), „Kapazitätsterminierung und Kapazitätsflexibilität“. *Taschenbuch der Logistik*. Hrsg. von R. Koether.

Hanser eLibrary. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, S. 143–153. DOI: 10.3139/9783446457676.010.

World Business Council for Sustainable Development & Boston Consulting Group 2023

World Business Council for Sustainable Development & Boston Consulting Group, Hrsg. (2023), *Enabling circularity through transparency: Introducing the EU Digital Product Passport*. Genf, Schweiz. URL: https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Enabling-circularity-through-transparency_Introducing-the-EU-DPP.pdf (besucht am 26.06.2024).

World Economic Forum 2014

World Economic Forum (2014), *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*. Hrsg. von World Economic Forum. Genf, Schweiz. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf (besucht am 26.06.2024).

World Economic Forum & Accenture Strategy 2019

World Economic Forum & Accenture Strategy (2019), *Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the Circular Economy: Consumer Electronics and Plastics Packaging*. Hrsg. von World Economic Forum. URL: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_4IR_Circular_Economy_report_2018.pdf (besucht am 26.06.2024).

Wu & Shen 2020

Wu, K. & Shen, Y. (2020), „A unified view on planning, scheduling and dispatching for a factory“, *Advanced Engineering Informatics* 46. Article 101188. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101188.

Wurster & Bail et al. 2023

Wurster, M.; Bail, F.; Behrendt, S. & Lanza, G. (2023), *Adaptive Multi-Priority Rule Approach To Control Agile Disassembly Systems In Remanufacturing*. Hannover : publish-Ing. DOI: 10.15488/15278.

Wurster & Häfner et al. 2021

Wurster, M.; Häfner, B.; Gauder, D.; Stricker, N. & Lanza, G. (2021), „Fluid Automation — A Definition and an Application in Remanufacturing Production Systems“, *Procedia CIRP* 97, S. 508–513. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.267.

Wurster & Klein et al. 2022

Wurster, M.; Klein, J.-F.; Kaiser, J.-P.; Mangold, S.; Furmans, K.; Heizmann, M.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2022), „Integrierte Steuerungsarchitektur für ein agiles Demontagesystem mit autonomer Produktbefundung“, *at - Automatisierungstechnik* 70.6, S. 542–556. DOI: 10.1515/auto-2021-0157.

Wurster & Michel et al. 2022

Wurster, M.; Michel, M.; May, M. C.; Kuhnle, A.; Stricker, N. & Lanza, G. (2022), „Modelling

- and condition-based control of a flexible and hybrid disassembly system with manual and autonomous workstations using reinforcement learning“, *Journal of Intelligent Manufacturing* 33.2, S. 575–591. DOI: 10.1007/s10845-021-01863-3.
- Yang & M. R. et al. 2018
Yang, S.; M. R., A.; Kaminski, J. & Pepin, H. (2018), „Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing“, *Applied Sciences* 8.7, S. 1177. DOI: 10.3390/app8071177.
- Yanıkoğlu & Denizel 2021
Yanıkoğlu, İ. & Denizel, M. (2021), „The value of quality grading in remanufacturing under quality level uncertainty“, *International Journal of Production Research* 59.3, S. 839–859. DOI: 10.1080/00207543.2020.1711983.
- Yin & Zhang et al. 2022
Yin, T.; Zhang, Z.; Zhang, Y.; Wu, T. & Liang, W. (2022), „Mixed-integer programming model and hybrid driving algorithm for multi-product partial disassembly line balancing problem with multi-robot workstations“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 73. Article 102251. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102251.
- Zaeh & Beetz et al. 2009
Zaeh, M. F.; Beetz, M.; Shea, K.; Reinhart, G.; Bender, K.; Lau, C.; Ostgathe, M.; Vogl, W.; Wiesbeck, M.; Engelhard, M.; Ertelt, C.; Rühr, T.; Friedrich, M. & Herle, S. (2009), „The Cognitive Factory“. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Hrsg. von H. A. ElMaraghy. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer London, S. 355–371. DOI: 10.1007/978-1-84882-067-8_20.
- Zelewski & Hohmann et al. 2008
Zelewski, S.; Hohmann, S.; Hügens, T. & Peters, M. L. (2008), *Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme - Konzepte und exemplarische Implementierungen mithilfe von SAP® R/3®*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH. DOI: 10.1524/9783486599862.
- Zhang & Kuo 2011
Zhang, H. C. & Kuo, T. C. (2011), „A graph-based disassembly sequence planning for EOL product recycling“. *Twenty first IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, October 13-15, 1997, Austin, TX, USA* (Austin, TX, 13.–15. Okt. 1997). Hrsg. von D. Millard. New York und Piscataway, NJ: IEEE, S. 140–151. DOI: 10.1109/IEMT.1997.626890.
- Zussman & Meltser 1997
Zussman, E. & Meltser, M. (1997), „Planning and Re-planning Strategy of Disassembly Processes“. *Life Cycle Networks*. Hrsg. von F.-L. Krause & G. Seliger. Boston, MA: Springer US, S. 423–432. DOI: 10.1007/978-1-4615-6381-5_36.
- Zussman & Zhou 1999
Zussman, E. & Zhou, M. (1999), „A methodology for modeling and adaptive planning of

disassembly processes“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15.1, S. 190–194.
DOI: 10.1109/70.744614.

Zussman & Zhou 2000

Zussman, E. & Zhou, M. C. (2000), „Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16.2, S. 171–179. DOI: 10.1109/70.843173.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Eigenschaften Agiler Hybrider Demontage Systeme (AHDS)	5
1.2	Überblick über die drei Teilziele der Forschungsarbeit	7
2.1	Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (nach Acker 2011 in Anlehnung an Hackstein 1989)	9
2.2	Kapazitätshüllkurven zur Verdeutlichung der zeitlichen und mengenmäßigen Kapazitätsflexibilität (eigene Darstellung in Anlehnung an Breithaupt 2001, S. 77)	11
2.3	Methoden der Kreislaufwirtschaft und Abgrenzung des Remanufacturings (in Anlehnung an Parker & Riley et al. 2015, S. 11 und King & Burgess et al. 2006, S. 260)	14
2.4	Charakteristische Prozesskette und Akteure im Remanufacturing in der Automobilindustrie (angelehnt an Matsumoto & Ijomah 2013, S. 397 ff.)	19
2.5	Anordnungsstruktur der vier Grundformen für Demontagesysteme: Einzelzelle, Linie, Insel und Netz nach Ciupek 2006, S. 68.	25
2.6	Qualitative Einordnung der konventionellen Serienproduktion gegenüber der Demontage in der Serieninstandsetzung anhand der Ausprägung der Produktheterogenität, der Stückzahl je Variante, der Prozessstandardisierung und der Prozessunsicherheit - Verortung des Einsatzpotentials manueller, konventioneller und flexibel-automatisierter Ressourcen (Eigene Darstellung)	30
2.7	Prototyp einer flexiblen Roboterstation für die Demontage von Elektrokleinmotoren am Karlsruher Institut für Technologie	32
2.8	Manuelle Station (a) und automatisierte Station (b) mit installierten Demontagevorrichtungen in Laborumgebung am Karlsruher Institut für Technologie	34
4.1	Oben: Charakterisierung der manuellen Station, der flexiblen Roboterstation und der (starr) automatisierten Station; Unten: Ausschnitt aus der AgiProbot-Demonstratorfabrik am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie mit Hervorhebung der Stationstypen	58
4.2	Einbettung des AHDS in ein Rückwärtslogistiknetzwerk mit erweiterter Produktbefundung und durchgängigem Informationsfluss	60
4.3	Überblick über den Lösungsansatz	62
5.1	Referenzmodell bestehend aus einer Produkt-, einer Ressourcen- und einer Operationssicht (in Anlehnung an Pfrommer & Klein et al. 2022)	63
5.2	Schematische Darstellung der Ressourcensicht	65
5.3	Schematische Darstellung der Produktsicht	66

5.4	Demontage-Petri-Netz eines exemplarischen Produkts mit vier Komponenten	68
5.5	Schematische Darstellung der Operationssicht	70
5.6	Charakterisierung der Systemkomponenten angelehnt an Kuhnle 2020, S. 58	72
5.7	Ausschnitt aus dem Belegungsplan exemplarischer Systemkomponenten am Übergang von einer Produktionsperiode k zur Folgeperiode $k+1$ inklusive der Betriebsmodi und Zustände der Systemkomponenten	76
5.8	Systemkapazität und Systemleistung: Verbildlichung und Begriffsdefinition	78
5.9	Ablaufschema der Auftragsbearbeitung mit den dezentralen Handlungsfeldern Auftragsfreigabe und Auftragsallokation	82
5.10	Schematische Darstellung des Aufbaus eines individuellen Allokationsentscheidungsproblems; Oben: Aufbau des Aktionsraums aus dem DPN des vakanten Produkts sowie dem Matching der Demontageaufgaben mit fähigen Stationen zur Ableitung von Operationen, Unten: Bewertungsgrundlage zur Auswahl einer Operation anhand verschiedener Entscheidungsmerkmale (Die Ausprägungen der Entscheidungsmerkmale und die Bezeichnungen wurden willkürlich gewählt und dienen lediglich der Anschaulichkeit)	86
5.11	Ablaufschema der analytisch-heuristischen Kapazitätsplanung (adaptiert in Anlehnung an Kettner & Schmidt et al. 2010, S. 54 und Grundig 2018, S. 85)	94
5.12	Ablaufschema des auf linearer Optimierung basierten Kapazitätsplanungsverfahrens (adaptiert in Anlehnung an Kettner & Schmidt et al. 2010, S. 54 und Grundig 2018, S. 85)	95
5.13	Analytisch-heuristische Systematik der aggregierten Kapazitätsbedarfsbestimmung: Veranschaulichung von Differenzierung, Allokation und Aggregation (Vernachlässigung der fehlerinduzierten Aufgabenallokation)	96
5.14	Verdeutlichung der Allokationsstrategie des heuristischen Verfahrens: a) Aufteilung der Demontageaufgaben nach Befähigung b) Allokationsentscheidungsschema	98
5.15	Zeithorizont der rollierenden Planung - Zusammenhang zwischen Planungszeitpunkt, Festlegungszeitraum und Zeitpunkt der Systemrekonfiguration (in Anlehnung an A_Feuerstein 2023)	105
5.16	Schematische Darstellung der rollierenden Planung unter Berücksichtigung der ressourcenspezifischen Reaktionszeiten (in Anlehnung an A_Feuerstein 2023)	106
5.17	Vereinfachte schematische Darstellung der Softwarearchitektur	107
5.18	Schematische Darstellung der Nutzerinteraktion und der wichtigsten verwendeten Programmbibliotheken	108

5.19	Exemplarischer Ausschnitt aus dem Initialisierungs-Wizard: Deklaration und Parametrisierung von Produktvarianten inklusive des Demontage-Petri-Netzes und der Qualitätsklassen	109
6.1	Vorgehen zur Untersuchung und Validierung des Lösungsansatzes	110
6.2	Produktbeispiele für die in der AgiProbot-Demonstratorfabrik demontierten Elektromotoren: a) Komfortaktuatoren und b) Anlassermotoren	111
6.3	Demontage-Petri-Netze der Produkttypen (in Anlehnung an A_Bail 2023)	112
6.4	Plakative Wahrscheinlichkeitsdichte der Ausführungsdauer einer Demontageoperation für drei Qualitätsklassen einer Produktvariante am selben Stations-typ	115
6.5	Gesamtstückzahlverlauf der vier untersuchten Produktionsprogramme a)-d)	118
6.6	Mittlere Ausbringung und mittlere Durchlaufzeit bei Variation der Conwip-Grenze durch schrittweise Erhöhung des Conwip-Koeffizienten k_{cw} - Vergleich der auftragsorientierten (OIP) und der komponentenorientierten (CIP) Conwip-Auftragsfreigabe anhand vier verschiedener Anwendungsfälle (a-d)	120
6.7	Vergleich der OIP- und CIP-Auftragsfreigabe bei Unterlast ($k_{cw} = 0,1$), im Übergangsbereich ($k_{cw} = 0,5$) und bei Überlast ($k_{cw} = 1$) - Zweistündige Ausschnitte aus den Demontageauftragsplänen jeweils eines exemplarischen Simulationslaufs in HD6K-M3R3A2.	122
6.8	Stationsbelegungspläne exemplarischer Simulationläufe bei variiertem unikriteriellem Prioritätsregeleinsatz a) - e) sowie einer zufallsbasierten Auftragsallokation f) anhand von HD6K-M3R3A2 - Einstündige Ausschnitte mit erfolgreichen (blau) und fehlgeschlagenen Operationen (rot).	124
6.9	Rangfolge der Regeleffektivität bei unikriterieller Entscheidung für die Zielgrößen Ausbringung und Durchlaufzeit: Durchschnittsrang und Rangspanne	125
6.10	Relative kumulierte Gewichtungsanteile der Einzelregeln an den nach Rang besten zehn Gewichtungskonfigurationen: Durchlaufzeit (links) und Systemausbringung (rechts).	126
6.11	Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den MD4K-M3R3A2-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsvariation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA	128
6.12	Verschiebung der besten Gewichtungskonfiguration im Mix-MxR10A16-Fall bei systematischer Erhöhung der manuellen Stationszahl - Vergleich der NPA-HEW-NSK- (grün) und NPA-HEW-KOZ-Regelkombination (blau)	131

6.13	Lösungsanstieg der Optimierungsverfahren im Vergleich für die Anwendungsfälle Mix-M5R10A16 a)c)e) und Mix-M20R20A20 b)d)f) - Mittelwerte und Lösungsspanne	134
6.14	Kostenverlauf bei Einsatz der heuristischen Kapazitätsplanung und Variation des MS-Allokationsanteil – Mittlere Kosten aus jeweils zehn Replikationen in acht Anwendungsfällen	137
6.15	Verschiebung des optimalen Verteilfaktors λ bei Variation der FRS-Kosten - a) Niedrige Rekonfigurationskosten, b) Hohe Rekonfigurationskosten . . .	138
6.16	Mehrperiodige Systemanalyse bei heuristischer Planung mit $\lambda = 0,6$ (links) und exakter Planung bei 10 Perioden Vorausschau (rechts) für den Anwendungsfall <i>Stückzahlrückgang</i> mit $c_{FRS,btrb} = 0,15$ und niedrigen RKK - Verlauf des Rekonfigurationspfads (Stationsanzahl), des Auftragsbestands und der Stationsauslastung	139
6.17	Mehrperiodige Systemanalyse bei heuristischer Planung mit $\lambda = 1$ (links) und exakter Planung bei 10 Perioden Vorausschau und Auftragsrückstands- bildung (rechts) für den Anwendungsfall <i>U-Verlauf</i> mit $c_{FRS,btrb} = 0,45$ bei erhöhten RKK - Verlauf der Stationsanzahl, des Auftragsbestands und der Stationsauslastung	141
6.18	Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der <i>milp1</i> , <i>milp10</i> und <i>milp10R</i> Konfiguration sowie des heuristischen Benchmarks (mit λ^{min}) für niedrige RKK, verschie- dene Stückzahl Szenarien und bei Variation des FRS-Betriebskostensatz .	142
6.19	Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der <i>milp1</i> , <i>milp10</i> und <i>milp10R</i> Konfigura- tion mit FRS-Limitierung sowie des heuristischen Benchmarks (mit λ^{min}) für niedrige RKK, verschiedene Stückzahl Szenarien und bei Variation des FRS-Betriebskostensatz	143
6.20	Funktionsweise des mehrperiodigen Systembetriebs im Hauptstrang der Si- mulation und Reparametrierung nach Rekonfiguration in temporär geöffneten Nebensträngen	146
6.21	Vergleich der resultierenden Kosten für die in Tabelle 6.3 spezifizierten DPS- Konfigurationen und den Anwendungsfall <i>U-Verlauf</i> bei $c_{FRS,btrb} = 0,45$.	148
6.22	Zusammenfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit der DPS - a) Maß- nahmen zur Reduktion von Steuerungsverlusten in der Auftragsallokation b) Vermeidung von Planungsverlusten durch realbetriebsorientierte Kapazitäts- planung	150

6.23	Operativer Systembetrieb in der Lichtmaschinendemontage: a) Ausschnitt aus dem Demontageauftragsplan für $k_{cw} = 0,5$, b) Sensitivität der Systemausbringung gegenüber dem Conwip-Koeffizient k_{cw} für die CIP- (mit $k_{skal} = 2$) und die OIP-Auftragsfreigabe (mit $k_{skal} = 1$) für jeweils 100 replizierte Simulationsläufe	152
6.24	Vergleich der resultierenden Kosten bei vorausschauender Planung mit Automatisierung <i>milp10</i> und ohne Automatisierung <i>milp10nA</i> sowie bei statischer Systemkonfiguration <i>stat</i> - a) im Einschichtbetrieb und b) im Zweischichtbetrieb	153
6.25	Mehrperiodige Systemanalyse für <i>stat</i> , <i>milp10nA</i> und <i>milp10</i> im Einschichtbetrieb (links) und im Zweischichtbetrieb (rechts)	154
6.26	Mehrperiodige Systemanalyse für <i>milp10</i> im Zweischichtbetrieb bei schrittweiser Steigerung der FRS-Kosteneffizienz	156
6.27	Vergleich der resultierenden Kosten bei schrittweiser Steigerung der FRS-Kosteneffizienz für <i>milp10</i> im Zweischichtbetrieb	157
6.28	Herkunft der Planungsdaten für die vier Transparenzklassen: a) <i>pld</i> b) <i>prb</i> , <i>przb</i> und c) <i>prfw</i>	158
6.29	Vergleich der Gesamtkosten für die vier Transparenzklassen <i>prfw</i> , <i>przb</i> , <i>prb</i> und <i>pld</i> für a) 16 und b) vier Qualitätsklassen für <i>milp10</i> im Zweischichtbetrieb	159
A2.1	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] MD4K . . .	XIX
A2.2	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS6K	XIX
A2.3	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS5K	XIX
A2.4	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS4K	XX
A2.5	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] MD5K	XX
A2.6	Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] HD6K	XXI
A3.1	Schematische Darstellung des Systemlayouts – Verortung der Stationen, Quellen und Senken (in Anlehnung an A_Hirsch 2024)	XXII
A3.2	Vergleich der Konfigurationen des Transportkonzepts bei variierender FTF-Anzahl anhand der Entwicklung der Auftragsdurchlaufzeit (a) und der Systemausbringung (b) (in Anlehnung an A_Hirsch 2024)	XXIV
A4.1	Definition der sechs Anwendungsfälle – Zusammensetzung der Produktionsprogramme und Anzahl der Demontageressourcen je Typ im Produktionsprogramm	XXV
A5.1	Stückzahlverläufe der fünf Anwendungsfälle (Produktvariantenebene) . . .	XXVI
A5.2	Stückzahlverläufe der fünf Anwendungsfälle (Qualitätsklassenebene) . . .	XXVII

A6.1	Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den Mix-M5R10A16-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsva- riation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA	XXXII
A6.2	Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den Mix-M20R20A20-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsva- riation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA	XXXIII
A7.1	Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für drei aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA , b) PSO und c) ABC	XXXVII
A7.2	Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für vier aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ, NSK) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA , b) PSO und c) ABC	XXXVIII
A7.3	Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für fünf aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ, NSK, NTA) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA, b) PSO und c) ABC	XXXIX
A8.1	Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der <i>mip1</i> , <i>mip10</i> und <i>mip10R</i> Konfiguration sowie des heuristischen Benchmarks für hohe RKK, verschiedene Stück- zahlszenarien und Variation des FRS-Betriebskostensatz	XL
A8.2	Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der <i>mip1</i> , <i>mip10</i> und <i>mip10R</i> Konfigurati- on bei FRS-Limitierung ($\gamma_{limit}^{FRS} = 1$) sowie des heuristischen Benchmarks für hohe RKK, verschiedene Stückzahlszenarien und Variation des FRS- Betriebskostensatz	XLI
A9.1	Bereinigte Stückzahlverläufe über 48 Produktionsperioden: a) Gesamtverlauf b) Verlauf je Produktvariante	XLII
A9.2	Drei exemplarische Lichtmaschinenvarianten im Gebrauchtzustand	XLIII
A9.3	DPN der fünf Lichtmaschinen-Produktcluster (vgl. A_Sprenger 2024)	XLIV
A13.1	Mittleres MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis sowie Operationsanteils mit hö- herer FRS-Kosteneffizienz im Einschichtbetrieb (a, b) und im Zweischichtbe- trieb (c, d): Visualisierung mittels Konturgraphen	LIV

Tabellenverzeichnis

2.1	Bewertung der Anordnungsprinzipien nach Ciupek 2006, S. 69 (●: geeignet, ◐: bedingt geeignet, ○: ungeeignet)	26
3.1	Forschungsdefizit	53
6.1	Übersicht über die Produkttypen (in Anlehnung an A_Bail 2023)	112
6.2	Ressourcenübersicht (in Klammern dargestellte Werte werden im mehrperi- odigen Fall variiert)	113
6.3	Spezifikation der betrachteten DPS-Konfigurationen für den Anwendungsfall <i>U-Verlauf</i> bei $c_{FRS,btrb} = 0,45$	147
A6.1	Entwicklung der Systemausbringung in Abhängigkeit von der Prioritätsregel- konfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 1) – Mittelwerte aus 50 Replikationen	XXVIII
A6.2	Entwicklung der Systemausbringung in Abhängigkeit von der Prioritätsregel- konfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 2) – Mittelwerte aus 50 Replikationen	XXIX
A6.3	Entwicklung der gemittelten Auftragsdurchlaufzeit in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 1) – Mittelwerte aus 50 Replikationen	XXX
A6.4	Entwicklung der gemittelten Auftragsdurchlaufzeit in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 2) – Mittelwerte aus 50 Replikationen	XXXI
A6.5	Ausbringungssverluste bei Variation der MS-Anzahl und statischer GK im Verhältnis zu den je Systemkonfiguration optimalen GK	XXXIV
A7.1	Aufbau der Rastersuche mit untersuchten Hyperparametern und Parameter- ausprägungen	XXXV
A9.1	Komponenten der Produktfamilie Lichtmaschine und Zuweisung der Kenn- buchstaben	XLIII
A9.2	Klassifikation nach Zustandsmerkmalen und relative Häufigkeit der 16 Quali- tätsklassen (relative Häufigkeit für den 4 QK-Fall in Klammern)	XLV
A9.3	Auswirkungen der Qualitätsmerkmale auf die Demontageaufgaben (in Anleh- nung an A_Sprenger 2024)	XLV
A10.1	Ressourcenübersicht für den Anwendungsfall der Lichtmaschinendemontage	XLVI
A12.1	Berechnung der Stationskostensätze in Anlehnung an das Leasingrechnungs- modell von Fechter (2022) (Kursive Werte sind vom Autor geschätzt) . . .	L
A13.1	Fähigkeitsraum der Stationstypen (vgl. A_Sprenger 2024)	LI

A13.2 Charakterisierung der Kosteneffizienz der FRS und AS gegenüber der MS aufbauend auf den ursprünglichen Parametern	LII
--	-----

Anhang

A1 Funktionsweise der metaheuristischen Optimierungsverfahren

Funktionsweise von Simulated Annealing

Das Simulated Annealing (zu dt. simulierte Abkühlung bzw. Tempern, kurz SA) ist ein naturinspiriertes Verfahren, das an das Abkühlverhalten von Metallen angelehnt ist. Eingeführt und erstmals verwendet wurde der lokale Suchalgorithmus von Kirkpatrick & Gelatt et al. (1983). Nicht zuletzt aufgrund seiner einfachen Anwendbarkeit findet der Algorithmus weite Verbreitung in der Industrie (Nikolaev & Jacobson 2010, S. 2). SA stellt eine Erweiterung der lokalen Suche dar, die auf der Durchsuchung der direkten Nachbarschaft nach einer Lösung beruht. Der iterative Algorithmus beginnt stets mit einer Ausgangslösung \mathbf{w}_0 mit dem Wert f_0 und einer Anfangstemperatur T_{start} , die mit der Zeit schrittweise abgesenkt wird. In Algorithmus 1, angelehnt an A_Bail 2023, wird der Ablauf von SA genauer beschrieben.

Algorithmus 1 Simulated Annealing

```

1: Initialisiere die Starttemperatur:  $T_{start}$ 
2: Bestimme eine Nachbarschaftsfunktion:  $N(\mathbf{w})$ 
3: Generiere eine initiale Lösung:  $\mathbf{w}_0$ 
4: Setze:  $\mathbf{w}_{best} \leftarrow \mathbf{w}_0$  und  $f_{best} \leftarrow f_0$ 
5: while not terminate do
6:   Generiere neue Lösung:  $\mathbf{w}_{neu} \leftarrow N(\mathbf{w}_{best})$ 
7:    $\Delta \leftarrow f(\mathbf{w}_{neu}) - f_{best}$ 
8:   if  $\Delta > 0$  then
9:     Aktualisiere  $\mathbf{w}_{best} \leftarrow \mathbf{w}_{neu}$ 
10:    Aktualisiere:  $f_{best} \leftarrow f(\mathbf{w}_{neu})$ 
11:   else if  $uniform(0,1) \leq e^{\Delta/T}$  then
12:     Aktualisiere  $\mathbf{w}_{best} \leftarrow \mathbf{w}_{neu}$ 
13:     Aktualisiere:  $f_{best} \leftarrow f(\mathbf{w}_{neu})$ 
14:   end if
15:   Aktualisiere  $T \leftarrow T * k_{kühl}$ 
16: end while
17: return  $\mathbf{w}_{best}$ 

```

Im Zuge jeder Iteration wird gemäß einer Nachbarschaftsfunktion $N(\mathbf{w})$, zufällig eine *Kandidatenlösung* \mathbf{w}_{neu} in der zirkulären Umgebung der aktuellen Lösung gezogen, ausgewählt

und bewertet (A_Bail 2023). Eine bessere *Kandidatenlösung* ersetzt immer die bis dahin beste Lösung \mathbf{w}_{best} . Des Weiteren besteht beim SA die Möglichkeit, eine schlechtere *Kandidatenlösung* zu akzeptieren. Hier grenzt sich SA von anderen lokalen Suchverfahren ab. Dieses Verhalten ermöglicht es, lokale Minima zu verlassen. Eine schlechtere Lösung wird dabei nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit akzeptiert, welche von der aktuellen Temperatur T beeinflusst wird. Durch die Absenkung der Temperatur mittels des Abkühlfaktors $k_{kühl}$ erfolgt ein kontinuierlicher Übergang von einer breiten Erkundung des Suchraums (Exploration) hin, zu einer zunehmenden Fokussierung auf die Suche im als am vielversprechendsten identifizierten Bereich (Exploitation).

Funktionsweise von Particle Swarm Optimization

Die Particle Swarm Optimization (dt. Partikelschwarmoptimierung, kurz PSO) stellt eine populationsbasierte Metaheuristik dar, welche die Bewegung, bzw. das Sozialverhalten von Menschen, Tieren und Insekten nachahmt (Voudouris & Tsang et al. 2010, S. 358). Der Algorithmus wurde erstmals von Kennedy & Eberhart (1995) beschrieben. Die Population, eine Gruppe von *Partikeln* bzw. allgemeiner Agenten der Größe n_{pop} , wird zu Beginn zufällig initialisiert. Die *Partikel* werden dann mit einer bestimmten Geschwindigkeit (engl. velocity) durch den Suchraum bewegt. Dabei wird die individuelle Bewegungsrichtung eines Partikels i mit der Position \mathbf{w}_i im Suchraum durch die bisher verfolgte Bewegungsrichtung $\dot{\mathbf{w}}_i$ (Trägheitskomponente), die individuell beste gefundene Position $\mathbf{w}_{best,i}$ (Kognitivkomponente) sowie die global beste gefundene Position $\mathbf{w}_{best}^{global}$ (Sozialkomponente) berücksichtigt und nach Formel A1.1 zu $\dot{\mathbf{w}}_i^{neu}$ aktualisiert. Die drei Einzelkomponenten werden mittels μ , τ_1 und τ_2 skaliert. Letztere, die Sozialkomponente, sorgt für die Interaktion der Partikel des Schwarms. Der Schwarm konvergiert so in Richtung des vielversprechendsten Bereichs. Die Lösungen werden solange angepasst, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Wie Simulated Annealing genießt PSO bei Anwendern eine hohe Akzeptanz aufgrund seiner Robustheit und Effizienz (Voudouris & Tsang et al. 2010, S. 358). Algorithmus 2, vgl. A_Bail 2023, veranschaulicht den iterativen Ablauf von PSO.

$$\dot{\mathbf{w}}_{neu,i} = \underbrace{\mu \cdot \dot{\mathbf{w}}_i}_{\text{Bewegungsträgheit}} + \underbrace{\tau_1 \cdot U(0,1) \cdot (\mathbf{w}_{best,i} - \mathbf{w}_i)}_{\text{Kognitive Komponente}} + \underbrace{\tau_2 \cdot U(0,1) \cdot (\mathbf{w}_{best}^{global} - \mathbf{w}_i)}_{\text{Soziale Komponente}} \quad \text{A1.1}$$

Algorithmus 2 Particle Swarm Optimization

```

1: Generiere initiale Population  $Pop \leftarrow (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_{n_{pop}})$ 
2: Setze  $\mathbf{w}_{best,i} \leftarrow \mathbf{w}_i, \forall \mathbf{w}_i \in Pop$ 
3: Initialisiere  $\mathbf{w}_{best}^{global} \leftarrow \operatorname{argmax} f(\mathbf{w}_{best,i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n_{pop}\})$ 
4: while not terminate do
5:   for  $\mathbf{w}_i \in Pop$  do
6:     Aktualisiere  $\dot{\mathbf{w}}_i \leftarrow \dot{\mathbf{w}}_{neu,i}$ 
7:     Aktualisiere  $\mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{w}_i + \dot{\mathbf{w}}_i$ 
8:     if  $f(\mathbf{w}_i) > f(\mathbf{w}_{best,i})$  then
9:       Aktualisiere  $\mathbf{w}_{best,i} \leftarrow \mathbf{w}_i$ 
10:    end if
11:  end for
12:  Aktualisiere  $\mathbf{w}_{best}^{global} \leftarrow \operatorname{argmax} f(\mathbf{w}_{best,i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n_{pop}\})$ 
13: end while
14: return  $\mathbf{w}_{best}^{global}$ 

```

Funktionsweise von Artificial Bee Colony Optimization

Die Artificial Bee Colony Optimization (dt. Künstlicher Bienenvolk-Algorithmus, kurz ABC(-Optimization)), erstmals eingeführt von Karaboga (2005), ist ein weiteres populationsbasiertes Optimierungsverfahren. Das naturinspirierte Verfahren, s. Algorithmus 3 in Anlehnung an A_Bail 2023 nach Karaboga & Akay 2009, ahmt die Mechanismen der Nahrungssuche von Bienenschwärmen nach. Eine mögliche Position bzw. Lösung entspricht dabei einer Nahrungsquelle, welche eine variierende Qualität (Nektarverfügbarkeit) aufweist und von Bienen (Agenten) aufgesucht werden kann. Zunächst wird ein Satz von n_{pop} Lösungen zufällig initialisiert. Sogenannte *Arbeiterbienen* suchen dann nach potentiell besseren Lösungen in der Nähe der aktuellen Lösungen $\mathbf{w}_{eval,i}$ in der Population. Das Wissen über die Lösungsgüte einzelner Positionen geben sie an andere Bienen weiter. Diese sogenannten *Beobachterbienen* untersuchen die Nachbarschaft der vielversprechendsten Lösungen der aktuellen Population. Ob eine von den Arbeiterbienen gefundene Lösung \mathbf{w}_i ausgewählt wird, unterliegt der Wahrscheinlichkeit p_i die mittels Formel A1.2 bestimmt wird.

$$p_i = \frac{f(\mathbf{w}_i)}{\sum_{n=1}^N f(\mathbf{w}_n)} \quad \text{A1.2}$$

Ergänzt wird das Bienenvolk schließlich von Suchbienen (Scouts), welche bestehende Lösungen, die eine bestimmte Anzahl von Iterationen, gemäß dem Schwellwert n_{limit}^{abc} , nicht

ersetzt wurden, durch eine zufällige Lösung ersetzen und für Exploration sorgen. Bei Suche nach neuen Lösungen in der Nachbarschaft folgen sowohl die *Arbeiter-* als auch die *Beobachterbienen* Formel A1.3, wobei \mathbf{w}_j einer weiteren Lösung der Population entspricht. Damit verkleinert sich die Nachbarschaft automatisch mit Konvergenz der Bienenkolonie. (Karaboga & Akay 2009)

$$\mathbf{w}_{eval,i} = \mathbf{w}_i + U(-1,1) \cdot (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_j) \quad \text{A1.3}$$

Für weitere Informationen zum Mechanismus und zur mathematischen Modellierung sei bspw. auf Karaboga & Akay 2009 verwiesen.

Algorithmus 3 Artificial Bee Colony Optimization

```

1: Generiere initiale Population  $Pop \leftarrow \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_{n_{pop}}\}$ 
2: while not terminate do
3:   Arbeiterbienen:
4:   for  $\forall \mathbf{w}_i \in Pop$  do
5:     Bestimme  $\mathbf{w}_{eval,i}$ 
6:     if  $f(\mathbf{w}_{eval,i}) > f(\mathbf{w}_i)$  then
7:       Aktualisiere  $\mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{w}_{eval,i}$ 
8:     end if
9:   end for
10:  Beobachterbienen:
11:  for  $i \in [1, 2, \dots, n_{pop}]$  do
12:    Bestimme  $\mathbf{w}_i$  basierend auf  $\{p_1, p_2, \dots, p_{n_{pop}}\}$ 
13:    Bestimme  $\mathbf{w}^{eval,i}$ 
14:    if  $f(\mathbf{w}^{eval,i}) > f(\mathbf{w}_i)$  then
15:      Aktualisiere  $\mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{w}^{eval,i}$ 
16:    end if
17:  end for
18:  Suchbienen:
19:  for  $\forall \mathbf{w}_i \in Pop$  do
20:    if  $\mathbf{w}_i$  unverändert für  $n_{limit}^{abc}$ -mal then
21:      Aktualisiere  $\mathbf{w}_i \leftarrow random()$ 
22:    end if
23:  end for
24: end while
25: return  $\operatorname{argmax}(f(\mathbf{w}_i), \forall \mathbf{w}_i \in Pop)$ 

```

A2 Spezifikation der Demontageoperationen

MD4K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg
a1	q1.1	0,4	0,5	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q1.2	0,4	0,7	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q1.3	0,4	1	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a2	q1.1	0,5	0,75	4	100%	0,8	1	1,7	90%	-	0,8	-	100%
	q1.2	0,5	0,6	4	100%	0,8	1,2	1,7	60%	-	-	-	-
	q1.3	0,5	1,5	4	100%	0,8	1,5	1,7	20%	-	-	-	-
a3	q1.1	0,4	0,5	3	100%	0,8	1,2	3	90%	-	-	-	-
	q1.2	0,4	1	3	100%	0,8	1,6	3	60%	-	-	-	-
	q1.3	0,4	1	3	100%	0,8	2	3	60%	-	-	-	-
a4	q1.1	0,2	0,5	2	100%	0,8	1,2	2,8	90%	-	-	-	-
	q1.2	0,2	0,5	2	100%	0,8	1,5	2,8	90%	-	-	-	-
	q1.3	0,2	1	2	100%	0,8	1,8	2,8	30%	-	-	-	-
a5	q1.1	0,4	0,5	1,4	100%	1,1	1,2	3,4	90%	-	0,8	-	100%
	q1.2	0,4	0,5	1,4	100%	1,1	2,3	3,4	30%	-	0,8	-	100%
	q1.3	0,4	0,8	1,4	100%	1,1	2,2	3,4	60%	-	-	-	-

Abbildung A2.1: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] MD4K

LS6K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg
a1	q4.1	0,5	0,75	3,5	100%	0,8	1	4	90%	-	-	-	-
	q4.2	0,5	0,8	3,5	100%	0,8	1,2	4	60%	-	-	-	-
	q4.3	0,5	1,5	3,5	100%	0,8	2,8	4	30%	-	-	-	-
a2	q4.1	0,4	0,5	1,2	100%	0,7	1,2	2,8	90%	-	0,9	-	100%
	q4.2	0,4	0,6	1,2	100%	0,7	1,4	2,8	80%	-	0,9	-	100%
	q4.3	0,4	0,8	1,2	100%	0,7	2	2,8	80%	-	-	-	-
a3	q4.1	0,4	0,5	3	100%	0,8	1,2	3	90%	-	0,9	-	100%
	q4.2	0,4	1	3	100%	0,8	1,6	3	60%	-	-	-	-
	q4.3	0,4	2	3	100%	0,8	2	3	60%	-	-	-	-
a4	q4.1	0,5	0,6	4	100%	0,7	1,1	3,5	90%	-	0,8	-	100%
	q4.2	0,5	0,8	4	100%	0,7	1,3	3,5	60%	-	0,8	-	100%
	q4.3	0,5	1,1	4	100%	0,7	1,3	3,5	20%	-	-	-	-

Abbildung A2.2: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS6K

LS5K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg
a1	q3.1	0,4	0,5	1,4	100%	0,8	1	2	90%	-	0,7	-	100%
	q3.2	0,4	0,6	1,4	100%	0,8	1,2	2	90%	-	0,7	-	100%
	q3.3	0,4	1,1	1,4	100%	0,8	1,5	2	40%	-	-	-	-
a2	q3.1	0,4	0,6	3	100%	0,8	1,2	2,8	90%	-	-	-	-
	q3.2	0,4	0,7	3	100%	0,8	1,5	2,8	90%	-	-	-	-
	q3.3	0,4	1,2	3	100%	0,8	1,8	2,8	80%	-	-	-	-
a3	q3.1	0,5	0,6	1,5	100%	0,5	1,2	3,4	90%	-	0,8	-	100%
	q3.2	0,5	0,6	1,5	100%	0,5	2,3	3,4	60%	-	0,8	-	100%
	q3.3	0,5	1	1,5	100%	0,5	1,7	3,4	70%	-	-	-	-

Abbildung A2.3: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS5K

LS4K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}
a1	q2.1	0,5	0,6	1,5	100%	0,8	1	2	90%	-	0,8	-	100%
	q2.2	0,5	0,6	1,5	100%	0,8	1,1	2	80%	-	-	-	-
	q2.3	0,5	1	1,5	100%	0,8	1,8	2	20%	-	-	-	-
a2	q2.1	0,5	0,6	4	100%	0,7	1,1	1,6	90%	-	0,8	-	100%
	q2.2	0,5	0,8	4	100%	0,7	1,3	1,6	60%	-	0,8	-	100%
	q2.3	0,5	1,1	4	100%	0,7	1,4	1,6	30%	-	-	-	-
a3	q2.1	0,3	0,5	3	100%	0,8	1,2	3	90%	-	-	-	-
	q2.2	0,3	1	3	100%	0,8	1,6	3	70%	-	-	-	-
	q2.3	0,3	1	3	100%	0,8	2	3	70%	-	-	-	-

Abbildung A2.4: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] LS4K

MD5K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	P_{erfolg}
a1	q5.1	0,4	0,5	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.2	0,4	0,6	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,8	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.4	0,4	1	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1,2	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a2	q5.1	0,5	0,7	3	100%	0,8	1	3,5	90%	-	0,8	-	100%
	q5.2	0,5	0,7	3	100%	0,8	1,2	3,5	90%	-	0,8	-	100%
	q5.3	0,5	0,8	3	100%	0,8	1,4	3,5	80%	-	-	-	-
	q5.4	0,8	1,4	3	100%	0,8	2,5	3,5	30%	-	-	-	-
	q5.5	0,8	1,5	3	100%	0,8	3	3,5	20%	-	-	-	-
a3	q5.1	0,4	0,8	1,3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.2	0,4	0,8	1,3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,8	1,3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.4	0,4	1,1	1,3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1,2	1,3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a4	q5.1	0,4	0,5	1,4	100%	-	-	-	-	-	0,8	-	100%
	q5.2	0,4	0,5	1,4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,8	1,4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.4	0,4	0,8	1,4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.5	0,4	0,8	1,4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a5	q5.1	0,4	0,5	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.2	0,4	0,6	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,8	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.4	0,4	1	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1,4	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a6	q5.1	0,4	0,6	3	100%	0,8	1	4	90%	-	0,8	-	100%
	q5.2	0,4	0,6	3	100%	0,8	1,2	4	90%	-	0,8	-	100%
	q5.3	0,4	0,7	3	100%	0,8	1,6	4	80%	-	-	-	-
	q5.4	0,4	1,1	3	100%	0,8	2	4	50%	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1,5	3	100%	0,8	3	4	30%	-	-	-	-
a7	q5.1	0,4	0,5	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.2	0,4	0,5	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,6	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.4	0,4	0,8	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1,2	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a8	q5.1	0,4	0,5	2	100%	0,8	1,2	2,5	90%	-	0,7	-	100%
	q5.2	0,4	0,8	2	100%	0,8	1,5	2,5	90%	-	-	-	-
	q5.3	0,4	0,8	2	100%	0,8	1,8	2,5	70%	-	-	-	-
	q5.4	0,4	1,1	2	100%	0,8	2	2,5	50%	-	-	-	-
	q5.5	0,4	1	2	100%	0,8	2,2	2,5	20%	-	-	-	-

Abbildung A2.5: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] MD5K

HD6K		MS				FRS				AS			
		t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg	t_{min}	t_{modus}	t_{max}	Perfolg
a1	q6.1	0,4	0,5	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.2	0,4	0,7	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.3	0,4	1,5	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.4	0,4	2	4	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a2	q6.1	0,5	0,6	4	100%	0,8	1	2,9	90%	-	-	-	-
	q6.2	0,5	0,75	4	100%	0,8	1,2	2,9	80%	-	-	-	-
	q6.3	0,5	1,7	4	100%	0,8	1,5	2,9	30%	-	-	-	-
	q6.4	0,5	2,2	4	100%	0,8	1,8	2,9	30%	-	-	-	-
a3	q6.1	0,4	0,5	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.2	0,4	0,5	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.3	0,4	0,6	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.4	0,4	0,8	1,5	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a4	q6.1	0,3	0,6	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.2	0,3	0,6	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.3	0,3	0,9	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.4	0,3	1	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a5	q6.1	1	1,1	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.2	1	1,3	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.3	1	1,3	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.4	1	1,5	3	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a6	q6.1	0,5	0,6	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.2	0,5	0,6	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.3	0,5	0,7	1,5	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.4	0,5	0,8	1,5	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a7	q6.1	0,4	0,5	1,8	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.2	0,4	0,5	1,8	100%	-	-	-	-	-	0,7	-	100%
	q6.3	0,4	0,7	1,8	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.4	0,4	0,9	1,8	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a8	q6.1	0,4	0,5	1,5	100%	0,8	1,2	3,5	90%	-	0,8	-	100%
	q6.2	0,4	0,5	1,5	100%	0,8	1,6	3,5	90%	-	-	-	-
	q6.3	0,4	0,6	1,5	100%	0,8	2,0	3,5	60%	-	-	-	-
	q6.4	0,4	0,8	1,5	100%	0,8	2,5	3,5	30%	-	-	-	-
a9	q6.1	0,3	0,5	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.2	0,3	0,5	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.3	0,3	0,6	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
	q6.4	0,3	1	2	100%	-	-	-	-	-	-	-	-
a10	q6.1	0,5	0,6	1,4	100%	0,8	1,1	3	90%	-	0,8	-	100%
	q6.2	0,5	0,7	1,4	100%	0,8	2	3	80%	-	-	-	-
	q6.3	0,5	0,7	1,4	100%	0,8	2,3	3	60%	-	-	-	-
	q6.4	0,5	0,8	1,4	100%	0,8	2,7	3	30%	-	-	-	-
a11	q6.1	0,3	0,5	1,5	100%	0,8	1,2	3,5	90%	-	0,8	-	100%
	q6.2	0,3	0,5	1,5	100%	0,8	2,3	3,5	90%	-	-	-	-
	q6.3	0,3	0,6	1,5	100%	0,8	2,3	3,5	60%	-	-	-	-
	q6.4	0,3	1	1,5	100%	0,8	3	3,5	20%	-	-	-	-

Abbildung A2.6: Ausführungszeiten [min] und Erfolgswahrscheinlichkeiten [%] HD6K

A3 Untersuchung des Transportsystems

Im Hauptteil dieser Arbeit wird das Systemlayout und das Transportkonzept bewusst vernachlässigt. Um diese Lücke zu schließen, erfolgt in diesem Abschnitt eine grobe Untersuchung eines FTF-gebundenen Materialtransports (Fahrerlose Transportfahrzeuge). Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten studentischen Arbeit A_Hirsch 2024 auf.

Für die Untersuchung wird konkret die Transportkapazität über die Anzahl der autonom-fahrenden FTF variiert und der Einfluss auf die Systemleistung betrachtet. Die Transportgeschwindigkeit v_{tr} der FTF wird mit 60 m/min auf einen industrieüblichen Wert gesetzt¹. Die Erprobung erfolgt basierend auf dem Mix-M5R10A16-Anwendungsfall, vgl. Abbildung A4.1. Vereinfachend und für eine gezielte Erhöhung des Transportaufwands zwischen Stationen unterschiedlichen Typs, werden alle Stationen im Layout nach Stationstyp räumlich zusammengefasst, vgl. Abbildung A3.1.

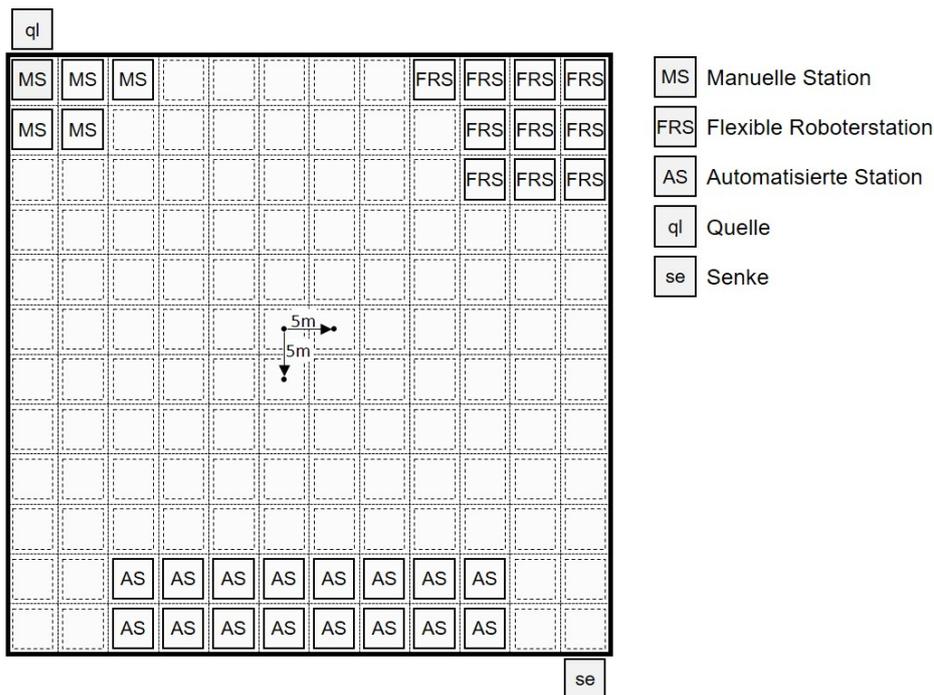


Abbildung A3.1: Schematische Darstellung des Systemlayouts – Verortung der Stationen, Quellen und Senken (in Anlehnung an A_Hirsch 2024)

Wie bereits Tabelle 2.1 in Abschnitt 2.3.3.1 nach Ciupek 2006, S. 69 unterstreicht, ist bei einer losen Stationsverkettung im Matrix- bzw. Netzlayout mit einem erhöhten Transportaufwand zu rechnen. So geht der individuelle Transport aller Haupt- und Subaufträge sowie

¹ In Ullrich 2014 werden Geschwindigkeitswerte von 0,5 - 2,7 m/s geführt. 60m/min (1 m/s) stellt dabei eine konservative Schätzung innerhalb dieser Spanne dar.

der Komponenten mit einer erhöhten Anzahl an Transportaufträgen einher. Um dem entgegenzuwirken, werden neben einer Standardkonfiguration des Transportkonzepts zusätzliche exemplarische Maßnahmen wie die Bildung von Transportchargen (engl. Batches) sowie ein Milkrun-System für Senkenfahrten erprobt. Durch Kombination der Maßnahmen ergeben sich folgende Konfigurationen für das Transportkonzept:

1. Standardkonfiguration (**std**): Individueller Transport aller Transportaufträge und Komponenten mit $k_{cw} = 0,5$.
2. Batchbildung (**bat**): Zusammenfassung von Transportaufträgen mit gleicher Ausgangs- und Zielstation und Transport in Zweier-Batches. Limitierung der Wartezeit eines Auftrags im Ausgangspuffer auf 15 min ($k_{cw} = 0,5$).
3. Milkrun (**mlk**): Organisation des Abtransports von zerlegten Komponenten zur Senke in Milkrun-Fahrten. Zerlegte Komponenten werden in den Stationsausgangspuffern gesammelt. Drei dedizierte Milkrun-FTF fahren die Stationen jeweils auf festen Routenzügen ab mit der Senke als Start und Ziel und sammeln die auf den Abtransport wartenden Komponenten ein ($k_{cw} = 0,5$).
4. Kombination aus Konfiguration 2 und 3 (**bat-mlk**): Konsolidierter Transport in Zweier-Batches und Milkrunfahrten mit 3 Milkrun-FTF ($k_{cw} = 0,5$).
5. Konfiguration 4 mit erhöhtem Umlaufbestand $k_{cw} = 1$ (**bat-mlk-wip1**).

Abbildung A3.2 zeigt die Mittelwerte aus 50 replizierten Simulationsläufen für die Auftragsdurchlaufzeit (a) und die Systemausbringung (b) bei unikriteriellem Einsatz der NPA-Regel. Als Benchmark (**bench**) für die Verfahren dient eine Transportkonfiguration mit 1000 FTF, d.h. quasi unbegrenzter Transportkapazität. Für **bench** konvergiert die Systemleistung und Durchlaufzeit bei einer mittleren Ausbringung von 1482,6 Aufträgen und einer mittleren Durchlaufzeit von 48,02 min. Zunächst zeigt sich der weitreichende Einfluss, den der Materialflusstransport auf die Ausbringung und die Durchlaufzeit nimmt.

Bei Einsatz der Standardkonfiguration (**std**) wächst die Ausbringung proportional mit der Anzahl der FTF, dennoch beträgt die Systemausbringung selbst für 30 FTF nur um die 40 % von der Benchmark-Ausbringung. Auch für den batchweisen-Transport (**bat**) zeigt sich ein linearer Zusammenhang zur FTF-Anzahl, die Ausbringung steigt jedoch schneller und die Durchlaufzeit sinkt auf ein günstigeres Niveau. Noch bessere Ergebnisse lassen sich durch Implementierung des Milkrun-Systems erzielen, das durch Übernahme der transportintensiven Senkenfahrten freie Kapazitäten für den Quellen-Stations- und Station-Stations-Transport schafft. **mlk** erzielt so die niedrigste Durchlaufzeit im Betrachtungsbereich und auch die Ausbringung beginnt bei gut 1200 abgeschlossenen Aufträgen zu konvergieren. Die Kombination

bat-mlk beschleunigt den Anstieg der Systemleistung bzw. die Reduktion der Auftragsdurchlaufzeit, dafür ergibt sich jedoch ein Plateau bereits um die 14 bis 20 FTF, in dem die Zielgrößen konvergieren. Hierbei fällt die Systemausbringung deutlich geringer als für **mlk** und **bench** aus. Durch die Erhöhung des Umlaufbestands **bat-mlk-wip1** kann dieses Plateau verschoben werden. Das wirkt sich positiv auf die Ausbringung aus. Die Durchlaufzeit nach Konvergenz steigt gegenüber **bat-mlk** jedoch massiv an.

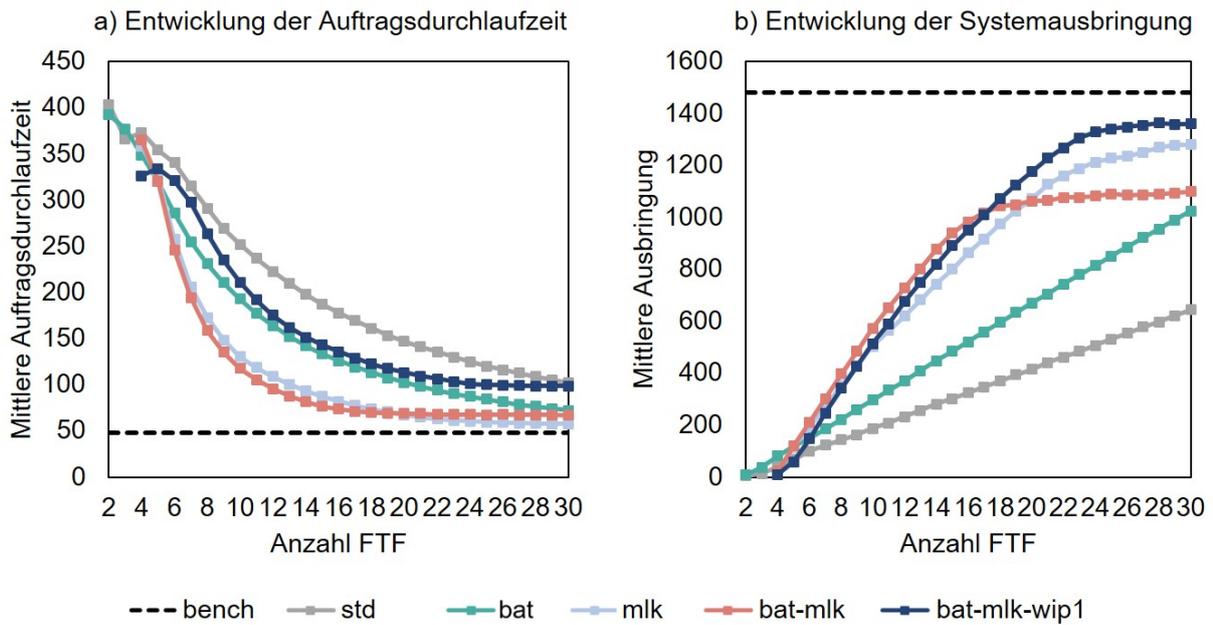


Abbildung A3.2: Vergleich der Konfigurationen des Transportkonzepts bei variierender FTF-Anzahl anhand der Entwicklung der Auftragsdurchlaufzeit (a) und der Systemausbringung (b) (in Anlehnung an A_Hirsch 2024)

A4 Definition der einperiodigen Anwendungsfälle

MD4K M3R3A2		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	0	0	0							
	LS5K	0	0	0							
	LS6K	0	0	0							
	MD4K	400	150	200							
	MD5K	0	0	0	0	0					
	HD6K	0	0	0	0						
MS	3	FRS	3	DV1	1	DV2	1	DV3	0	DV4	0

MIX M12R12A6		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	80	50	100							
	LS5K	80	60	60							
	LS6K	130	70	80							
	MD4K	90	120	50							
	MD5K	80	110	30	50	50					
	HD6K	80	110	30	100						
MS	12	FRS	12	DV1	2	DV2	2	DV3	1	DV4	1

LS6K M3R3A2		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	0	0	0							
	LS5K	0	0	0							
	LS6K	300	250	100							
	MD4K	0	0	0							
	MD5K	0	0	0	0	0					
	HD6K	0	0	0	0						
MS	3	FRS	3	DV1	1	DV2	1	DV3	0	DV4	0

MIX M5R10A16		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	50	50	50							
	LS5K	50	50	50							
	LS6K	50	50	50							
	MD4K	50	50	50							
	MD5K	32	32	32	32	32					
	HD6K	35	35	35	35						
MS	5	FRS	10	DV1	4	DV2	4	DV3	4	DV4	4

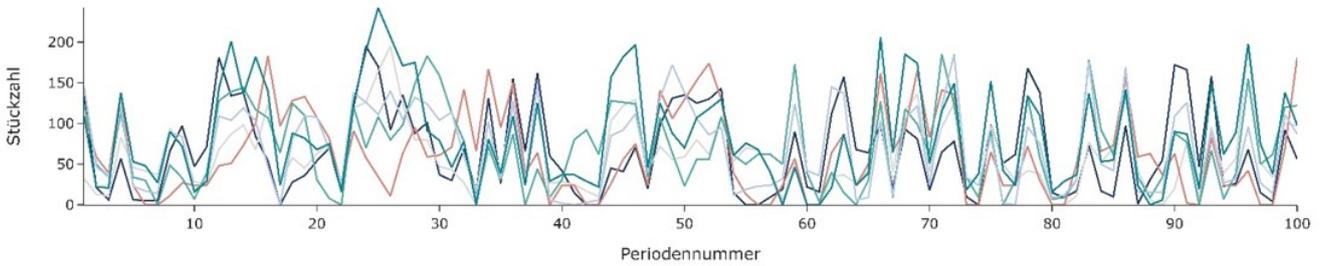
HD6K M3R3A2		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	0	0	0							
	LS5K	0	0	0							
	LS6K	0	0	0							
	MD4K	0	0	0							
	MD5K	0	0	0	0	0					
	HD6K	150	100	50	50						
MS	3	FRS	3	DV1	1	DV2	1	DV3	0	DV4	0

MIX M20R20A20		Qualitätsklassenindex									
		1	2	3	4	5					
Produkttyp	LS4K	280	150	100							
	LS5K	180	160	80							
	LS6K	130	270	80							
	MD4K	250	120	50							
	MD5K	180	110	130	50	80					
	HD6K	180	210	30	100						
MS	20	FRS	20	DV1	7	DV2	7	DV3	3	DV4	3

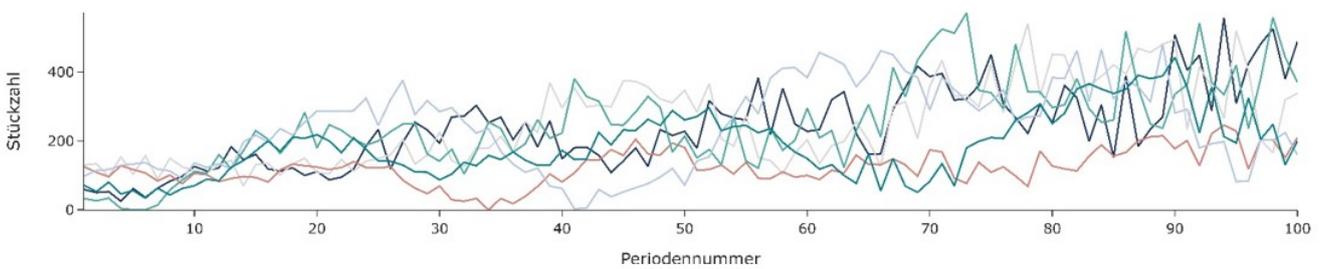
Abbildung A4.1: Definition der sechs Anwendungsfälle – Zusammensetzung der Produktionsprogramme und Anzahl der Demontageressourcen je Typ im Produktionsprogramm

A5 Beschreibung der mehrperiodigen Produktionsprogramme

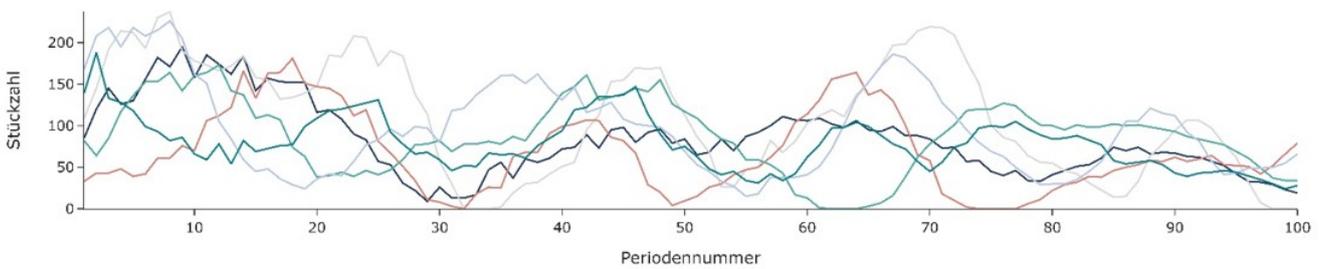
a) Hoch volatil



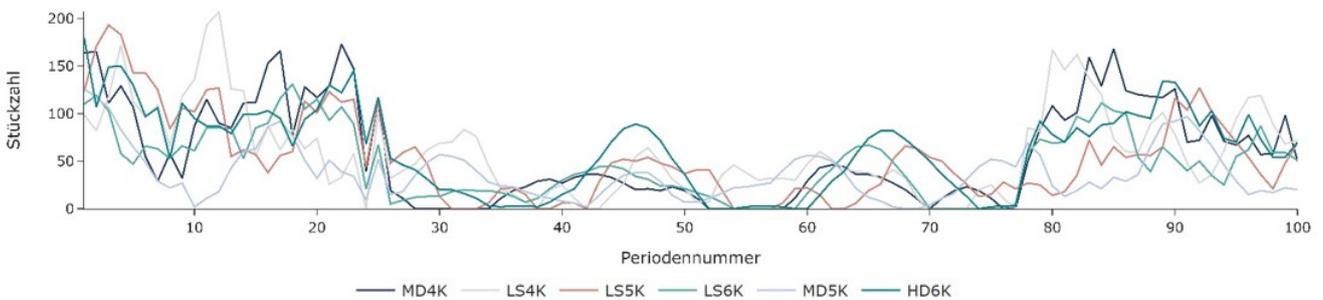
b) Stückzahlanstieg



c) Stückzahlrückgang



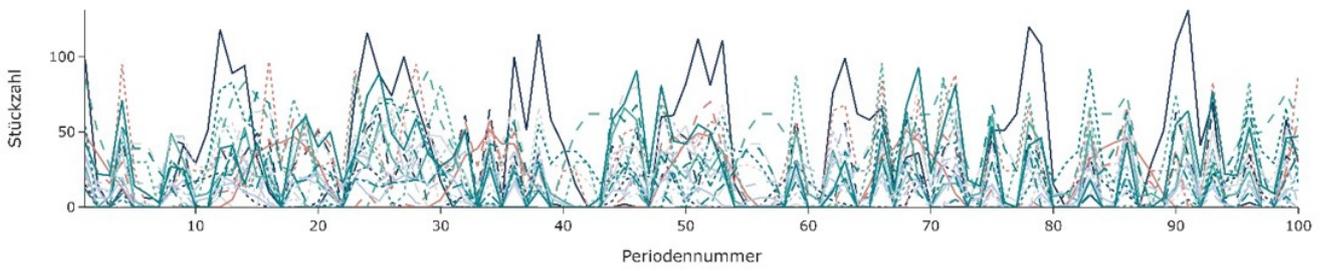
d) U-Verlauf



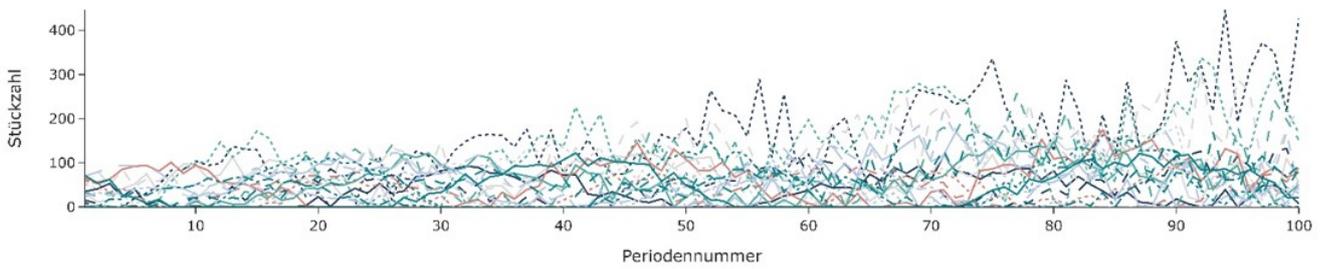
— MD4K — LS4K — LS5K — LS6K — MD5K — HD6K

Abbildung A5.1: Stückzahlverläufe der fünf Anwendungsfälle (Produktvariantebene)

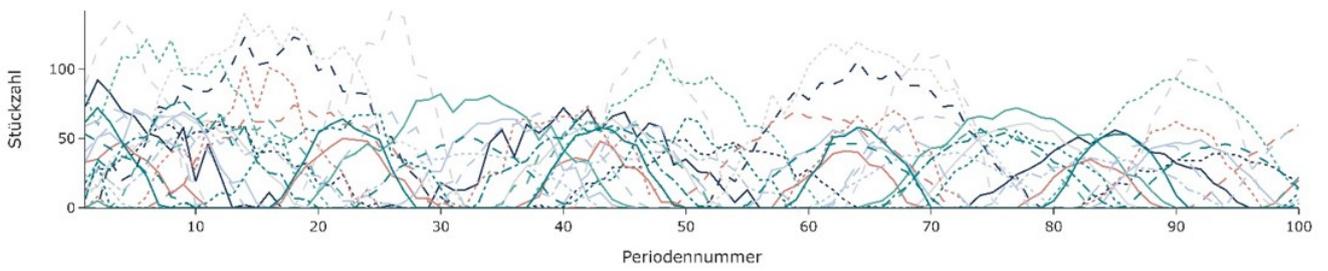
a) Hoch volatil



b) Stückzahlanstieg



c) Stückzahlrückgang



d) U-Verlauf

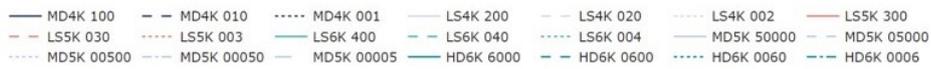
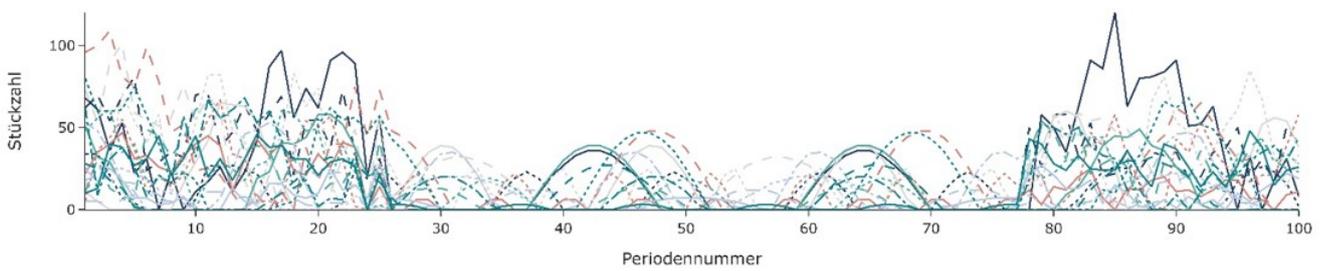


Abbildung A5.2: Stückzahlverläufe der fünf Anwendungsfälle (Qualitätsklassenebene)

A6 Ergänzende Ergebnisse der Prioritätsregeluntersuchung

Tabelle A6.1: Entwicklung der Systemausbringung in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 1) – Mittelwerte aus 50 Replikationen

					HD6K-M3R3A2	LS6K-M3R3A2	MD4K-M3R3A2	mix-M12R12A6	mix-M20R20A20	mix-M5R10A16
NPA	KOZ	NTA	HEW	NSK	Mittlere Ausbringung					
1	0	0	0	0	476,46	691,70	1016,14	2757,78	5646,12	1504,16
0,75	0,25	0	0	0	463,84	731,84	1015,90	2837,56	5776,44	1512,18
0,75	0	0,25	0	0	457,24	518,46	1020,48	2475,92	4964,26	1437,82
0,75	0	0	0,25	0	487,92	706,32	1058,90	2898,66	5854,04	1523,18
0,75	0	0	0	0,25	473,40	705,36	1022,24	2755,90	5623,76	1496,36
0,5	0,5	0	0	0	408,88	651,72	908,36	2422,10	5081,08	1334,22
0,5	0,25	0,25	0	0	414,66	553,38	992,94	2415,98	5180,28	1363,70
0,5	0,25	0	0,25	0	455,92	664,78	1030,78	2570,16	5555,60	1522,96
0,5	0,25	0	0	0,25	456,66	735,34	1017,38	2849,26	5773,04	1515,90
0,5	0	0,5	0	0	414,18	521,08	1017,14	2467,08	4784,92	1032,16
0,5	0	0,25	0,25	0	436,38	527,10	1060,74	2427,08	5020,58	1406,46
0,5	0	0,25	0	0,25	463,90	519,84	1031,32	2507,20	5039,22	1381,98
0,5	0	0	0,5	0	487,58	697,00	1065,80	2803,76	5826,80	1460,82
0,5	0	0	0,25	0,25	484,14	709,74	1064,96	2910,66	5837,50	1528,26
0,5	0	0	0	0,5	474,28	665,70	1013,98	2515,68	5038,28	1504,28
0,25	0,75	0	0	0	410,86	516,84	748,48	2181,98	4321,38	1063,60
0,25	0,5	0,25	0	0	341,44	391,96	784,82	1800,18	3417,76	867,28
0,25	0,5	0	0,25	0	416,12	511,50	806,58	2155,96	4379,48	1042,84
0,25	0,5	0	0	0,25	406,26	660,08	866,40	2379,08	4872,50	1218,72
0,25	0,25	0,5	0	0	355,16	494,26	884,38	1984,04	3870,68	970,14
0,25	0,25	0,25	0,25	0	340,14	440,06	764,04	1888,66	3608,06	925,76
0,25	0,25	0,25	0	0,25	412,60	617,80	986,34	2424,22	5313,30	1302,90
0,25	0,25	0	0,5	0	419,94	525,08	806,86	2167,28	4385,84	1044,90
0,25	0,25	0	0,25	0,25	412,30	635,54	892,28	2441,86	5008,96	1388,28
0,25	0,25	0	0	0,5	456,58	682,38	903,82	1904,74	4621,76	1520,64
0,25	0	0,75	0	0	412,32	519,50	1013,16	2456,24	4770,10	1034,70
0,25	0	0,5	0,25	0	396,94	504,98	1001,48	2202,44	4700,70	1012,60
0,25	0	0,5	0	0,25	415,54	511,02	1021,68	2451,18	4776,48	1088,60
0,25	0	0,25	0,5	0	364,72	471,44	941,10	2022,54	4207,08	934,04
0,25	0	0,25	0,25	0,25	441,12	524,54	1071,56	2501,12	5129,70	1295,44
0,25	0	0,25	0	0,5	463,62	385,34	869,78	2415,72	4089,26	1341,30
0,25	0	0	0,75	0	448,38	573,00	980,30	2363,02	4970,52	1088,54
0,25	0	0	0,5	0,25	480,12	703,36	1059,78	2769,60	5828,18	1402,02
0,25	0	0	0,25	0,5	469,86	621,36	999,20	2764,94	5379,26	1521,10
0,25	0	0	0	0,75	266,62	373,56	515,76	1677,44	3341,62	1423,14

Tabelle A6.2: Entwicklung der Systemausbringung in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 2) – Mittelwerte aus 50 Replikationen

Gewichtungs- konfiguration					HD6K-M3R3A2	LS6K-M3R3A2	MD4K-M3R3A2	mix-M12R12A6	mix-M20R20A20	mix-M5R10A16
NPA	KOZ	NTA	HEW	NSK	Mittlere Ausbringung					
0	1	0	0	0	328,44	408,64	584,98	1648,58	3039,82	728,92
0	0,75	0,25	0	0	328,74	356,88	588,80	1571,02	2852,90	700,12
0	0,75	0	0,25	0	329,46	416,76	566,48	1638,76	3011,66	716,82
0	0,75	0	0	0,25	399,14	519,06	804,70	1489,90	3873,60	1018,20
0	0,5	0,5	0	0	328,16	355,40	593,14	1564,42	2822,46	693,92
0	0,5	0,25	0,25	0	327,68	354,16	581,86	1559,58	2836,00	689,52
0	0,5	0,25	0	0,25	335,86	392,64	795,50	1856,34	3539,92	845,28
0	0,5	0	0,5	0	329,24	408,50	569,46	1619,08	3008,74	710,96
0	0,5	0	0,25	0,25	408,24	499,08	796,30	1481,26	3854,34	981,00
0	0,5	0	0	0,5	397,70	611,50	811,40	1475,38	3879,56	1086,82
0	0,25	0,75	0	0	329,68	358,28	597,46	1563,64	2838,90	700,24
0	0,25	0,5	0,25	0	324,44	352,58	580,98	1559,94	2832,06	693,54
0	0,25	0,5	0	0,25	351,98	448,46	808,00	1964,14	3651,52	871,76
0	0,25	0,25	0,5	0	329,02	351,36	578,82	1559,52	2815,70	687,42
0	0,25	0,25	0,25	0,25	336,60	459,44	764,70	1868,56	3560,66	835,64
0	0,25	0,25	0	0,5	430,00	539,36	865,78	1784,12	4347,26	1086,40
0	0,25	0	0,75	0	330,94	410,24	565,34	1613,26	2995,60	709,96
0	0,25	0	0,5	0,25	410,28	494,32	795,58	1471,40	3846,96	954,36
0	0,25	0	0,25	0,5	399,04	596,30	798,62	1474,14	3889,42	1077,34
0	0,25	0	0	0,75	346,22	444,76	629,70	1464,80	3558,50	1448,72
0	0	1	0	0	345,58	445,72	663,40	1764,44	3308,58	843,62
0	0	0,75	0,25	0	325,38	356,46	562,06	1565,62	2821,24	714,04
0	0	0,75	0	0,25	406,32	369,22	687,42	2202,00	3918,92	1079,88
0	0	0,5	0,5	0	327,82	359,46	561,02	1565,04	2813,90	717,24
0	0	0,5	0,25	0,25	387,30	473,78	942,20	2151,52	4466,60	940,68
0	0	0,5	0	0,5	406,10	369,36	687,92	2201,58	3931,70	1085,92
0	0	0,25	0,75	0	325,12	356,00	559,48	1564,82	2811,56	710,22
0	0	0,25	0,5	0,25	355,54	448,72	921,02	1930,22	3981,84	871,34
0	0	0,25	0,25	0,5	432,28	391,96	841,30	2081,06	4495,94	1153,96
0	0	0,25	0	0,75	297,36	274,48	507,80	1449,68	2646,14	1184,22
0	0	0	1	0	334,38	372,98	571,98	1578,88	2884,32	740,88
0	0	0	0,75	0,25	412,88	534,18	806,70	1481,22	3858,40	978,76
0	0	0	0,5	0,5	418,20	592,36	831,22	1475,04	3895,80	1162,20
0	0	0	0,25	0,75	263,42	364,58	512,02	1429,78	3256,46	1389,80
0	0	0	0	1	257,00	360,42	504,60	1431,98	3247,52	1389,88
Zufallsallokation					337,82	404,38	611,08	1887,78	3629,34	892,86

Tabelle A6.3: Entwicklung der gemittelten Auftragsdurchlaufzeit in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 1) – Mittelwerte aus 50 Replikationen

Gewichtungs- konfiguration					HD6K-M3R3A2	LS6K-M3R3A2	MD4K-M3R3A2	mix-M12R12A6	mix-M20R20A20	mix-M5R10A16
NPA	KOZ	NTA	HEW	NSK	Mittlere gemittelte Durchlaufzeit					
1	0	0	0	0	33,04	24,64	21,87	25,21	24,57	47,85
0,75	0,25	0	0	0	33,52	24,66	21,06	24,54	24,00	47,44
0,75	0	0,25	0	0	32,92	29,23	22,34	26,19	26,55	49,24
0,75	0	0	0,25	0	32,41	24,23	21,05	24,09	23,72	47,49
0,75	0	0	0	0,25	33,02	24,35	21,09	25,04	24,35	48,23
0,5	0,5	0	0	0	38,39	27,21	25,01	28,92	27,85	53,22
0,5	0,25	0,25	0	0	36,56	27,63	23,46	28,04	26,82	51,36
0,5	0,25	0	0,25	0	34,97	26,89	20,98	27,34	25,57	46,53
0,5	0,25	0	0	0,25	33,87	25,23	20,37	24,31	23,78	47,35
0,5	0	0,5	0	0	36,71	29,07	22,69	26,28	27,33	62,59
0,5	0	0,25	0,25	0	35,06	29,00	20,65	27,04	26,49	49,95
0,5	0	0,25	0	0,25	32,08	28,41	22,08	25,56	25,93	51,11
0,5	0	0	0,5	0	32,73	24,71	20,42	24,85	23,83	47,98
0,5	0	0	0,25	0,25	32,48	24,69	20,37	23,94	23,76	47,35
0,5	0	0	0	0,5	33,53	26,01	21,56	27,89	27,72	48,14
0,25	0,75	0	0	0	38,76	31,14	28,85	31,83	32,29	65,37
0,25	0,5	0,25	0	0	38,34	36,05	30,62	34,24	37,06	73,87
0,25	0,5	0	0,25	0	38,40	31,13	29,82	32,26	31,90	66,43
0,25	0,5	0	0	0,25	38,90	27,96	25,37	29,26	28,74	58,36
0,25	0,25	0,5	0	0	38,19	30,35	28,17	32,19	34,83	67,33
0,25	0,25	0,25	0,25	0	38,97	32,61	31,92	33,01	35,83	68,07
0,25	0,25	0,25	0	0,25	36,36	24,42	24,00	27,45	26,50	51,29
0,25	0,25	0	0,5	0	38,07	30,71	29,70	32,04	31,92	65,30
0,25	0,25	0	0,25	0,25	37,85	28,05	23,95	28,66	27,99	50,25
0,25	0,25	0	0	0,5	34,17	28,15	29,55	32,31	28,19	47,31
0,25	0	0,75	0	0	36,85	29,15	22,81	26,36	27,41	62,66
0,25	0	0,5	0,25	0	37,95	29,74	21,02	28,70	27,79	62,71
0,25	0	0,5	0	0,25	36,13	28,16	22,67	25,83	26,91	59,32
0,25	0	0,25	0,5	0	38,91	31,28	21,54	30,29	29,26	65,00
0,25	0	0,25	0,25	0,25	34,29	28,71	20,13	26,01	25,88	51,65
0,25	0	0,25	0	0,5	31,79	35,66	27,16	26,01	31,79	52,51
0,25	0	0	0,75	0	35,36	28,46	22,90	29,16	27,51	61,80
0,25	0	0	0,5	0,25	33,11	25,84	20,47	25,21	23,70	49,14
0,25	0	0	0,25	0,5	34,16	27,01	22,34	25,41	26,26	47,61
0,25	0	0	0	0,75	55,66	42,20	45,47	40,92	41,90	51,16

Tabelle A6.4: Entwicklung der gemittelten Auftragsdurchlaufzeit in Abhängigkeit von der Prioritätsregelkonfiguration für sechs verschiedene Anwendungsfälle (Teil 2) – Mittelwerte aus 50 Replikationen

Gewichtungs- konfiguration					HD6K-M3R3A2	LS6K-M3R3A2	MD4K-M3R3A2	mix-M12R12A6	mix-M20R20A20	mix-M5R10A16
NPA	KOZ	NTA	HEW	NSK	Mittlere gemittelte Durchlaufzeit					
0	1	0	0	0	48,85	42,62	38,91	43,08	46,64	93,56
0	0,75	0,25	0	0	39,40	37,42	33,22	36,65	40,62	83,25
0	0,75	0	0,25	0	48,65	41,43	40,44	43,36	47,12	95,09
0	0,75	0	0	0,25	40,95	32,44	29,22	41,12	34,34	68,05
0	0,5	0,5	0	0	39,47	37,54	33,07	36,51	40,69	83,33
0	0,5	0,25	0,25	0	39,40	37,59	33,51	36,61	40,51	83,61
0	0,5	0,25	0	0,25	39,05	35,63	30,23	33,32	36,15	73,40
0	0,5	0	0,5	0	48,75	42,24	40,22	43,78	47,06	95,92
0	0,5	0	0,25	0,25	40,32	33,38	30,10	41,40	34,62	70,44
0	0,5	0	0	0,5	40,88	29,77	29,20	41,43	33,85	64,34
0	0,25	0,75	0	0	39,46	37,16	32,78	36,43	40,41	82,30
0	0,25	0,5	0,25	0	39,73	37,63	33,60	36,49	40,43	82,38
0	0,25	0,5	0	0,25	38,34	31,85	30,01	32,03	35,42	71,87
0	0,25	0,25	0,5	0	39,32	37,64	33,71	36,46	40,65	83,16
0	0,25	0,25	0,25	0,25	38,87	30,67	31,43	32,77	35,72	72,57
0	0,25	0,25	0	0,5	34,65	26,40	27,32	34,21	30,01	59,97
0	0,25	0	0,75	0	48,46	42,16	40,47	44,03	47,37	96,15
0	0,25	0	0,5	0,25	40,29	33,77	30,31	41,71	34,83	72,35
0	0,25	0	0,25	0,5	41,20	29,72	30,53	41,46	33,80	65,05
0	0,25	0	0	0,75	45,83	36,28	38,13	42,68	39,30	49,75
0	0	1	0	0	39,48	32,45	30,05	33,57	36,14	71,35
0	0	0,75	0,25	0	39,82	37,27	34,53	36,23	40,35	80,57
0	0	0,75	0	0,25	36,80	36,98	35,16	28,72	32,33	59,64
0	0	0,5	0,5	0	39,66	37,07	34,55	36,23	40,44	80,11
0	0	0,5	0,25	0,25	38,41	30,61	21,69	29,13	28,82	64,61
0	0	0,5	0	0,5	36,84	36,89	35,08	28,77	32,20	59,32
0	0	0,25	0,75	0	39,83	37,49	34,65	36,36	40,54	81,15
0	0	0,25	0,5	0,25	39,08	31,74	22,60	31,16	30,06	67,93
0	0	0,25	0,25	0,5	35,00	34,83	32,98	29,23	29,34	54,85
0	0	0,25	0	0,75	52,21	52,29	47,75	47,20	51,66	59,32
0	0	0	1	0	48,25	47,79	38,84	45,04	49,19	91,58
0	0	0	0,75	0,25	39,72	31,83	31,60	41,25	34,28	69,90
0	0	0	0,5	0,5	39,30	29,04	33,53	41,36	33,63	58,79
0	0	0	0,25	0,75	59,32	44,05	46,45	44,90	43,16	52,37
0	0	0	0	1	60,29	44,61	47,00	45,14	43,38	52,40
Zufallsallokation					48,31	45,75	37,89	38,13	39,94	77,96

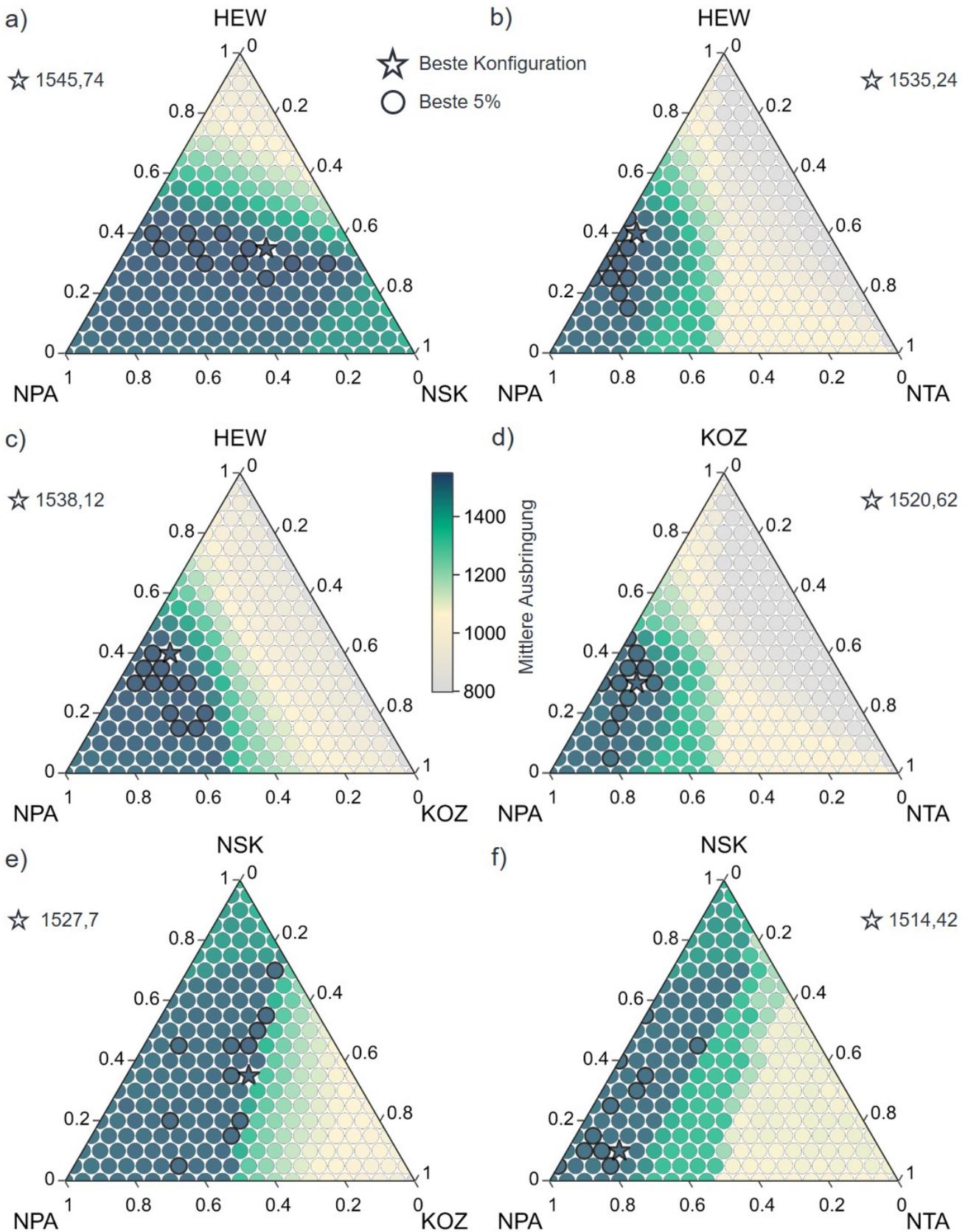


Abbildung A6.1: Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den Mix-M5R10A16-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsva-riation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA

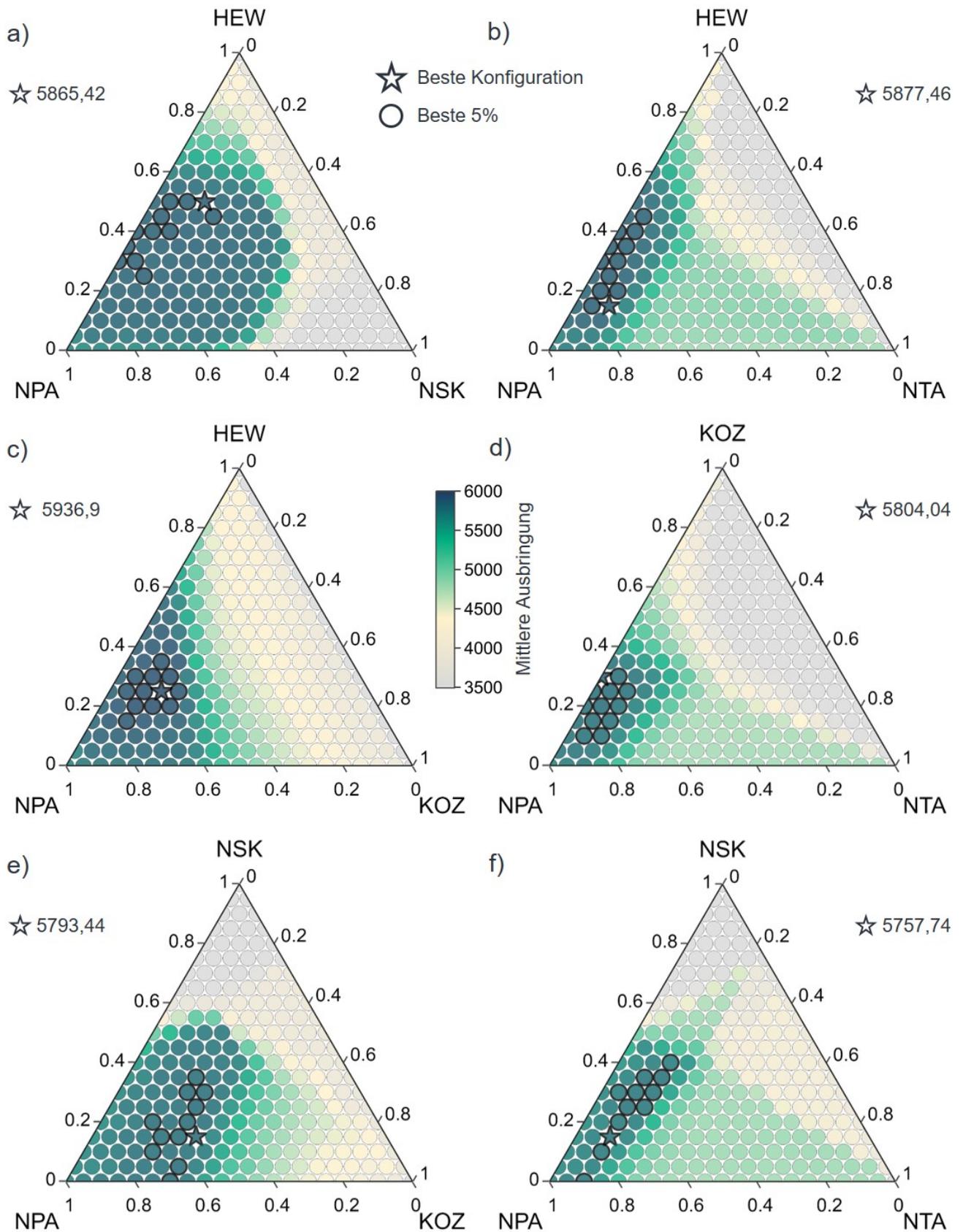


Abbildung A6.2: Entwicklung der mittleren Ausbringung aus 50 Replikationen für den Mix-M20R20A20-Fall bei kombiniertem Regeleinsatz und vollfaktorieller Gewichtungsva-riation mit Schrittweite 0,05: a) NPA-HEW-NSK, b) NPA-HEW-NTA, c) NPA-HEW-KOZ, d) NPA-KOZ-NTA, e) NPA-NSK-KOZ, f) NPA-NSK-NTA

Tabelle A6.5: Ausbringungsverluste bei Variation der MS-Anzahl und statischer GK im Verhältnis zu den je Systemkonfiguration optimalen GK

		NPA-HEW-KOZ									NPA-HEW-NSK								
		2 MS	3 MS	4 MS	5 MS	6 MS	7 MS	8 MS	9 MS	2 MS	3 MS	4 MS	5 MS	6 MS	7 MS	8 MS	9 MS		
Beste GK	w_{NPA}	0,65	0,65	0,75	0,5	0,55	0,5	0,45	0,45	0,05	0,05	0,1	0,35	0,4	0,4	0,45	0,5		
	w_{HEW}	0,15	0,1	0,1	0,4	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4	0,15	0,05	0,25	0,3	0,4	0,35	0,45		
	w_{KOZ}/w_{NSK}	0,2	0,25	0,15	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,55	0,8	0,85	0,4	0,3	0,2	0,2	0,05		
Mittlere Ausbringung		685,80	1001,88	1310,20	1538,12	1773,52	1974,04	2172,98	2363,20	697,58	1011,8	1329,7	1545,7	1761,6	1961,7	2156	2351,5		
Mittlerer Ausbringungsverlust bei Systemvariation	2 MS	-1,69%	-2,70%	-3,33%	-5,03%	-2,06%	-5,03%	-7,97%	-7,97%	0,00%	-1,36%	-0,46%	-2,72%	-8,42%	-2,28%	-9,41%	-8,49%		
	3 MS	-2,30%	-0,98%	-1,80%	-5,50%	-2,35%	-5,50%	-8,17%	-8,17%	-0,35%	0,00%	-0,67%	-2,62%	-6,88%	-2,36%	-9,06%	-9,42%		
	4 MS	-2,08%	-2,41%	-1,47%	-5,42%	-3,15%	-5,42%	-8,08%	-8,08%	-1,09%	-1,22%	0,00%	-2,99%	-7,64%	-2,55%	-9,22%	-8,96%		
	5 MS	-1,21%	-1,50%	-1,54%	-0,49%	-1,25%	-0,49%	-2,95%	-2,95%	-2,34%	-7,85%	-8,03%	0,00%	-1,43%	-0,93%	-2,69%	-3,53%		
	6 MS	-2,38%	-2,69%	-2,55%	-1,06%	0,00%	-1,06%	-1,68%	-1,68%	-3,91%	-19,54%	-20,00%	-1,79%	-0,67%	-0,98%	-1,34%	-1,43%		
	7 MS	-2,33%	-3,36%	-2,69%	0,00%	-0,07%	0,00%	-1,00%	-1,00%	-3,81%	-27,96%	-28,03%	-1,21%	-1,24%	-0,63%	-0,76%	-0,74%		
	8 MS	-2,80%	-2,93%	-2,57%	-0,01%	-0,57%	-0,01%	0,00%	0,00%	-4,48%	-34,33%	-34,29%	-1,97%	-1,59%	-1,25%	-0,78%	-1,07%		
	9 MS	-2,18%	-3,03%	-3,01%	-0,39%	-0,03%	-0,39%	0,00%	0,00%	-4,35%	-39,76%	-39,94%	-1,72%	-1,37%	-1,17%	-1,39%	-0,49%		

A7 Beschreibung der Hyperparameterstudien

In diesem Abschnitt erfolgt eine Hyperparameteranalyse und ein Vergleich der drei Optimierungsverfahren Simulated Annealing (SA), Particle Swarm Optimization (PSO) und Artificial Bee Colony Optimization (ABC) anhand des MD4K-M3R3A2 Anwendungsfalls. Als Zielgröße steht die **Maximierung der Systemausbringung** im Fokus, wobei ein Vergleich anhand der global besten gefundenen Lösung erfolgt. Da sich die Mechanismen der Optimierungsverfahren unterscheiden, wird als Abbruchkriterium nicht die Anzahl der Iterationen, sondern die Anzahl der Simulationsläufe als neutrales Maß für Rechenaufwand bzw. Effizienz verwendet. So wird der Lösungsanstieg für alle Optimierungsverfahren für die ersten 300 Simulationsläufe betrachtet. Um den stochastischen Einfluss der Simulationsläufe zu reduzieren und die Aussagekraft je Hyperparameterkonfiguration (HPK) zu festigen, wird jeder GK-Optimierungslauf je HPK zehnfach repliziert. Weiterhin setzt sich für eine effektive GK-Suche jeder Simulationslauf aus 20 Replikationen zusammen, aus denen jeweils die mittlere Ausbringung ermittelt wird. Die Evaluation einer HPK ist folglich mit einer erhöhten Rechenlast verbunden.

Die Suche der besten HPK, die eigentliche **Hyperparameteroptimierung**, kann nach verschiedenen Methoden erfolgen. Aufgrund der mit jedem Simulationslauf verbundenen Rechenlast und der insgesamt überschaubaren Anzahl an Hyperparametern wird auf eine simple grobmaschige Rasteranalyse zurückgegriffen.

Tabelle A7.1: Aufbau der Rastersuche mit untersuchten Hyperparametern und Parameterausprägungen

Optimierungsverfahren	Hyperparameter	Ausprägungen
Simulated Annealing	Abkühlungsfaktor $k_{kühl}$	0,5; 0,75; 0,9; 0,95; 0,99
Particle Swarm Optimization	Populationsgröße n_{pop}	5; 10; 20
	Beschleunigungsfaktor τ	0,5; 1; 2
Artificial Bee Colony Optimization	Populationsgröße n_{pop}	2; 5; 10; 20
	Schwellenwert n_{limit}^{abc}	4; 8

Die untersuchten Hyperparameter der drei Algorithmen sind in Tabelle A7.1 zusammengefasst. Für das **Simulated Annealing** wird der Abkühlungsfaktor $k_{kühl}$ in fünf Schritten von 0,5 auf 0,99 erhöht. Dieser steuert den Abkühlungsprozess und regelt die Übergangsgeschwindigkeit zur Exploitation. Als Nachbarschaftsfunktion kommt eine Umkreissuche zum Einsatz (vgl. A_Bail 2023). Dabei handelt es sich um die zirkuläre Nachbarschaft, einen Kreis, eine Kugel oder eine n-Hyperkugel für $n > 3$ Dimensionen. Als Starttemperatur wird konstant $T = 100$ gewählt. Als Startlösung wird jeweils eine Gleichverteilung der Gewichte gewählt.

Für **PSO** wird die Populationsgröße in drei Schritten jeweils verdoppelt, von 5 über 10 auf 20 Partikel. Zur Einfachheit werden die kognitive Komponente und die soziale Komponente jeweils mit dem gleichen Beschleunigungsfaktor τ skaliert. Es gilt $\tau_1 = \tau_2 = \tau$. Es wird sowohl eine Gleich-, eine Unter- und eine Übergewichtung des Beschleunigungsanteils mit $\tau = 0,5$, $\tau = 1$ und $\tau = 2$ untersucht. Letztlich wird in Anlehnung an Eberhart & Shi (2001) der Trägheitsfaktor μ nicht statisch, sondern als gleichverteilte Zufallsvariable mit $\mu = \text{uniform}(0,5; 1)$ gewählt, womit das Problem der Identifikation einer konkreten Explorationsrate umgangen werden kann und dennoch gute Ergebnisse erzielt werden können (Eberhart & Shi 2001, S. 96). Der **ABC-Algorithmus** wird in acht verschiedenen HPK ausgeführt. Die Populationsgröße wird in drei Schritten von 2 auf 20 erhöht. Außerdem wird der Schwellwert n_{limit}^{abc} zwischen 4 und 8 variiert.

Da sich die Dimension bzw. die Beschaffenheit des Lösungsraums bei unterschiedlicher Regelanzahl verändert, wird die Hyperparameteruntersuchung für drei, vier und fünf Regeln wiederholt. Die Abbildungen A7.1, A7.2 und A7.3 stellen die Ergebnisse der Untersuchung für drei (NPA, HEW, KOZ), vier (NPA, HEW, KOZ, NSK) und fünf Regeln (NPA, HEW, KOZ, NSK, NTA) für alle Parametrierungsverfahren und alle möglichen HPK dar. Konkret zeigt jedes der neun Diagramme den mittleren Lösungsanstieg aus den zehn Replikationen der besten mittleren Ausbringung einer GK über 300 Simulationsdurchläufe. Zur Orientierung sind weiterhin jeweils Grenzlinien für die global beste gefundene Lösung sowie die 99 %- und 95 %-Werte dargestellt. Die Lösungsgüte der initialen GK bzw. der initialen Population (PSO, ABC) entspricht dem Wert von Simulationslauf 1 bzw. den ersten n_{pop} -Simulationsläufen.

Die Gleichverteilung der GK im Simulated Annealing führt in allen Fällen zu einer verhältnismäßig schlechten Initiallösung, gefolgt von einem erheblichen initialen Anstieg der Lösungsgüte, die im kleinsten Lösungsraum (drei Regeln) ein vergleichsweise kompetitives Niveau erreicht. Bei Erhöhung der Regelanzahl nimmt die Suchleistung von SA wiederum stark ab und erreicht keine konkurrenzfähige Lösungsgüte. So verlieren sich für fünf Regeln alle HPK in niedrigen lokalen Optima. Generell übertreffen alle Verfahren leicht die noch aus Abbildung 6.11c bekannte Lösungsgüte für die NPA-HEW-KOZ-RK für MD4K-M3R3A2. Wird die Regelanzahl erhöht, zeigen PSO und ABC, im Gegensatz zu SA, eine weitere Steigerung der Lösungsgüte auf einen mittleren Bestwert von >1100 abgearbeiteten Aufträgen innerhalb von 300 Simulationsläufen s. Abbildung A7.3b und A7.3c. Bemerkenswert sind die von PSO und ABC verzeichneten guten Initiallösungen, die auf die populationsbasierten breitgefächerten Einstiegsiterationen zurückzuführen sind und eine effektive Vorpositionierung im Lösungsraum zulassen. Eine große Populationsgröße n_{pop} erweist sich dabei für NPA-HEW-KOZ-NSK als besonders effektiv, s. Abbildung A7.2b und A7.2c. Abgesehen davon kann sich im direkten Vergleich keine HPK besonders hervorheben.

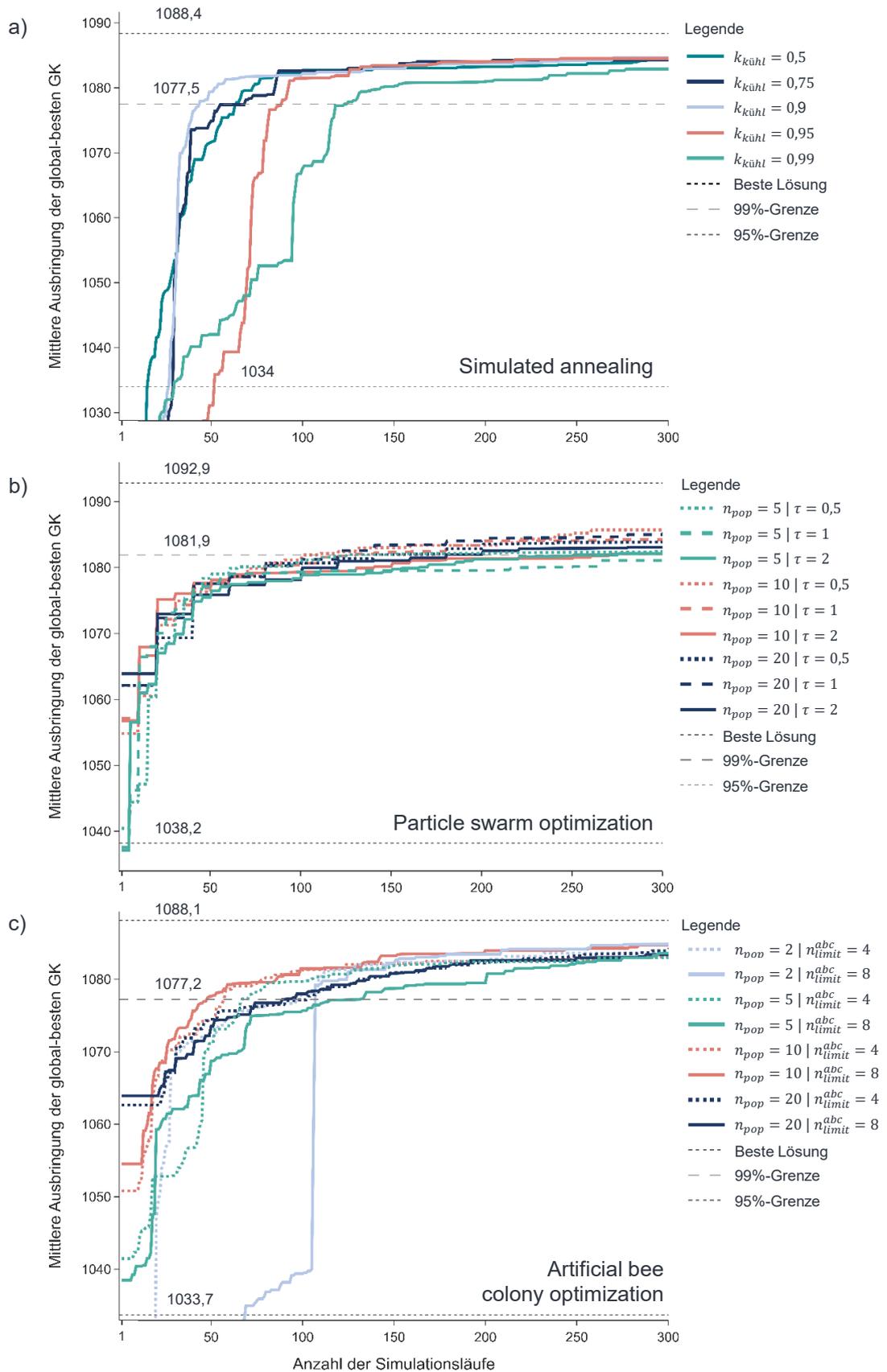


Abbildung A7.1: Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für drei aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA , b) PSO und c) ABC

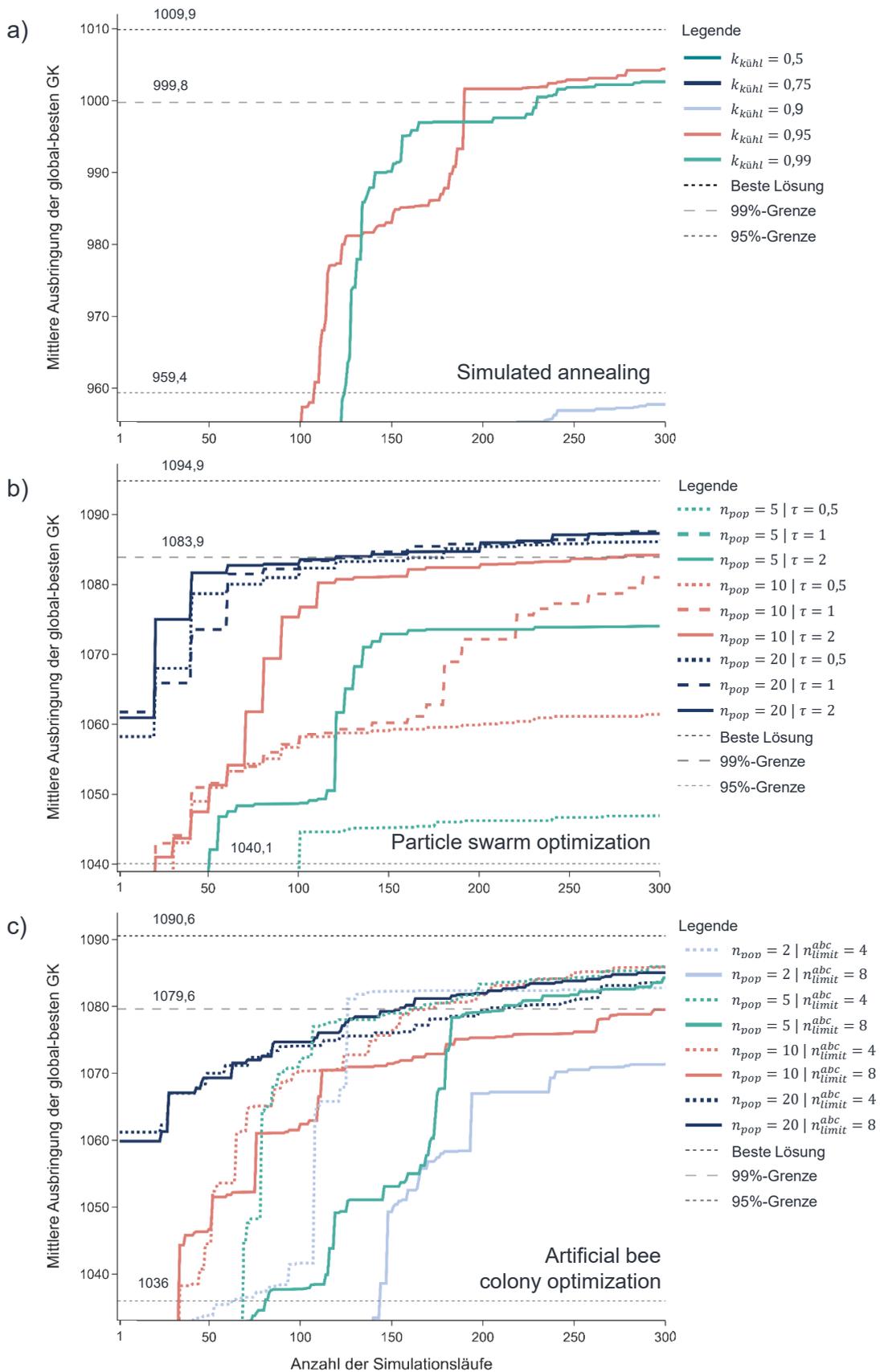


Abbildung A7.2: Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für vier aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ, NSK) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA , b) PSO und c) ABC

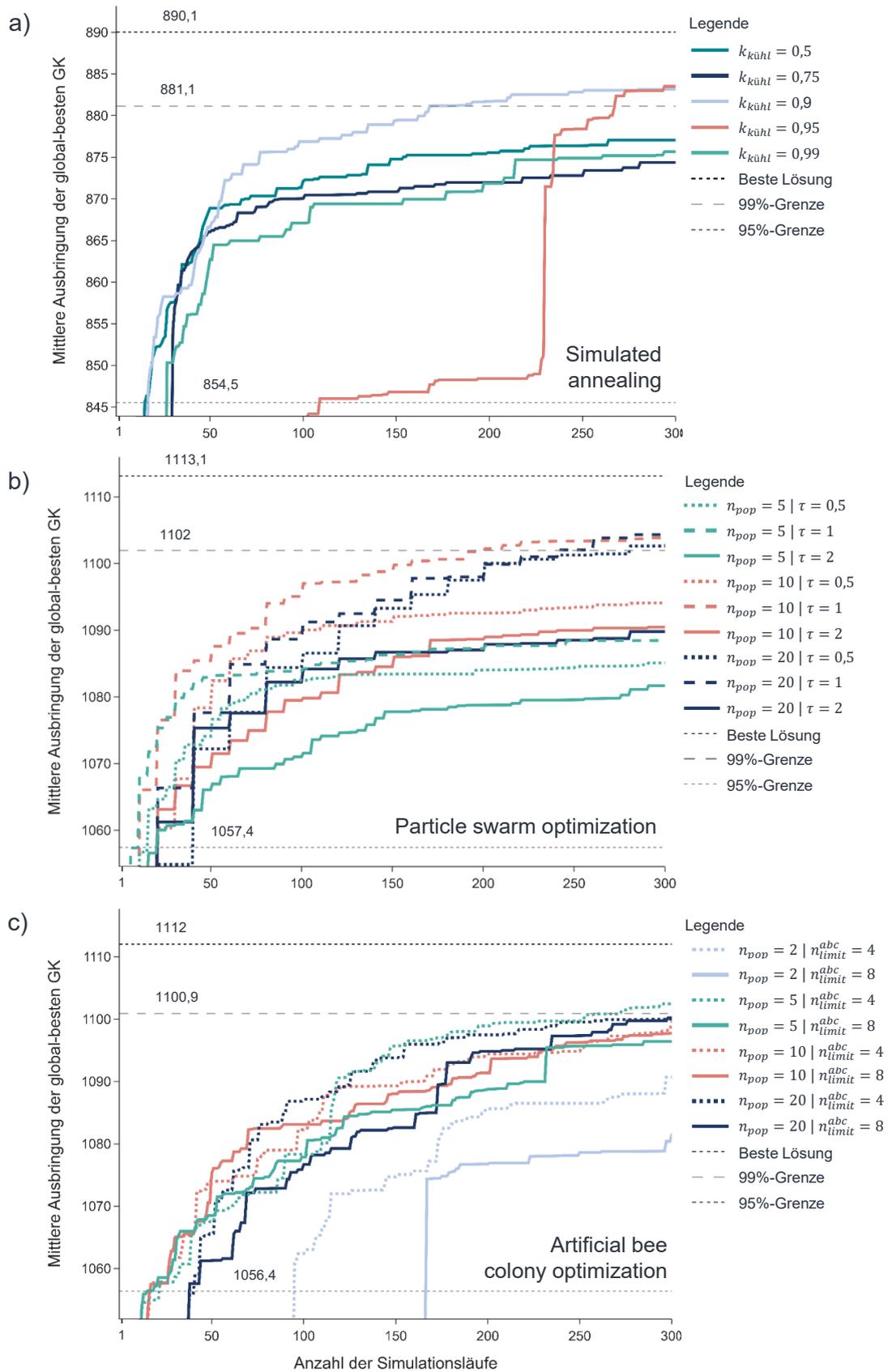


Abbildung A7.3: Lösungsanstieg für verschiedene Hyperparameterkonfigurationen für fünf aktive Regeln (NPA, HEW, KOZ, NSK, NTA) gemäß Tabelle A7.1 für a) SA, b) PSO und c) ABC

A8 Ergänzende Ergebnisse zum Vergleich der Kapazitätsplanungsverfahren

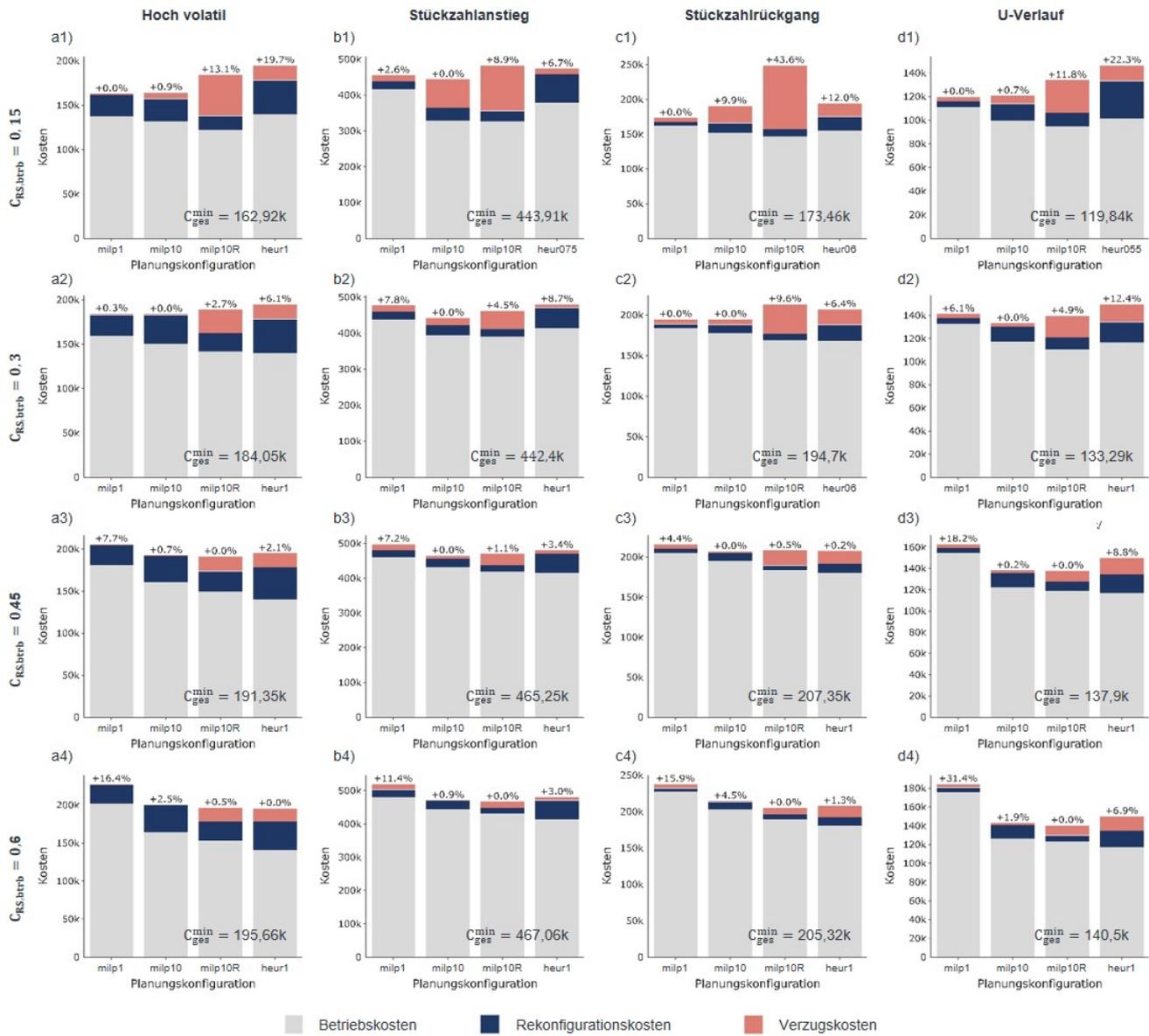


Abbildung A8.1: Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der mip1, mip10 und mip10R Konfiguration sowie des heuristischen Benchmarks für hohe RKK, verschiedene Stückzahl-szenarien und Variation des FRS-Betriebskostensatz

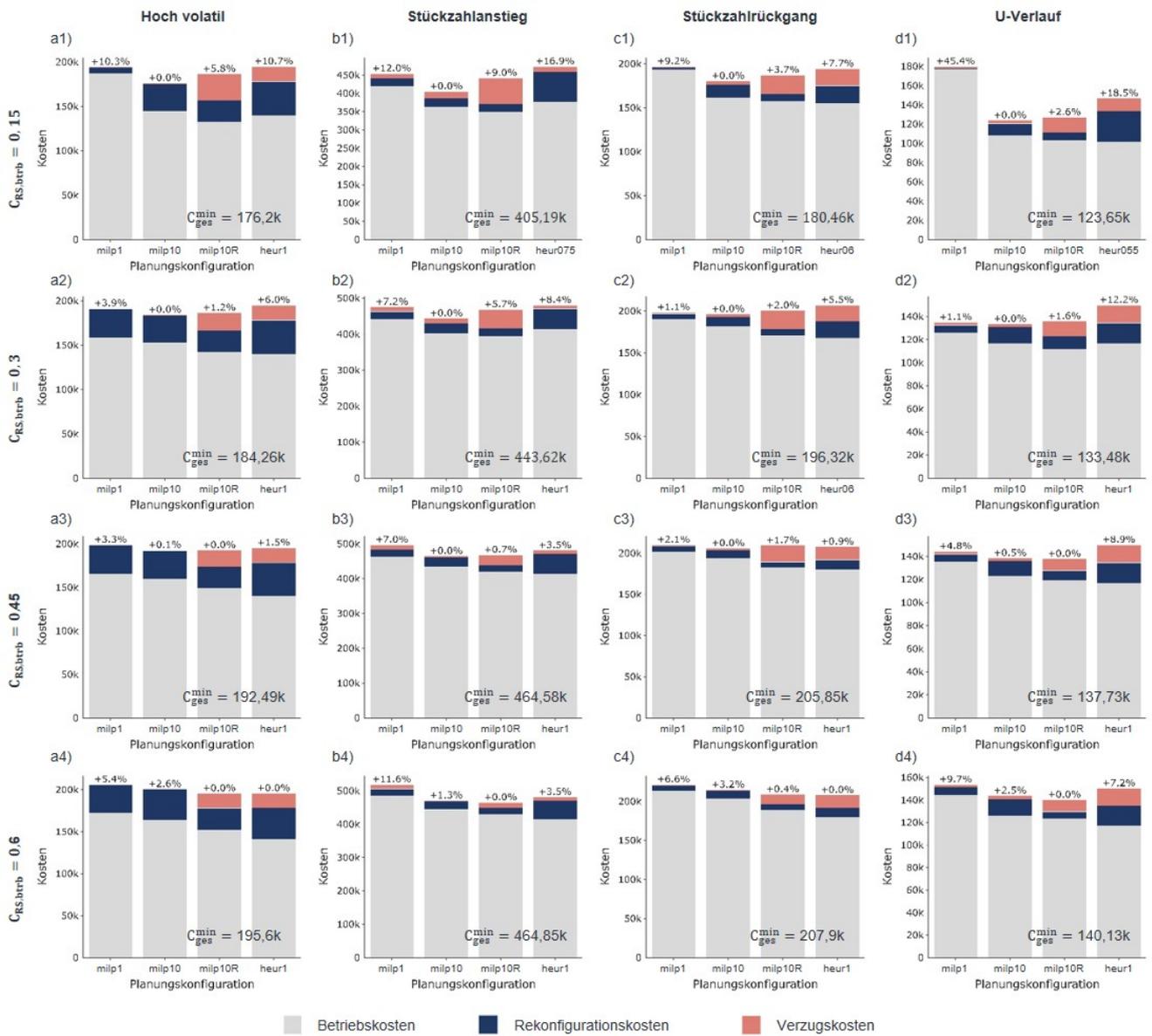


Abbildung A8.2: Aufgeschlüsselte Gesamtkosten der mip1, mip10 und mip10R Konfiguration bei FRS-Limitierung ($\gamma_{limit}^{FRS} = 1$) sowie des heuristischen Benchmarks für hohe RKK, verschiedene Stückzahlenszenarien und Variation des FRS-Betriebskostensatz

A9 Validierung: Modellierung der Gebrauchtsprodukte

Die Bandbreite der zu demontierenden Produktrückläufer des untersuchten OE-Betriebs setzt sich aus Produktvarianten eigener Herstellung und Fremdfabrikaten zusammen. Es liegt das Produktionsprogramm mit den Stückzahlen je Produktvariante auf Tagesbasis für den Zeitraum eines ganzen Jahres vor. Die Produktmodellierung ist an dieses Produktionsprogramm angelehnt. Eine Renner-Variante macht dabei über ein Drittel der Gesamtmenge aus. Darüber hinaus wurden auch Exoten modelliert mit Stückzahlen < 1000 Stück pro Jahr. Nach einer Bereinigung ergeben sich insgesamt 38 modellierte Produktvarianten. Abbildung A9.1 zeigt sowohl den Verlauf der Gesamtstückzahl als auch den Verlauf der Stückzahl je Produktvariante. Der Stückzahlverlauf der Rennervariante sticht klar hervor.

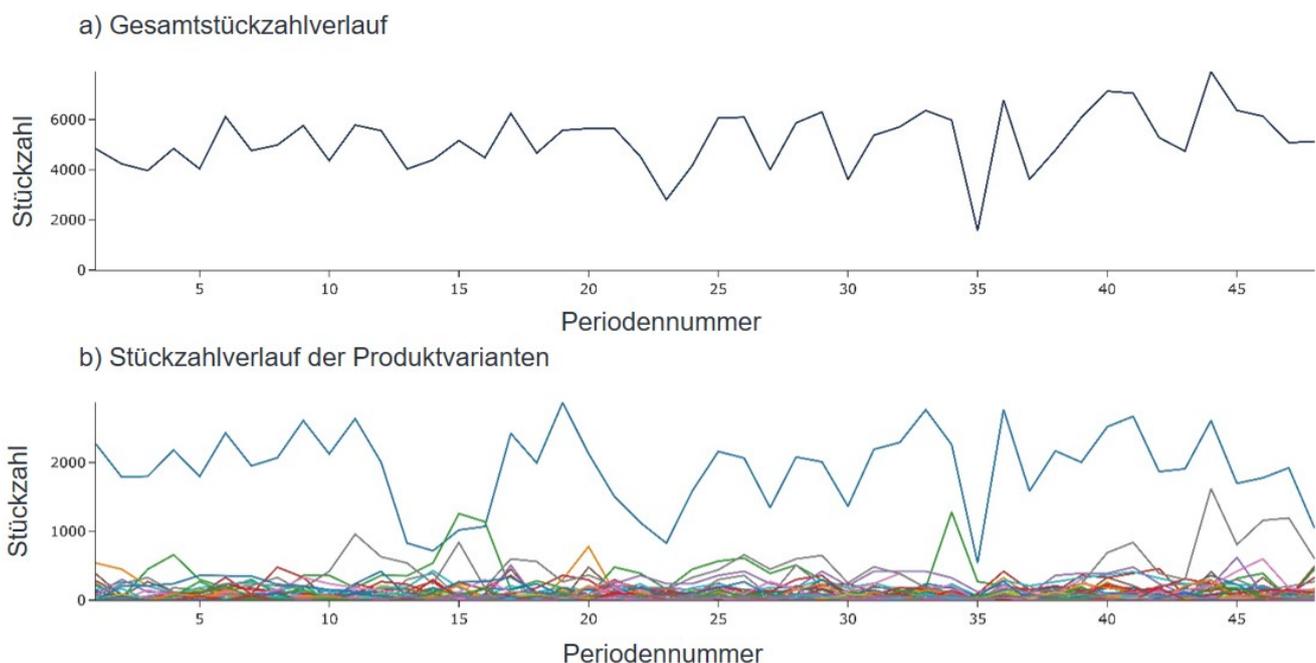


Abbildung A9.1: Bereinigte Stückzahlverläufe über 48 Produktionsperioden: a) Gesamtverlauf
b) Verlauf je Produktvariante

Im Rahmen der **Produktstrukturmodellierung** erfolgte die **Erfassung der Demontageaufgaben**. Da viele Lichtmaschinenvarianten strukturell sehr ähnlich oder identisch sind, konnten die Varianten in fünf Produktcluster eingeteilt werden. Orientiert an der manuellen Demontage wurden für diese jeweils die Komponenten, Baugruppen und Demontageaufgaben definiert und mittels DPN in Relation gesetzt. Tabelle A9.1 definiert in allgemeiner Form die Komponenten mitsamt der zugehörigen Kennbuchstaben für die Produktfamilie Lichtmaschine. Abbildung A9.2 zeigt drei Lichtmaschinenvarianten im Gebrauchtszustand vor dem Remanufacturing. Abbildung A9.3 definiert wiederum die DPN der fünf Produktcluster.

Tabelle A9.1: Komponenten der Produktfamilie Lichtmaschine und Zuweisung der Kennbuchstaben

Kennbuchstabe	Komponente	Kennbuchstabe	Komponente
A	Schutzkappe	J	Rotor / Läufer
B	Spannungsregler	K	Axialmutter
C	Verbindungsschrauben	L	Antriebslager
D	Schleifringlagerschild	M	Antriebslagerschild
E	Stator / Ständer	N	Halteplatte
F	Gleichrichter	O	Distanzbuchse
G	Schleifringlager	Q	Vakuumpumpe
I	Riemenscheibe	Q*	Vakuumpumpe (zerlegt)

Für den **Auftragsverzug** wird von einem Kostensatz von **10€ je verspätetem Auftrag** ausgegangen.



Abbildung A9.2: Drei exemplarische Lichtmaschinenvarianten im Gebrauchtzustand

Zur **Ermittlung der Qualitätsklassen** wurde eine Befragung der Demontagewerker des Remanufacturing-Betriebs durchgeführt. Dabei wurden die relevantesten Degradationserscheinungen und Abweichungen des Gebrauchtzustands nach Beeinflussung des Demontageprozesses erfragt. Für die Produktzustandsbetrachtung beschränkt sich diese Arbeit auf eine vereinfachte Differenzierung nach diesen wichtigsten und bekanntesten Merkmalen. So wurden a) *Korrosion* und b) *Verschmutzung* als prozesskritische Merkmale mit unscharfer Auswirkung identifiziert (vgl. A_Sprenger 2024). Weiterhin wurden das *Fehlen der Riemenscheibe I* (c) sowie eine *verlötete elektrische Kontaktierung* (d) als häufig auftretende Merkmale mit eindeutiger Auswirkung auf die Demontagedauer genannt (vgl. A_Sprenger 2024). Unter der Annahme binärer Merkmalsausprägungen ergeben sich bei vollständiger Kombination 16 Qualitätsklassen, vgl. Tabelle A9.2, die variantenübergreifend gültig sind. Für die Menge der Qualitätsklassen Q gilt folglich $Q_v = Q \forall v \in V$.

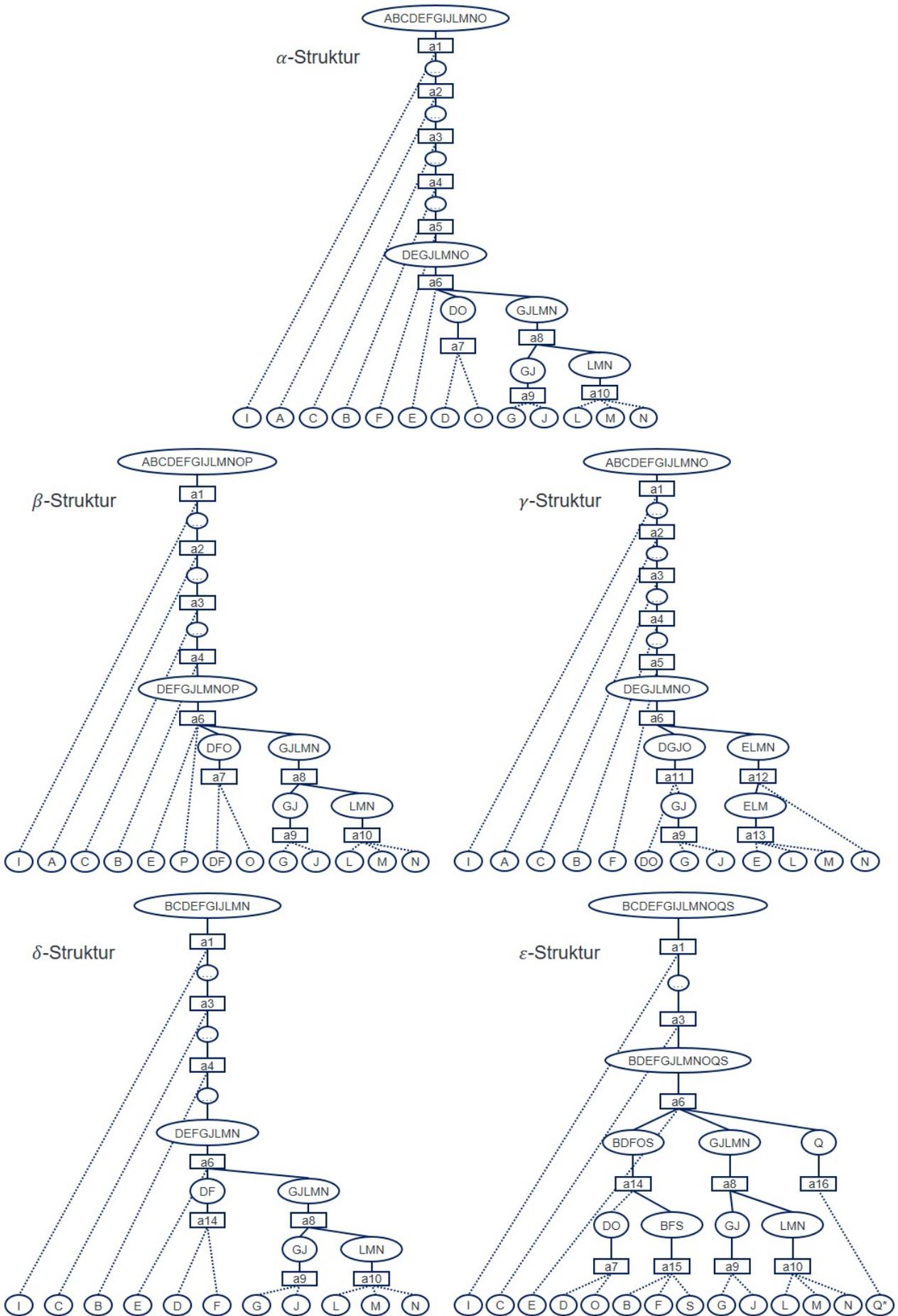


Abbildung A9.3: DPN der fünf Lichtmaschinen-Produktcluster (vgl. A_Sprenger 2024)

Der Einfluss der Qualitätsmerkmale variiert je Demontageaufgabe. Tabelle A9.3 liefert eine Übersicht über die Auswirkungen der Qualitätsmerkmale. So beeinflussen Korrosion und Verschmutzung jeweils sämtliche Aufgaben, während die fehlende Riemenscheibe und die verlöteten Drähte sich nur punktuell auswirken.

Tabelle A9.2: Klassifikation nach Zustandsmerkmalen und relative Häufigkeit der 16 Qualitätsklassen (relative Häufigkeit für den 4 QK-Fall in Klammern)

Zustandsmerkmal	QK1	QK2	QK3	QK4	QK5	QK6	QK7	QK8
Korrosion								
Verschmutzung					x	x	x	x
Gleichrichter verlötet			x	x		x		x
Riemenscheibe fehlt		x		x			x	x
Relative Häufigkeit [%]	9 (50)	6,6	3,3	0,3	20 (20)	3,3	3,3	3,3
Zustandsmerkmal	QK9	QK10	QK11	QK12	QK13	QK14	QK15	QK16
Korrosion	x	x	x	x	x	x	x	x
Verschmutzung					x	x	x	x
Gleichrichter verlötet			x	x		x		x
Riemenscheibe fehlt		x		x			x	x
Relative Häufigkeit [%]	20 (20)	3,3	3,3	3,3	9 (10)	6,6	3,3	0,3

Tabelle A9.3: Auswirkungen der Qualitätsmerkmale auf die Demontageaufgaben (in Anlehnung an A_Sprenger 2024)

Qualitätsmerkmal	Klassifizierbarkeit	Betroffene Demontageaufgaben	Wirkung
Korrosion	nicht eindeutig	alle	t_{op} , p_{erfolg}
Verschmutzung	nicht eindeutig	alle	t_{op} , p_{erfolg}
Fehlende Riemenscheibe	eindeutig	a1	t_{op}
Verlötete Drähte	eindeutig	a5, a6	t_{op}

A10 Validierung: Modellierung der Demontageressourcen

Das der Untersuchung zu Grunde liegende reale Produktionssystem für die Lichtmaschinendemontage ist durch manuelle Arbeit geprägt. Es besteht aus Einzelarbeitsplätzen mit variierendem Arbeitsinhalt. Der Transport wird in Teilen automatisiert und die Prozesse durch mechanisierte Vorrichtungen und handgeführte elektrische bzw. pneumatische Werkzeuge unterstützt. Die eigentliche Orchestrierung und Ausführung der Demontageprozesse erfolgen jedoch manuell. Der Materialfluss im Demontagesystem ist gerichtet, wobei die Ausführung der Demontageaufgaben a1 - a6 zusammengefasst und räumlich getrennt von den restlichen spezifischeren Aufgaben a7 - a16 erfolgt.

Gemäß dem Referenzmodell aus Abschnitt 5.1 entsprechen die manuellen Einzelarbeitsplätze des Realsystem weitestgehend den MS. Vereinfachend werden diese auch hier als Universalressource modelliert, eine Teil-Spezialisierung erfolgt nicht. Des Weiteren wird, wie in den vorherigen Kapiteln, die Verfügbarkeit von FRS und AS angenommen. Es gelten dabei die in Tabelle A10.1 getroffenen Annahmen. Für die AS wird von sieben verschiedenen Vorrichtungstypen ausgegangen. Hierbei handelt es sich jeweils um Pressvorrichtungen zur Umsetzung jeweils gleichartiger einachsiger Entnahmevorgänge. Eine Übersicht über die jeweiligen Fähigkeiten der Stationstypen ist in Tabelle A13.1 vorgegeben. Die Angaben für die Betriebs- und Rekonfigurationskosten sind geschätzt und werden in € angegeben. Eine systematische Schätzung der Stationskostensätze, basierend auf der Annahme eines Ressourcen-Leasings, befindet sich in Anhang A12.

Tabelle A10.1: Ressourcenübersicht für den Anwendungsfall der Lichtmaschinendemontage

Merkmal	MS	FRS	AS / DVx
Ressourcentypen R	MS	FRS	DV1, DV2, DV3, DV4, DV5, DV6, DV7
Backup-Ressource r	n/A	MS	n/A
Stochastizität der Operationsdauer	Beta-verteilt	Beta-verteilt	deterministisch
Eingangspufferkapazität $n_{ep,s}^{max}$ [Stück]	20	20	20
Ressourcenkostensatz $c_{r,btrb}$ [€/min]	s. Tabelle A12.1	s. Tabelle A12.1	s. Tabelle A12.1
Ressourcenaufbaukosten $c_{r,+}$ [€/Station]	500	3000	3000
Ressourcenabbaukosten $c_{r,-}$ [€/Station]	200	1000	1000
Erfolgswahrscheinlichkeit p_{erfolg} [%]	100	≤ 100	100
Reaktionszeit ϵ_r [Perioden]	1	4	4

A11 Validierung: Modellierung der Demontageoperationen

Für die Parametrisierung des Simulationsmodells ist erneut eine vollständige quantitative Beschreibung aller Operationen erforderlich. Aus der Menge aller möglichen Demontageaufgaben für alle Produktvarianten, den 16 Qualitätsklassen und den Ressourcentypen ergibt sich eine fast sechsstellige Anzahl an Demontageoperationen, für welche die Durchführbarkeit, die Erfolgswahrscheinlichkeit, die Ausführungsdauer, bzw. bei stochastischer Durchführung, die Minimaldauer, die wahrscheinlichste Dauer und die Maximaldauer zu definieren sind. Für die Instanziierung wird für jeden Ressourcentyp ein individueller Ansatz gewählt. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit A_Sprenger 2024 auf.

Für die **MS-Operationen** wurde eine an der realen Demontage orientierte Abschätzung der minimalen, wahrscheinlichsten und maximalen Demontagedauer mittels Expertenbefragung durchgeführt. In diesem Zuge erfolgte eine quantitative Schätzung der Auswirkung der vier Degradationsarten auf alle individuellen Demontageaufgaben der Produktcluster, sowohl in Form einer absoluten Änderung der Ausführungsdauer bei eindeutiger Auswirkung, als auch in faktorieller Form für die unscharfe Auswirkung von Korrosion und Verschmutzung.

Die **FRS-Operationen** erfordern ein angepasstes Vorgehen, mangels real-verfügbarer flexibler Robotersysteme im produktiven Einsatz in der Lichtmaschinendemontage. Für eine realitätsnahe Bestimmung der FRS-Operationen wurde deshalb ein Verfahren zur Prozessablauf-Zeitanalyse entwickelt und eingesetzt. Das Verfahren ist vergleichbar mit Ansätzen wie der MTM-Methode, ein System vorbestimmter Zeiten, zur Ermittlung manueller Planzeiten in der Montage². Da jedoch weder Zeitdaten zu Grundbewegungen bzw. Funktionen (Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen, Loslassen in der MTM-Methode für den Menschen), im weiteren Verlauf Primitivtasks genannt, vorliegen, noch die Stochastik der Prozessausführung berücksichtigt wird, wird im Folgenden ein eigenes Vorgehen zur systematischen Annäherung einer FRS-Parametrierung vorgestellt. Dieses untergliedert sich in fünf Schritte und wurde in Abstimmung mit Experten im Bereich Automatisierung und roboterbasierter Demontage durchgeführt:

1. **Identifikation geeigneter Demontageaufgaben:** In diesem ersten Schritt erfolgt eine qualitative Analyse der Arbeitsinhalte. Unter Berücksichtigung der technischen Hemmnisse, werden die Demontageaufgaben bestimmt, für die der flexible Roboter befähigt werden kann.

² MTM steht für Methods Time Measurement. Neben der Montage existieren auch Erweiterungsansätze der Methode für die Demontage, vgl. z.B. Hartel 1997, S. 74 ff.

2. **Bestimmung und Parametrisierung der FRS-Primitivtasks:** Analog zu den Grundbewegungen der MTM-Methode werden hier die wiederkehrenden Primitivtasks des Roboters definiert und parametrisiert. Dabei werden die Grundzeit, die Stochastizität, der maximale zeitliche Aufschlag, die Scheiterwahrscheinlichkeit und die Qualitätsmerkmale mit Einfluss auf den Primitivtask definiert. Die Primitivtasks sind: *Effektorwechsel, Wegsortieren, Abziehen, Auspressen, Erkennen, Anfahren* und *Lösen*.
3. **Ablaufanalyse und Sequenzierung:** In diesem Schritt werden die FRS-Aufgaben analysiert und entsprechend der Primitivtask sequenziert. Weiterhin werden die Primitivtasks der Sequenz, in welchen ein Scheiterrisiko vorliegt, definiert. Anders als bei den übergeordneten Demontageaufgaben, ist hier die Annahme, dass eine einmalige Wiederholung eines gescheiterten Primitivtasks möglich ist.
4. **Monte-Carlo-Simulation (MCS):** Die sich aus der Primitivtasksequenz ergebende wahrscheinlichste Ausführungsdauer sowie das Scheiterrisiko ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und nicht ohne Weiteres analytisch lösbar. Aus diesem Grund werden Zufallsstichproben für die im vorherigen Schritt definierten Primitivtasksequenzen genommen. Dazu sind die Sequenzen in ein geeignetes Tool zur Durchführung von Monte-Carlo-Analysen zu übertragen. In der vorliegenden Arbeit wurde hierzu ein Excel-Tool genutzt.
5. **Ableitung der Operationsparameter:** In einem letzten Schritt werden für jede Operation die Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse verarbeitet und die Parameter der BV abgeleitet. Während sich t^{min} aus der bestmöglichen Sequenz und t^{max} aus der schlechtestmöglichen, nicht endgültig gescheiterten Primitivtasksequenz ergibt, resultieren t^{modus} und p_{erfolg} aus der Auswertung der mittels MCS generierten Daten.

Für die **AS-Operationen** wird analog zu den FRS-Operationen verfahren. Hierbei werden jedoch lediglich deterministische, nicht scheiternde Primitivtasks vorgesehen. Eine MCS ist folglich nicht erforderlich. In Teilen können für die Schätzung der Primitivtasks die mechanisierten Vorrichtungen der realen Lichtmaschinendemontage als Referenz herangezogen werden.

A12 Validierung: Berechnung der Stationskostensätze

Die Berechnung der Stationskostensätze orientiert sich am Vorgehen zur Maschinenkostensatzrechnung nach Hartel & Lotter (2012, S. 381 ff.). Zur Realisierung verhältnismäßig kurzer Systemrekonfigurationen wird von einem Ressourcenleasing mittels internem oder externem Leasinggeber ausgegangen. Angelehnt am Vorgehen von Fechter (2022) zur Berechnung von Tagesraten von geleasteten Produktionsressourcen, zeigt Tabelle A12.1 die Berechnung der Stationskostensätze für MS, FRS und AS. Dabei gelten die folgenden Annahmen:

- Sämtliche erforderlichen Teilsysteme der Stationstypen sowie deren Wiederbeschaffungskosten basieren auf Angeboten sowie Erfahrungs- und Schätzwerten von Experten
- Für alle DV der AS-Station fallen die gleichen Kosten an
- Die Abschreibungsdauer orientiert sich für alle Anlagegüter an der Abschreibungsdauer für Industrieroboter von 6 Jahren. Diese Angabe basiert auf der Abschreibungstabelle für den Wirtschaftszweig Maschinenbau des Bundesfinanzministeriums³
- Für die jährlich anfallenden Wartungskosten wird von 5 % des Wiederbeschaffungswerts ausgegangen (Hartel & Lotter 2012, S. 382)
- Es liegt die Annahme einer linearen Abschreibung zu Grunde. Dafür wird von einem kalkulatorischen Zinssatz von 10 % ausgegangen, der jährlich auf 50 % des Wiederbeschaffungswerts anfällt (Hartel & Lotter 2012, S. 382 f.)
- Der Personalkostensatz orientiert sich an den Bruttolohnkosten im produzierenden Gewerbe von 42,9 €/h in Deutschland 2022, vgl. Statistisches Bundesamt 2023
- Der Stromkostensatz orientiert sich am mittleren Industriestrompreis in Deutschland im Jahr 2023 (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2024). Der Stromverbrauch ist geschätzt.
- Lohnkosten und sonstige Kosten für die Konzeption und Entwicklung der Stationen bzw. der Demontagevorrichtungen werden vernachlässigt.

³ https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Maschinenbau.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt aufgerufen am 24.06.2024

Tabelle A12.1: Berechnung der Stationskostensätze in Anlehnung an das Leasingrechnungsmodell von Fechter (2022) (Kursive Werte sind vom Autor geschätzt)

Kapitaldienstkosten	FRS	AS	MS
Roboter UR16e	42.000 €	-	-
Flexibles Endeffektorsystem	30.000 €	-	-
Kamerasystem und Sensorik	20.000 €	-	-
Flexibles Werkstückspannsystem	5.000 €	-	-
Roboter UR10e und Greifer	-	40.000 €	-
Automatisierte Demontagevorrichtung	-	40.000 €	-
Werkbank, Werkzeuge, Vorrichtungen	-	-	15.000 €
Peripherie, Steuerung, Sonstiges	20.000 €	15.000 €	5.000 €
Wiederbeschaffungswert K_{WB}	117.000 €	95.000 €	20.000 €
Abschreibungsdauer 6 Jahre			
Aufwand für Abschreibung	32.500 €/a	23.750 €/a	5.000 €/a
Instandhaltungskostenanteil 5 % vom K_{WB}			
Instandhaltungskosten	5.850 €/a	4.750 €/a	1.000 €/a
Kalkulatorischer Zinsanteil 50 % vom K_{WB}			
Kalkulatorische Zinsen	5.850 €/a	4.750 €/a	1.000 €/a
Fixkosten Leasinggeber	31.200 €/a	25.333 €/a	5.333 €/a
230 Produktionstage pro Jahr			
Verleihfrequenz der Ressource 50 %			
115 Produktionstage im Einsatz pro Jahr			
Selbstkosten Leasinggeber	271,3 €/d	220,29 €/d	46,38 €/d
0 % Leasingaufschlag für Risiko und Gewinn			
Fixkosten Leasingnehmer	271,3 €/d	220,29 €/d	46,38 €/d
Fixkosten (1 Schicht)	0,565 €/min	0,459 €/min	0,097 €/min
Fixkosten (2 Schichten)	0,283 €/min	0,229 €/min	0,048 €/min
Strompreis Industrie 0,24 €/KWh			
Durchschnittlicher Verbrauch	2.500 W	2.500 W	1.000 W
Stromkosten	0,010 €/min	0,010 €/min	0,002 €/min
Personalkosten	-	-	0,715 €/min
Variable Kosten Gesamt	0,010 €/min	0,010 €/min	0,717 €/min
Stationskostensatz (1 Schicht)	0,575 €/min	0,469 €/min	0,816 €/min
Stationskostensatz (2 Schichten)	0,293 €/min	0,239 €/min	0,767 €/min

A13 Validierung: Fähigkeiten und Kosteneffizienz der Stationstypen

Tabelle A13.1 zeigt eine Übersicht der Stationsfähigkeiten zur Übernahme der aus Abbildung A9.3 hervorgehenden Demontageaufgaben.

Tabelle A13.1: Fähigkeitsraum der Stationstypen (vgl. A_Sprenger 2024)

Demontage- aufgabe	Befähigte Stationstypen			Demontage- aufgabe	Befähigte Stationstypen		
	MS	FRS	AS		MS	FRS	AS
a1	x	x		a9	x		R3
a2	x	x		a10	x		R4
a3	x	x		a11	x		R5
a4	x	x		a12	x		R6
a5	x	x		a13	x		R7
a6	x	x		a14	x		
a7	x		R1	a15	x		
a8	x		R2	a16	x		

Aufgrund des Umfangs wird auf eine vollständige Darstellung der aus den Planzeitanalysen hervorgegangenen Zeitwerten verzichtet. Stattdessen folgt eine Charakterisierung der Fähigkeiten sowie ein Vergleich der Kosteneffizienz der Stationen in aggregierter Form. Neben den Planzeitwerten liegen die geschätzten Stationskosten aus Tabelle A12.1 zu Grunde. Tabelle A13.2 fasst wiederum verschiedene Metriken zur Bewertung des definierten Fähigkeitsraums der FRS und AS sowie der Kosteneffizienz gegenüber der MS zusammen. So ist die FRS für die Hälfte der Operationen und damit für doppelt so viele Operationen befähigt wie die AS. Die Bestimmung der Planzeiten und Erfolgsraten der FRS unterliegen jedoch einer **konservativen Schätzung**, die an die Leistungsfähigkeit flexibler Roboter angelehnt ist und dem aktuellen Stand der Forschung entspricht. Dies unterstreichen die folgenden Werte. Die mittlere Erfolgswahrscheinlichkeit der FRS beträgt lediglich 31,57 %. Als weitere Metrik wird die Kosteneffizienz der Operationen nach Formel 5.24 betrachtet. Konkret wird für alle Operationen befähigter Demontageaufgaben die Kosteneffizienz ins Verhältnis zur MS-Kosteneffizienz gesetzt.

Im Mittel ergibt sich für die FRS ein gegenüber der MS über 13-fach schlechteres Kosteneffizienzverhältnis. Auch für die an der FRS günstigsten Operation hält die MS eine bessere

Kosteneffizienz vor. Es existiert demnach keine Demontageoperation für die eine FRS einer MS vorgezogen werden sollte. Auf den Einsatz von FRS sollte somit verzichtet werden. Für die AS zeigen die Metriken das Ergebnis einer eher optimistischen Parametrierung. Hierunter zählt stets die Prämisse, dass AS nicht scheitern können und vergleichsweise niedrigen Ausführungszeiten unterliegen. Dies spiegelt sich in der Kosteneffizienz wider, die im Mittel 2,77-fach höher ausfällt als bei der MS. Mit Befähigung für fast ein Viertel der Demontageaufgaben birgt die AS ein hohes Potential für einen kosteneffizienteren Systembetrieb.

Tabelle A13.2: Charakterisierung der Kosteneffizienz der FRS und AS gegenüber der MS aufbauend auf den ursprünglichen Parametern

Merkmal	FRS	AS
Anteil befähigter Operationen	52,22 %	24,83 %
Mittlere Erfolgsrate	31,57 %	100 %
Minimales Kosteneffizienzverhältnis	0,002	0,09
Maximales Kosteneffizienzverhältnis	0,727	9,811
Mittleres Kosteneffizienzverhältnis	0,076	2,77
Operationsanteil mit besserer Kosteneffizienz als MS	0 %	83,94 %

Wie beschrieben basiert die Planzeitanalyse und Parametrierung der FRS-Operationen auf konservativen Grundzeiten, aufbauend auf Expertenschätzungen sowie experimentell ermittelten Messwerten, ohne den unmittelbaren Anspruch einer industriellen Nutzung. Durch die Steigerung der Prozessreife im Rahmen der Industrialisierung lässt sich die Kosteneffizienz flexibler Roboterstationen jedoch potentiell erheblich steigern. Dabei sind **drei Stellschrauben** zu unterscheiden, durch welche die Kosteneffizienz verbessert werden kann:

1. Reduktion der Ausführungszeit (Effizienzsteigerung)
2. Erhöhung der Erfolgswahrscheinlichkeit (Robustheitssteigerung)
3. Senkung der Stationskosten

Folgend wird der Einfluss der ersten zwei Stellschrauben auf die Wettbewerbsfähigkeit der FRS untersucht. Konkret soll so eine grobe Aussage über die erforderlichen Effizienz- und Robustheitssteigerungen im Zuge einer Industrialisierung getroffen werden. Hierzu werden die ursprünglichen Parameterwerte einheitlich für alle FRS-Operationen mit einem Effizienz- und einem Robustheitsfaktor manipuliert. So wird t^{min} , t^{max} , t^{modus} jeweils gemäß Formel A13.1 mit dem Effizienzfaktor k_{eff} beaufschlagt. Analog werden die Erfolgswahrscheinlichkeiten nach Formel A13.2 mit dem Robustheitsfaktor k_{rbst} verrechnet. Vereinfacht werden die

Faktoren dabei auf alle Operationen in gleichem Maße angewandt.

$$t_{neu}^x = \frac{1}{k_{eff}} * t_{ursp}^x \quad \text{A13.1}$$

$$p_{erfolg,neu} = 1 - \left((1 - p_{erfolg,ursp}) * \frac{1}{k_{rbst}} \right) \quad \text{A13.2}$$

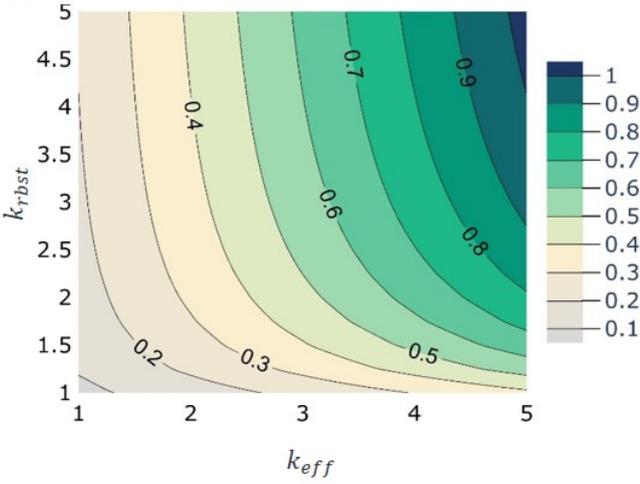
Die Konturgraphen in Abbildung A13.1 stellen die Entwicklung der FRS-Kosteneffizienz bei Modifikation der FRS-Effizienz und -Robustheit für einen Einschicht- (oben) und einen Zweischichtbetrieb dar. Die ursprüngliche Parametrierung befindet sich dabei jeweils im Ursprung. Graph a) zeigt das mittlere MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis. So bedarf es einer Beschleunigung der Demontageoperationen um den Faktor fünf und einer Reduktion der Scheiterwahrscheinlichkeit um den Faktor vier, um die mittlere Kosteneffizienz der MS im Einschichtbetrieb zu erreichen.

Prinzipiell müssen nicht alle Operationen der FRS kosteneffizienter sein, insbesondere in einem System mit einer hohen Stationszahl ist eine zielgerichtete Verteilung der Operationen auf die Stationen ohne Auslastungsverluste möglich. Graph b) zeigt in diesem Zuge den Anteil der Operationen mit höherer FRS-Kosteneffizienz. Erst durch Halbierung der Scheiterraten und eine Beschleunigung der Demontageprozesse um den Faktor vier ist für annähernd ein Zehntel der Operationen die FRS der MS vorzuziehen.

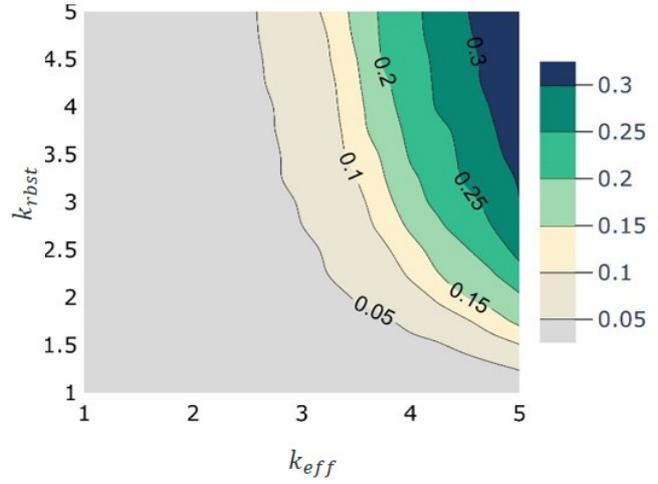
Im Zweischichtbetrieb verschiebt sich das Kosteneffizienzverhältnis zu Gunsten der FRS. Im Ursprung existieren noch immer keine Operationen mit besserer FRS-Kosteneffizienz. Durch Verdopplung der Geschwindigkeit und Halbierung der Scheiterraten könnten jedoch bereits ein Zehntel der Operationen kostengünstiger an der FRS ausgeführt werden.

Einschichtbetrieb

a) Mittleres MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis

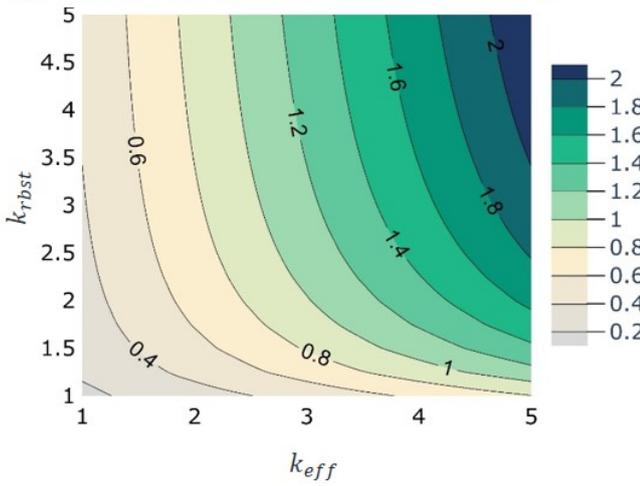


b) Operationsanteil mit höherer FRS-Kosteneffizienz



Zweischichtbetrieb

c) Mittleres MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis



d) Operationsanteil mit höherer FRS-Kosteneffizienz

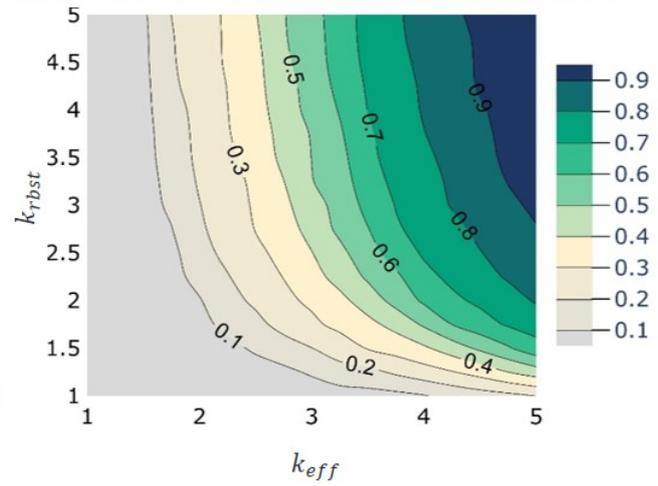


Abbildung A13.1: Mittleres MS-FRS-Kosteneffizienzverhältnis sowie Operationsanteils mit höherer FRS-Kosteneffizienz im Einschichtbetrieb (a, b) und im Zweischichtbetrieb (c, d): Visualisierung mittels Konturgraphen

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 drehzahlgeregelten 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 druck geregelter 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 fünfachsigem 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 bearbeitungselementorientiertes, 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 Linnenbuerger

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 Zerspanprozess 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 Vossman

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 Schmäzle

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
Abrasive Strahlschneiden**

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 Dienstleistungs-
organisationen: 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 Mikroteile

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

Prozesskraftrichtungsangepasste 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

Segmentspannbildung, 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 adaptronischen Kugelgewindetrieben

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 Fügespalts 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 ressourcen-effizienter 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 Unsicher-
heit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**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 anforderungsrechte 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 Mikrotexturierung

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

Wälzschälern 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 Vereinzelungs- 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 Schlagenhauf

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

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönninger

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

